

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN EKSENEL AKILI ÇİFT  
ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI  
VE ÜRETİMİ**

**Rüya AKINCI**

Yüksek Lisans Tezi

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekatronik Bilim Dalı

TEMMUZ 2020

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

# **ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN EKSENEL AKILI ÇİFT ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Tez Yazarı  
**Rüya AKINCI**

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet POLAT

TEMMUZ 2020  
ELAZIĞ

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

|                    |                                                                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Başlığı:           | Elektrikli Araçlar için Eksenel Akıllı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi |
| Yazarı:            | Rüya AKINCI                                                                                            |
| İlk Teslim Tarihi: | 03.06.2020                                                                                             |
| Savunma Tarihi:    | 10.07.2020                                                                                             |

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

|           |                                                                          |                          |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Danışman: | Dr. Öğr. Üyesi Mehmet POLAT<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi | <i>İmza</i><br>Onayladım |
| Başkan:   | Dr. Öğr. Üyesi Zeki Omaç<br>Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi   | Onayladım                |
| Üye:      | Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇELİK<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  | Onayladım                |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Prof. Dr. Soner ÖZGEN  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

10.07.2020

**Rüya AKINCI**



# ÖNSÖZ

Tez çalışmasında eksenel akıllı çift rotorlu sabit mıknatıslı senkron motor tasarlanmış ve üretilmiştir. Eksenel akıllı motorlar son yıllarda oldukça önemli bir hale gelmiştir. Bunun en önemli sebeplerinden biri diğer motorlara kıyasla daha yüksek verime sahip olmasıdır. Diğer en önemli sebebi ise eksenel olarak daha az yer kapladığı için diğer motorlara kıyasla daha hafif olmasıdır. Eksenel akıllı motorların üstünlükleri olduğu kadar zorlukları da vardır. Bunlardan biri motor analizi ile ilgili kaynak sıkıntısının olmasıdır. Bu nedenle eksenel akıllı motor analizini yapmak uzun bir süreç almaktadır. Diğer sebebi ise ülkemizde bu motor henüz yaygınlaşmadığı için üretim sıkıntısının olmasıdır.

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet POLAT' a çalışma boyunca bana fikirleriyle ve yardımlarıyla destek olan Arş. Gör. Ahmet YILDIZ' a ve motor üretiminde katkılarından ötürü bölüm başkanımız Doç. Dr. Oğuz YAKUT' a ve bölüm teknikerimiz İhsan ASUTAY' a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım süresince beni daima destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından 118E943 proje numaralı 1002 Hızlı Destek proje ile desteklenmiştir.

**Rüya AKINCI**  
ELAZIĞ, 2020

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                          | Sayfa     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                               | iv        |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                        | v         |
| ÖZET .....                                                                               | vi        |
| ABSTRACT .....                                                                           | vii       |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                   | viii      |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                                   | x         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                            | xi        |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                    | <b>1</b>  |
| <b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>                                                          | <b>2</b>  |
| <b>3. EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI SENKRON MOTORLARA GENEL BAKIŞ .....</b>             | <b>9</b>  |
| 3.1. Eksenel Akıllı Motorlar .....                                                       | 9         |
| 3.2. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Avantaj ve Dezavantajları .....  | 10        |
| 3.3. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Kullanım Alanları .....          | 10        |
| 3.4. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı ve Çeşitleri .....  | 11        |
| 3.4.1. Tek Kenar Yapılı Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar .....           | 12        |
| 3.4.2. Stator Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar ..... | 12        |
| 3.4.3. Rotor Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor .....     | 13        |
| 3.4.4. Çift Kenar Yapısına Sahip Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar .....  | 13        |
| 3.4.5. Çift Stator Oluklu Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar .....         | 14        |
| 3.4.6. Çift Rotor Oluklu Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor .....             | 15        |
| 3.4.7. Eksenel Akıllı Motorlarda Rotor ve Stator Yapıları .....                          | 15        |
| <b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>                                                        | <b>17</b> |
| 4.1. Analitik Tasarım .....                                                              | 18        |
| 4.1.1. Boyutlandırma Denklemleri .....                                                   | 18        |
| 4.1.2. Manyetik Devre Tasarımı ve Analizi .....                                          | 21        |
| 4.1.3. TORUS Motorun Elektriksel Eşdeğer Devresi .....                                   | 23        |
| 4.1.4. TORUS Motorun Kayıp Denklemleri .....                                             | 26        |
| 4.2. Motor Optimizasyon Çalışması .....                                                  | 27        |
| 4.2.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu .....                                                 | 28        |
| 4.2.2. Genetik Algoritma ile Optimizasyon .....                                          | 30        |
| 4.3. Motor Optimizasyon Sonuçları .....                                                  | 33        |
| <b>5. TORUS MOTORUN ÜRETİMİ.....</b>                                                     | <b>37</b> |
| <b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                     | <b>42</b> |
| 6.1. TORUS Motor 3D Elektromanyetik Analiz Sonuçları .....                               | 42        |
| <b>7. SONUÇLAR.....</b>                                                                  | <b>53</b> |
| ÖNERİLER .....                                                                           | 54        |
| KAYNAKLAR.....                                                                           | 55        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                           |           |

# ÖZET

## Elektrikli Araçlar için Eksenel Akıllı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi

Rüya AKINCI

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2020, Sayfa: xiv + 58

Son yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. Bunun en önemli sebepleri; büyük yerleşim merkezlerinde araba yoğunluğu nedeniyle oluşan çevre kirliliği, fosil yakıtların tükenmesi, dünyanın enerji kaynağı sıkıntısına girmesi, verimli ve maliyet etkin elektrikli motor ve sürücü teknolojisindeki ilerlemeler, elektrik enerjisinin depolanmasını sağlayan bataryalardaki gelişmeler ve sürüş güvenliliğinin ön plana çıkmasıdır. Elektrikli araçlarda enerji verimliliğini sağlayan en önemli etkenlerden biri motordur. Elektrik makineleri alanında baskın bir şekilde hâkim hale gelen sürekli mıknatıslı senkron motor sınıfından olan eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron motor, diğer motor türlerine göre birçok avantaja sahiptir. Uyarma alanı olmadığından rotor kayıplarının ciddi oranda azaltılması sebebiyle verimi daha yüksektir. Titreşim ve gürültü seviyesi bakımından da eksenel akıllı motorların üstünlüğü bulunmaktadır. Ayrıca kolaylıkla ayarlanabilen hava aralığına sahiptirler. Doğrudan sisteme entegre olabilmesi de elektrikli araçlarda kullanım açısından önemli bir özelliktir. Bu tezde literatürde TORUS motor olarak adlandırılan çift rotorlu eksenel akıllı sürekli mıknatıslı motor tasarlanmıştır. Bu motorun en belirgin özelliği düşük hızlarda bile yüksek moment üretebilmesidir. Ayrıca verimleri de diğer motorlara göre daha yüksektir.

Bu çalışmada; eksenel akıllı motorlar ve bu motor sınıfının bir üyesi olan TORUS motor ve TORUS motorun tasarımında kullanılan optimizasyon yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. TORUS motor tasarım denklemleri çıkarılarak bu denklemlere göre optimizasyonu yapılarak analizi ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** TORUS 1, Optimizasyon 2, Sabit Mıknatıslı Senkron Motor 3, Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor 4, Genetik Algoritma 5, Parçacık Sürü Optimizasyonu 6.

## ABSTRACT

---

### Design and Production of a Double-Sided Slotted Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Electrical Vehicles

Rüya AKINCI

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechatronics Engineering

July 2020, Pages: xiv + 58

---

In recent years, interest in electric vehicles (EV) has been increasing. The most important reasons are environmental pollution caused by the density of cars in large residential centers, depletion of fossil fuels, the world's shortage of energy resources, advances in efficient and cost-effective electric motor and drive technology, improvements in batteries that store electrical energy and driving safety. One of the most important factors that provide energy efficiency in electric vehicles is the motor. The axial flux permanent magnet synchronous motor (AFPM), which is a dominant magnet in the field of motor, has many advantages over other types of motors. Since there is no excitation zone, the efficiency is higher due to the significant reduction of rotor losses. In addition, one of the major advantages of AFPM is the high power density. AFPM are also superior in terms of vibration and noise levels. Besides, they have an easily adjustable airgap. Its direct integration into the system is also important feature for use in EV. In this thesis, double rotor AFPM is designed and this motor is called as TORUS motor in literature. The most prominent feature of this motor is that it can produce high torque even at low speeds. In addition, their efficiency is higher than other motors.

In this study; information about AFPM and the optimization method used in the design of TORUS motor, which is a member of this motor class. TORUS motor design equations were removed, optimization, analysis, and production was carried out.

**Keywords:** TORUS 1, Optimization 2, Permanent Magnet Synchronous Motor 3, Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor 4, Genetic Algorithm 5, Partical Swarm Optimization 6.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                            | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Temel eksenel akılı motor şekilleri .....                                       | 10    |
| Şekil 3.2. Eksenel akılı motorların elektrikli araçta kullanımı .....                      | 11    |
| Şekil 3.3. Tek kenarlı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor .....                  | 12    |
| Şekil 3.4. Stator dengeli tek kenarlı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor .....   | 13    |
| Şekil 3.5. EASM yapıları (a,b) oluksuz ve oluklu TORUS, (c,d) oluksuz ve oluklu AFIR ..... | 13    |
| Şekil 3.6. EASM TORUS tip motorların akı yolları (a) TORUS NN, (b) TORUS NS.....           | 14    |
| Şekil 3.7. Çift statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor .....                | 14    |
| Şekil 3.8. Yüzey mıknatıslı rotor ve stator .....                                          | 15    |
| Şekil 3.9. Eksenel akılı motor türleri .....                                               | 16    |
| Şekil 4.1. Eksenel akılı motorun tasarım aşamaları.....                                    | 17    |
| Şekil 4.2. TORUS motor parametrelerinin sembolleri .....                                   | 18    |
| Şekil 4.3. Manyetik devre şeması.....                                                      | 21    |
| Şekil 4.4. TORUS motor eşdeğer devresi.....                                                | 24    |
| Şekil 4.5. TORUS motorun bir faz vektörel diyagramı .....                                  | 24    |
| Şekil 4.6. Optimizasyon faaliyetlerinin temel unsurları .....                              | 27    |
| Şekil 4.7. Komşu bireylerin birbiriyle etkileşimi .....                                    | 29    |
| Şekil 4.8. PSO algoritma akış şeması .....                                                 | 30    |
| Şekil 4.9. Genetik algoritmanın genel çalışma prensibi .....                               | 32    |
| Şekil 5.1. Rulo şeklindeki silisli sac .....                                               | 37    |
| Şekil 5.2. Stator sarım aparatı.....                                                       | 37    |
| Şekil 5.3. Sarılmış stator.....                                                            | 38    |
| Şekil 5.4. CNC ile oluk açma işlemi .....                                                  | 38    |
| Şekil 5.5. Sargıları sarılmış stator.....                                                  | 38    |
| Şekil 5.6. Mıknatıs.....                                                                   | 39    |
| Şekil 5.7. Rotor.....                                                                      | 39    |
| Şekil 5.8. Kafes içine sabitlenmiş stator.....                                             | 40    |
| Şekil 5.9. TORUS motor .....                                                               | 40    |
| Şekil 5.10. TORUS motor test düzeneği .....                                                | 41    |
| Şekil 6.1. TORUS motor 3D çizimi .....                                                     | 42    |
| Şekil 6.2. TORUS motor manyetik akı yoğunluğu.....                                         | 43    |
| Şekil 6.3. Mıknatıs manyetik akı yönü .....                                                | 43    |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.4.</b> Sargı akım yönleri .....                                 | 43 |
| <b>Şekil 6.5.</b> Motor akımlarının değişimi.....                          | 44 |
| <b>Şekil 6.6.</b> Motor moment değişimi .....                              | 44 |
| <b>Şekil 6.7.</b> Motor güç değişimi .....                                 | 45 |
| <b>Şekil 6.8.</b> Motor fazlarında endüklenen gerilimlerin değişimi .....  | 45 |
| <b>Şekil 6.9.</b> Motor hız değişimi .....                                 | 46 |
| <b>Şekil 6.10.</b> Motor verimi .....                                      | 46 |
| <b>Şekil 6.11.</b> Stator akımları değişimi .....                          | 47 |
| <b>Şekil 6.12.</b> Motor moment değişimi .....                             | 47 |
| <b>Şekil 6.13.</b> Motor güç değişimi .....                                | 48 |
| <b>Şekil 6.14.</b> Motor fazlarında endüklenen gerilimlerin değişimi ..... | 48 |
| <b>Şekil 6.15.</b> Motor hız değişimi .....                                | 49 |
| <b>Şekil 6.16.</b> Motor verimi .....                                      | 49 |
| <b>Şekil 6.17.</b> Motor akımları değişimi .....                           | 50 |
| <b>Şekil 6.18.</b> Motor moment değişimi .....                             | 50 |
| <b>Şekil 6.19.</b> Motor çıkış gücü değişimi .....                         | 51 |
| <b>Şekil 6.20.</b> Motor fazlarında endüklenen gerilim değişimi .....      | 51 |
| <b>Şekil 6.21.</b> Motor hız değişimi .....                                | 52 |
| <b>Şekil 6.22.</b> Motor verimi .....                                      | 52 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 4.1.</b> Optimizasyonda sabit alınan parametreler ..... | 34    |
| <b>Tablo 4.2.</b> TORUS motor optimizasyon sonuçları .....       | 36    |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                           |                                                                |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $D_i$                     | : Stator iç çapı                                               |
| $D_0$                     | : Stator dış çapı                                              |
| $\text{Lamda}$            | : Statorun dış çapı ile iç çapı arasındaki oran                |
| $D_{mo}$                  | : Mıknatıs dış çapı                                            |
| $h_b$                     | : Mıknatıs dış çapı ile rotor çapı arasındaki uzaklığın yarısı |
| $D_a$                     | : Motorun etkin çap uzunluğu                                   |
| $h_a$                     | : Mıknatıs iç çapı ile mil çapı arasında kalan uzunluk         |
| $D_{mi}$                  | : Mıknatıs iç çapı                                             |
| $h_m$                     | : Mıknatıs boyu                                                |
| $D_m$                     | : Mıknatıs çap uzunluğu                                        |
| $L_{rc}$                  | : Toplam rotor kalınlığı                                       |
| $L_m$                     | : Mıknatıs kalınlığı                                           |
| $L_r$                     | : Rotor kalınlığı                                              |
| $R_0$                     | : Rotor yarıçapı                                               |
| $h_d$                     | : Rotorun etkin çap uzunluğu                                   |
| $h_e$                     | : Stator yarıçapı                                              |
| $\tau_{p(\text{radyan})}$ | : Mıknatıs genişliği radyan cinsinden                          |
| $\tau_{p(\text{metre})}$  | : Mıknatıs genişliği metre cinsinden                           |
| $P$                       | : Kutup sayısı                                                 |
| $\Theta_{Di}$             | : Elektriksel derece                                           |
| $m$                       | : Faz sayısı                                                   |
| $\theta$                  | : Dağıtım faktörü                                              |
| $D_g$                     | : Motorun ortalama çapı                                        |
| $A_{slot}$                | : Slot alanı                                                   |
| $W_{sb}$                  | : Slot genişliği                                               |
| $W_{cuo}$                 | : Dış çaptan taşan sargı yüksekliği                            |
| $W_{cui}$                 | : İç çaptan taşan sargı yüksekliği                             |
| $K_{cu}$                  | : Bakır katsayısı                                              |
| $D_{in}$                  | : Motorun toplam dış çapı                                      |
| $\tau_m$                  | : Mıknatıs genişliği                                           |
| $\tau_p$                  | : Kutup adımı                                                  |
| $\tau_f$                  | : Mıknatıs arası mesafe                                        |
| $\alpha$                  | : Embrance                                                     |
| $A_{pm}$                  | : Mıknatıs alanı                                               |
| $\alpha_{pm}$             | : Mıknatıs açısı                                               |
| $N_{pm}$                  | : Oluk ve kutup kombinasyonuna bağlı değişen sabit sayı        |
| $A_g$                     | : Hava aralığı alanı                                           |
| $L_y$                     | : Stator boyunduruk uzunluğu                                   |
| $\tau_{si}$               | : Slot adımı                                                   |
| $W_{tbi}$                 | : Stator üst dış genişliği                                     |
| $L_{cs}$                  | : Stator boyu                                                  |
| $L_s$                     | : Toplam stator yüksekliği                                     |
| $g$                       | : Hava aralığı uzunluğu                                        |

|              |                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------|
| $W_s$        | : Oluk ağız açıklığı uzunluğu                   |
| $W_{ti}$     | : Stator dış diğ genişliği                      |
| $L_e$        | : Toplam yüksekliği                             |
| $B_{g0}$     | : Hava aralığı akı yoğunluğu                    |
| $B_r$        | : Mıknatıs manyetik akı yoğunluğu               |
| $B_{rc}$     | : Rotor akı yoğunluğu                           |
| $L_g$        | : Hava aralığı uzuluğu                          |
| $\mu_r$      | : Bağlı geçirgenlik                             |
| $\mu_0$      | : Ortamın geçirgenliği                          |
| $K_c$        | : Karter katsayısı                              |
| $R_g$        | : Hava aralığı relüktansı                       |
| $R_B$        | : Nüve boyunduruğu relüktansı                   |
| $R_N$        | : Nüve ayağı relüktansı                         |
| $F_{PM}$     | : Sabit mıknatısın manyeto motor kuvveti        |
| $F_I$        | : Sargı tarafından akıma bağlı üretilen mmk     |
| $H$          | : Manyetik alan şiddeti                         |
| $I_{top}$    | : Toplam akım                                   |
| $l_c$        | : Akının dolaştığı yol                          |
| $B$          | : Manyetik akı yoğunluğu                        |
| $B_{g1peak}$ | : Hava aralığı akı yoğunluğunun maksimum değeri |
| $B_m$        | : Mıknatısın akı yoğunluğu                      |
| $g_c$        | : Hava aralığının efektif değeri                |
| $X_{sd}$     | : d ekseni senkron reaktansı                    |
| $X_{ad}$     | : Endüvi sargısının oluşturduğu reaktans        |
| $X_l$        | : Kaçak reaktans                                |
| $X_{sq}$     | : q ekseni senkron reaktansı                    |
| $X_{aq}$     | : Endüvi sargısının oluşturduğu reaktans        |
| $V_l$        | : Gerilim eşiği                                 |
| $E_f$        | : Efektif gerilim                               |
| $I_a$        | : Endüvi akımı                                  |
| $R_l$        | : Toplam direnç                                 |
| $I_{ad}$     | : d ekseni endüvi akımı                         |
| $I_{aq}$     | : q ekseni endüvi akımı                         |
| $n_c$        | : Faz başına düşen sargı miktarı                |
| $c$          | : Her fazdaki kutup altına düşen oluk sayısıdır |
| $E_{peak}$   | : Maksimum gerilim                              |
| $I_{peak}$   | : Maksimum akım                                 |
| $N_{turn}$   | : Sipir sayısı                                  |
| $I_{rms}$    | : Akım (rms)                                    |
| $E_{rms}$    | : Gerilim (rms)                                 |
| $N_{ph}$     | : Oluk sayısının kutup sayısına oranı           |
| $q$          | : Faz başına düşen oluk sayısı                  |
| $n_s$        | : Oluk sayısının faz ve kutup sayısına oranı    |
| $K_d$        | : Sargı faktörü                                 |
| $K_s$        | : Eğrilik faktörü                               |
| $R_s$        | : Stator direnci                                |
| $R_{ph}$     | : Faz direnci                                   |

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| $EMF_{max}$ | : Maksimum elektro motor kuvveti |
| $I_{max}$   | : Maksimum akım                  |
| $P_h$       | : Histerisiz kaybı               |
| $K_h$       | : Histerisiz katsayısı           |
| $f$         | : Frekans                        |
| $P_c$       | : Eddy kaybı                     |
| $P_e$       | : Fazla çekirdek kaybı           |
| $K_e$       | : Çekirdek kaybı katsayısı       |
| $R_f$       | : Bakır direnci                  |
| $P_{cu}$    | : Bakır kaybı                    |
| $P_{co}$    | : Çekirdek kaybı                 |
| $P_{in}$    | : Giriş gücü                     |



## Kısaltmalar

---

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
| EASM   | : Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı                    |
| GA     | : Genetik Algoritma                                  |
| SEY    | : Sonlu Elemanlar Yöntemi                            |
| SEA    | : Sonlu Elemanlar Analizi                            |
| EASMSM | : Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor      |
| SMSM   | : Sabit Mıknatıslı Senkron Motor                     |
| SHA    | : Sonlu Hacim Analizi                                |
| EASG   | : Eksenel Akıllı Senkron Generatör                   |
| SM     | : Sabit Mıknatıs                                     |
| RAM    | : Radyal Akıllı Motor                                |
| EAM    | : Eksenel Akıllı Motor                               |
| EASMSJ | : Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörü |



# 1. GİRİŞ

Son çalışmalar neticesinde elektrikli araçlara olan ilginin artışıyla araştırmacıların elektrik motorlarında yenilikçi araştırmalara yönelme noktasında motivasyonunu arttırmaktadır. Elektrik motorları alanında önemli bir yere sahip olan sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) sınıfından olan Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (EASMSM), diğer motor türlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Uyarma alanına sahip olmadığından rotor kayıplarının önemli oranda azaltılması sebebiyle verimi daha yüksektir. Ayrıca eksenel akının en büyük avantajlarından birisi ise yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasıdır. Eksenel akıllı motorların diğer motor türlerine kıyasla kilogram başına düşen enerji (watt/kg) miktarı oldukça iyi seviyededir. Konvansiyonel radyal akıllı motorlara kıyasla daha az çekirdek malzemelerine gerek duymaktadırlar. EASMSM'nin diğer önemli bir özelliği ise titreşim ve gürültü seviyesinin diğer motor tiplerine kıyasla daha iyi bir seviyede olmasıdır. Ayrıca kolaylıkla ayarlanabilen hava aralığına sahiptirler. Ayrıca doğrudan sisteme entegre olabilmektedirler bu durum, elektrikli araçlarda kullanım açısından önemli bir özelliktir. Motor tasarımı bir kaç Watt değerinden MW'lar seviyesine kadar yapılabilir. EASMSM'nin çıkış gücü arttıkça, rotor yüzey bağlantısı ile şaft arasındaki oran azalmaktadır. Bu durum daha yüksek güçlerin tasarımını güçleştirmektedir. Ancak bu sorun da çoklu disk yapısı ile çözümlenmektedir.

Bu tezde, çift rotorlu EASMSM motor tasarlanacaktır bu motor literatürde TORUS motor olarak adlandırılmaktadır. TORUS motorun en belirgin özelliği düşük hızlarda bile yüksek moment üretebilmesidir. Ayrıca verimleri de diğer motorlara göre daha yüksektir. Ülkemiz elektrikli araç üretimi girişiminde bulunmaktadır. Yapılacak elektrikli aracın bileşenlerinin yerli ürün olması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda en verimli motorun tezde gerçekleştirilecek olan TORUS olduğu görülmektedir. Motor tasarımı tamamlandıktan sonra motor parametre değerleri değiştirilerek yeni bir tasarım kolayca yapılabilecektir. Bu nedenle tasarlanan motorun ülkemizde gerçekleşen elektrikli araç çalışmalarına da katkısı olabilecektir.

Bu çalışmada öncelikle seçilen TORUS motor hakkında literatür taraması yapılmıştır. Literatür taramasında elde edilen bilgiler ışığında TORUS motor için bir analitik model oluşturulmuştur ve bu model optimizasyon kodlarına dönüştürülerek optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmasının çıktıları Ansys Maxwell programı yardımıyla analiz edilerek doğrulanmış ve yaklaşık %92 doğruluk oranı elde edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması daha doğru sonuç vermesi için Ansys Maxwell programında da motor optimize edilmiştir. Elde edilen motor boyutları SolidWorks programı ile çizilmiştir. Tasarımı tamamlanan motor üretilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Mohammad Ardebili ve Narges Taran'ın yaptığı çalışmada düşük güçte bir Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörü (EASMSJ) çıkış gücü ve 1 kW ve 100 d / dak'lık nominal hız için verimlilik ve güç yoğunluğunun çok amaçlı optimizasyonu ortaya koymuştur. Öncelikle, farklı EASMSM topolojilerinin kısa bir incelemesi yapılmış ve mevcut uygulama için en uygun yapı olarak çift taraflı iç kanallı stator (TORUS-S) yapısını seçmişlerdir. Optimizasyon problemi genel boyutlandırma denklemleri kullanılarak formüle edilmiş ve daha sonra genetik algoritma kullanmışlardır. Yenilikçi olarak, bu çalışma, objektif işlevlerin önceliğini belirlemek için bir araç sunan özgün katkı olarak yeni bir en iyileme işlevi sunmaktadır. Bu kondisyon fonksiyonu, iki değişkeni içerir ve bunların her ikisinde de bir artış, objektif fonksiyonların birinde diğerinden daha fazla iyileşmeye yol açar. Bu yöntemin esası, özellikle rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörlerdeki objektif fonksiyonların önceliklendirilmesi gereken durumlarda özellikle hissedilir, bu da sadece yüksek bir verimlilik değil, aynı zamanda düşük bir ağırlık ve hacme de sahip olmalıdır. Son olarak, sonuçlar üç boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile doğrulanmışlardır [1].

Harold Saavedra ve arkadaşları ise beş fazlı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor tasarlamışlardır. Motorun geometrik, elektrik ve mekanik parametreleri EASMSM'ye dayalı yineleme yöntemi ile hesaplayarak Genetik Algoritma (GA) ile optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu optimizasyon işleminde güç yoğunluğu ve verim fonksiyonlarını dikkate alarak tasarım yapmışlardır [2].

Peter Virtic ve arkadaşları çekirdeksiz bir stator ve çift mıknatıslı dış rotorlu senkron makineyi, evrimsel optimizasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirmiştir. GA ve objektif analitik değerlendirme ile fonksiyonlar sekiz değişken geometri parametresi temelinde, beş maksimumu belirlemek için objektif fonksiyonlarla optimize edilmiştir. Hacim moment yoğunluğu ve ağırlık moment yoğunluğu, en küçük hacim ve Newton-metre başına kalıcı mıknatısların ağırlığı, minimum maliyete göre nominal moment için optimizasyon yapılmış ve bir prototip oluşturulmuştur [3].

Solmaz Kahourzade ve arkadaşları EASMSM'yi GA tabanlı boyutlandırma denklemleri Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve Sonlu Hacim Analizi (SHA) ile iki rotorlu senkron motorun ön tasarımını optimize etmişlerdir. GA'yı maksimum güç yoğunluğu ve en iyi ısı iletimi sonuçlarının iyileştirmek için kullanmışlardır [4].

Naghi Rostami ve arkadaşları eksenel akılı senkron generatör (EASG) için minimum malzeme ve maliyet durumu için en uygun tasarımı GA yardımıyla yapmışlardır. Daha sonra tasarımı doğrulamak amacıyla generatörün 3 boyutlu SEA'yı gerçekleştirmişlerdir [5].

Cristophe Versele ve arkadaşları bir elektrikli aracın 4 teker motorlarından birinin eş zamanlı olarak ağırlık ve güç kaybı açısından optimize edilmesi hakkında çalışmalar yapmışlardır [6].

B. Yousefi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 1.5 HP 50 V'luk EASMSM'nin tasarımını yapmışlardır. Bu tasarımı yaparken en iyi yapay zeka yöntemlerinden biri olan GA optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışma sonunda optimizasyon ve simülasyon sonucu karşılaştırılmış ve motorun güç yoğunluğunun  $m^3$  başına 0.355 watt olduğu gösterilmiştir [7].

Chang-Chou Hwang ve arkadaşları SEA dayanan dahili çekirdeksiz bir stator ve çift harici SM rotorlu eksenel akılı motoru tasarlamışlardır. Motorun maximum ortalama moment ve minimum ortalama moment için optimum tasarımını oluşturmuşlardır. Tasarım kriterlerini en az moment dalgalılık oranına göre en iyi kombinasyonu belirleyerek gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra optimize edilen motorun parametreleri ile 3D SEA ile elde edilen parametreler karşılaştırmış ve iki tarafın parametrelerinin uygun olduğunu görmüşlerdir [8].

M. Ardebili ve arkadaşları çift hava aralığı konfigürasyonuna sahip EASMSM'yi yüksek güç yoğunluğu elde etmek için tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu motorun tasarım denklemlerini incelemişlerdir. Ardından güç yoğunluğunu arttırmak amacıyla GA'ya dayalı optimum bir tasarım sunmuşlardır. Bu optimizasyonu göstermek için 2D SEA kullanılmış ve sonuçları yapılan çalışmada sunulmuştur. Optimizasyon tekniklerine dayanarak 1 kW, 48 V, 50 Hz, 4 kutup / 15 slotlu motoru tasarlayıp prototipini üretmişlerdir [9].

J.L. Hippolyte ve arkadaşları SMSM'nin tasarımını orjinal ve çok amaçlı bir optimizasyon tekniği kullanarak yapmışlardır. Yapılan çalışmada daha önceden geliştirilmiş algoritmaların daha da geliştirilmiş halini kullanmışlardır. Bu algoritmaların verimi deterministik bir algoritma (SQP) ve bir referans çok amaçlı genetik algoritma (NSGA-II) ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Sunulan algoritma ilk olarak literatürde bir slotsuz kalıcı mıknatıs makinesinin boyutlandırılması çalışma doğrultusunda doğrulanmıştır. Daha sonra kalıcı mıknatıslı bir motora uygulanan yöntemin deney sonuçları çok amaçlı bir bakış açısıyla vurgulanmıştır. Bu çalışmanın ilk amacı mevcut mesafe tabanlı değerlendirme fonksiyonu ile karşılaştırmak için algoritma içinde çok amaçlı bir rekabet sürecini tasarlamaktır. İkinci amacı, algoritmanın eşzamanlı olmayan özelliklerinden yararlanarak eşler arası bir ağ üzerinde dağılımıdır [10].

Richard Martin çalışmalarında, bir dizi yöntemin doğrulanmasını, karşılaştırılmasını ve EASMSM'nin tasarımı ve analizi için teknikler açıklamıştır. Kompakt motor jeneratör setleri ve teker içi motorlar için elektromanyetik analiz kullanımının odak noktası oluşturmuştur. Varsayımları değerlendirmek ve analitik yöntemlerin tahminlerini doğrulamak için SEA kullanmıştır. Çalışma yapılan makinelerin elektromanyetik performansını tahmin ederek, deneysel testlerin sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışma, Spooner ve Chalmers'ın TORUS motorun tasarımı ve analizi için bir dizi yöntem ve tekniğin türetilmesi, doğrulanması ve kıyaslanması ile başlamıştır. Geliştirilen yöntemler ve teknikler daha sonra araştırmayla genişletilmiştir. Analitik çözümleme,

SEA ve deneysel yaklaşımların tüm sonuçları alınarak motorlar için kıyaslamalar yapılmıştır. Son olarak, farklı kutup şekilleri ve daha büyük spesifikasyonları da kapsayan VAWT jeneratörlerinin daha fazla araştırmasını yapmışlardır. Ayrıca, yeni EASMSM'lerin güneş enerjisiyle çalışan arabalar için bir tekerlek motoru olarak deneysel testi yapmıştır. Bu çalışmada ele alınan EASMSM'lerin sadelik, ekonomik ve montaj kolaylığı olduğunu söylemiştir [11].

Christian DU-BAR yaptığı çalışmada, EASMSM'nin analitik tasarımını ve SEY ile tasarımını birleştirmiştir. İlk etapta bu çalışmada iki farklı topolojinin dört farklı varyasyonu (iç rotor çift stator ve dahili stator çift rotor) gereksinimlere en uygun olanı ile karşılaştırılmış ve çok küçük yapısı nedeniyle stator çekirdeği oluklu olan çift rotorlu motor (YASA) seçilmiştir. Motor kutbu belirlenerek elektromanyetik tasarım optimizasyonu oluşturulmuştur. Malzeme seçimi yapılarak SEY ile analizi gerçekleştirilmiştir. En son moment hız karakteristiği incelenmiş, tasarım değerlendirmiş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunmuştur [12].

Yee Pien Yang ve Guan Yu Shih dört tekerlekten çekişli bir elektrikli araç için bir EASM motorun en uygun tasarımı üzerine çalışmalar yapmış ve önerilerde bulunmuşlardır. 3D manyetik devre modelini motoru boyutlandırmak ve optimize etmek için kullanmışlardır. Ön tasarım için sistematik optimal tasarım SEY yöntemi ile aynı çıkmıştır. Enerji verimliliği optimize edilerek %15 daha verimli hale getirilmiştir. Son olarak su soğutma kanalı operasyon sırasında suyun dağıtılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, sıcaklık tepkisi ve kararlı durum sıcaklık dağılımları araştırılmış ve önerilen motorun sürekli bir sürüş modu için güvenli bir şekilde çalıştırılabileceğini kanıtlamışlardır [13].

Pavani Gottipati çalışmasında özellikle elektrikli araçlarda teker içi motor uygulamaları için eksenel akılı ve radyal akılı kalıcı mıknatıslı fırçasız motorların karşılaştırılması için ekspres bir yöntem geliştirmiş ve uygulama yapmıştır. 3D sonlu elemanlar yöntemi ile Maxwell programında simülasyon çalışması yapmıştır [14].

Amin Mahmoudi ve arkadaşları çift rotorlu eksenel akılı kalıcı mıknatıslı motorlarda iki farklı topoloji olan TORUS ve AFIR arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Bu motorların oluklu ve oluksuz tipleri incelenmiştir. SEA'yı kullanmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda TORUS motor yüksek akım yoğunluğunda ve düşük elektrik yükünde yüksek güç yoğunluğu göstermektedir. AFIR motor düşük akım yoğunluğunda ve düşük elektrik yükünde yüksek güç yoğunluğunu göstermektedir. Oluksuz TORUS ve AFIR EASM makineleri oluklu modellerine göre daha düşük moment ve daha düşük dalgalanma momentine sahip olduğunu söylemişlerdir [15].

S. Huang ve arkadaşları radyal akılı motorlar (RAM) ve eksenel akılı motorlar (EAM) hakkında araştırma yapmışlar. Araştırmalar sonunda 200 HP, 6 kutuplu 1200 dev/dak hızındaki motorun güç/moment yoğunluğunu, verimini, ısı yayılımını, ağırlık ve kullanım faktörleri açısından analizlerini gerçekleştirerek EASMSM motor üretmişlerdir. Oluklu ve oluksuz TORUS

topolojilerinin diğeryadyal ve eksenel akı topolojilerinden daha yüksek güç veya moment yoğunluk oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir [16].

Khwaja M. Rahman ve arkadaşları elektrikli araçlar için özel olarak EASMSM tasarlamış aynı zamanda bu motorun termal performansını arttırmak amacıyla soğutucu sistemini de tasarlayarak patent almışlardır. Motor üretimini gerçekleştirerek motor test sürüşlerinde 1000 milden daha fazla hızla sürülmüştür ve mükemmel bir performans göstermiştir. Bu çalışmada tartışılan tekerlek motoru tahrikinin ölçülen performansları, sistem gereksinimleri tarafından belirlenen tasarım şartlarını karşılamıştır. Böylece EASMSM'nin doğrudan tahrikli otomotiv uygulamaları için güçlü adaylar olarak görülmesi gerektiğini doğrulamışlardır [17].

M. Aydın ve arkadaşları eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motorlar üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. EASMSM'nin temel farklılıkları üzerinde durarak bu konuda ayrıntılı ve eksiksiz bir referans bölümü oluşturmuşlardır [18].

Mariusz Jagiela ve arkadaşları, çıkıntılı kutuplu yeni bir disk tipi tek fazlı sabit mıknatıslı motor üzerine çalışmışlardır. Rotor diskindeki mıknatısların belirli bir konfigürasyona göre düzenleyerek motor vuruşmomentini düzeltmişlerdir. Aynı zamanda mevcut dalga biçimini değiştirerek sabit ve yumuşak bir moment üretebilmişlerdir. Gerekli akım dalga biçimini belirlemek için 3 boyutlu SEA'yı kullanmışlardır [19].

Metin Aydın ve arkadaşları oluklu ve oluksuz TORUS motor üzerine çalışmışlardır. TORUS motorun mıknatıslarını eğimli hale getirerek ve sargı yapısını değiştirerek makineleri moment kalitesi açısından karşılaştırmışlardır. SEA ve 3D analizlerini gerçekleştirmişlerdir [20].

J.W.K.K. Jayasundaral ve arkadaşları günümüzde elektrikli araç gereksinimini ve bu araçların motorundan beklenen kriterleri araştırmışlardır ve bu kriterlere en uygun olarak düşündükleri NS tipi TORUS motoru tasarlamışlardır [21].

DENG Qiu-ling ve ekibi elektrikli araç motorları üzerine araştırmalar yapmışlardır. Araçlar için en uygun motorun EASM motorlar olduğunu belirlemişlerdir. 6.8 KW'lık EASM motorun elektromanyetik tasarımını analitik yöntem kullanılarak gerçekleştirmişler ve SEY ile doğrulamışlardır [22].

Amin Mahmoudi ve arkadaşları EASMSM optimize edilmiş tasarımını, performans analizi ve motor yüklü durumdayken motorun ısı analizini gerçekleştirmişlerdir [23].

Florence Libert tez çalışmasında atık su arıtımında kullanılan mikser için 4.4 kW ve 50 rpm hızında EASM TORUS motorunun tasarımını yapmıştır. Motorun tasarımı, SEY analizi ve simülasyon sonuçlarına bağlı kalınmıştır. EASMSM'nin sargıları üzerinde gerekli çalışmaları yaparak konsantre sargı kullanmıştır. Tasarladığı motor diğer benzerlerine kıyasla yaklaşık %50 oranında daha hafif olmuştur [24].

Thales A. C. Maia ve arkadaşları yenilenebilir enerji kaynakları hakkında araştırma yapmışlardır. Bu araştırmalar sonucunda rüzgâr enerjisi üzerine yoğunlaşarak TORUS generatör tasarlanmıştır. Motor tasarım aşamalarında optimizasyon ve termal analiz yapmışlardır [26].

Neethu S. ve arkadaşları kan pompası uygulaması için sabit mıknatıslı EASMSM'nin optimal tasarımını ve tasarımın geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Motorun 3D Sonlu Elemanlar Analizini gerçekleştirmişlerdir [26].

M. Fasil ve arkadaşları iki tekerlekli bir araç için çekiş motorunu tasarlamışlardır. Motor türü olarak eksenel akılı sabit mıknatıslı fırçasız dc motor seçmişlerdir. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmaların sentezi yapılmış ve tasarlanacak motor için SEA gerçekleştirilmiştir [27].

S. Asghar Gholamian ve arkadaşları EASMSM için iki topoloji olduğundan bahsetmişlerdir. Bunlar oluklu ve oluksuz statorlu olan motor tipleridir. Motor boyutları denklemlerle belirlenerek oluklu ve oluksuz olan motor tipleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yüksek güçlü oluklu olmayan EASMSM anlatılmıştır [28-29].

Surong Huang ve arkadaşları çalışmalarında moment kalite değerlendirmesi ve optimizasyon yöntemlerini sunmaktadırlar. Titreşimli moment analizi için genel elektromanyetik moment denklemi ve elektromanyetik moment analizi yapmışlardır. Analizlere dayanarak, minimum moment dalgalanması için optimum tasarım sağlanabileceğini söylemişlerdir. Öte yandan, vuruntu momentinin, oluklu olmayan yapı kullanılarak düzeltilebildiğini anlatmışlardır. Oluksuz TORUS makinası, çalışmadaki moment dalgalanmalarının en aza indirilmesi için örnek bir uygulama olarak kullanılır. Ayrıca, hem oluklu hem de oluklusuz motorlarda yüzeye monte edilmiş sabit mıknatıslı TORUS tipi motorun yapısında, 2D ve 3D SEA, AFIR titreşim momentleri, dalgalanma momentleri ve sarkma momentlerindeki öngörü için TORUS yapısı ve RFSM tip yapıları incelenmiştir. Her ikisinden elde edilen sonuçlar çalışmada TRF analizi ve 2D / 3D SEA ile gösterilmiştir [30-31].

David A. Howey yaptığı tez çalışmasında, EASMSM termal analizi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Tez çalışmasında doğru termal analizi gerçekleştirmek için maksimum güç yoğunluğunu doğru tahmin etmenin önemli olduğuna değinmiştir. Stator konvektif ısı transferinin en önemli ve en az araştırılan ısı transfer mekanizmalarından biri olduğunu ve bu nedenle mevcut çalışmanın odak noktası olduğunu anlatarak, bu konu hakkında çalışmaları gerçekleştirmiştir. Çalışmalarını analizlerle desteklemiştir [32].

Rong-Jie Wang tez çalışmasında hava soğutmalı EASM jeneratörünün, demirsiz bir stator ile tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çok boyutlu bir optimizasyon prosedüründe SEA çözümünü doğrudan birleştiren bir tasarım yaklaşımı geliştirmiş ve 300 kW 'lık (birleşik güç faktörü) EASMSJ tasarım optimizasyonuna uygulamıştır. Makinenin genel tasarım optimizasyonunu sağlamak için soğutma kapasitesi, mekanik mukavemet ve eddy kaybı gibi farklı tasarım özellikleri de bu araştırmada incelemiştir [33].

Jacek F.Gieras ve arkadaşları EASMSM üzerine çalışma yapmışlardır. EASMSM'lerin güç yoğunluğu diğer motorlara göre daha fazla olduğu konusuna değinmişlerdir. Bu motorların hangi alanlarda kullanıldığı hakkında bilgi toplamış ve bunu paylaşmışlardır. 2.7 kW' lık EASMSM tasarlayarak üretimini gerçekleştirmişlerdir [34].

Serdal Arslan ve arkadaşları EASMSM'ler hakkında bilgiler vererek 12 kutuplu, 1.5 kW lık bir TORUS motor tasarlamışlardır. Ağırlık, güç yoğunluğunun ve verim parametrelerini ele alarak TORUS tipi motorun optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sonucunda verimi sabit tutularak ilk tasarıma kıyasla motor ağırlığı % 4.8, motor gücü %27.4 oranında artmıştır [35].

Reza Mirzahosseini ve ekibi EASMSM'ler hakkında literatür taraması yapmışlardır ve literatürde TORUS NS motorunun tasarım ve performans iyileştirilmesi alanında bir çok çalışma yapılmış olduğunu belirtmişlerdir. Ancak literatürde performans karakteristiklerine ilişkin frekans, kutup çifti sayısı ve besleme voltajını seçmek için hiçbir analitik formülün sunulmadığını göstermişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada, bu üç parametrenin TORUS NS motorunun performans özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak ve tasarım sürecinin başında optimum seçim yapabilmek için analitik bir formül sunmuşlardır. Önce TORUS NS motorunun yapısı tanıtılmış ve çalışması ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Daha sonra, önceki referanslarda sunulan boyutlandırma denklemlerinin yardımıyla frekans, kutup çifti sayısı ve besleme voltajının TORUS NS motorunun performans özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için bir algoritma önermektedirler. Önerilen algoritma kullanılarak birkaç motor tasarlanmış ve frekans, kutup çifti sayısı, güç kaynağı gerilimi ve motor çıkış gücünün motorların verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Daha sonra motoru üreterek test etmişlerdir. Test sonucu ile denklem sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İki sonuç arasındaki fark %4'ün altındadır. Dolayısıyla denklemlerinin diğer motor tasarımlarında rahatlıkla kullanılabileceğini söylemişlerdir [36].

E. J. Hubmann ve arkadaşları kalp rahatsızlığında kullanılan kan pompası için elektrik motor türlerini verimlilik ve güç yoğunluğu açısından optimize ederek en verimli EASMSM'yi seçmişlerdir [37].

L. A. J. Friedrich ve arkadaşları tek taraflı eksenel akılı motor, motorun oluklu çekirdek yapısının modellenmesi ve tasarımı ile ilgili çalışmışlardır. Stator hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak ve yüksek dönme hızlarında meydana gelen girdap akımı kayıplarını en aza indirmek için motor özel olarak tasarlanmıştır. Stator oluklarının girdap akımına etkisi incelenmiş ve girdap akımını azaltıcı ve verimi arttırıcı yönde bir optimizasyon gerçekleştirmişlerdir [38].

Jianfei Zhao ve arkadaşları çift statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motorun tasarımını ve detaylı analizini gerçekleştirmişlerdir. Motorun titreşimini ve vuru momentini azaltmak için statoru oluklu olarak tasarlamışlardır. Öncelikle analitik bir algoritma üzerinde motor tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra algoritmanın doğruluğunu kanıtlamak için 3D

analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçları ile tasarlanan motorun güvenilir bir şekilde çalışacağı gösterilmiştir [39].

Wei Le ve arkadaşları segmentli mıknatıslara sahip olan eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motorun optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Moment dalgalanmasını azaltmak ve çıkış momentini arttırmak için GA kullanmışlardır. Optimizasyon sonucunu doğrulamak içinde SEA yapmışlardır [40].

Literatür taramasında da görüldüğü gibi yapılan çalışmada da diğer EASMSM'lere kıyasla daha yüksek verimli olduğu düşünölen TORUS motor tasarlanarak optimizasyonu, elektromanyetik analizi ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Literatür taramasında da görüldüğü gibi motor optimizasyon çalışmalarında GA ağırlıklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında literatüre katkı sağlaması açısından GA'ya ek olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) da gerçekleştirilmiştir. TORUS motorun moment dalgalanması sorununda literatürde açık bir şekilde görölmektedir. Bu sorunun çözölmesi için literatürde de bahsedilen yöntemlerden biri olan mıknatıs kaydırma işlemi uygulanarak üretimi gerçekleştirilmiştir.

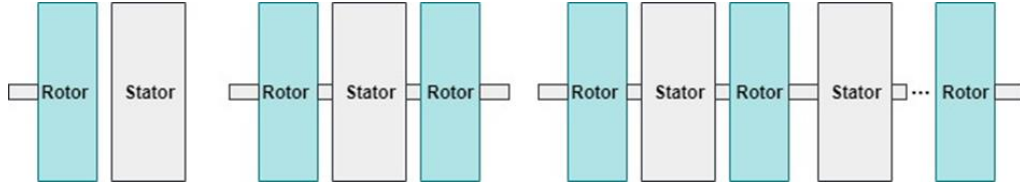
### 3. EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI SENKRON MOTORLARA GENEL BAKIŞ

Eksenel akılı motorların (EAM) üretimi oldukça eski zamanlara dayanmaktadır. EAM ilk örneği 1831 yılında M. Faraday'ın disk tipi olarak ürettiği bir EAM'dir. Sonrasındaki dönemlerde ise N. Tesla'nın 1889 yılında eksenel akılı motor tipinde patentlerine rastlanmaktadır [41]. EAM'ler bu kadar eski zamanlarda keşfedilmesine rağmen radyal akılı motorlara (RAM) göre zayıf özellikleri bulunmasından dolayı kullanım alanı bulamamıştır. Bu zayıf özellikler, stator ve rotor arasındaki güçlü eksenel manyetik çekim kuvveti, fabrikasyon zorlukları ve hava aralığını sabit tutmadaki zorluklar olarak sıralanabilmektedir. Sabit mıknatıslı motorlar M. Faraday tarafından 1830 yılında keşfedilmiş olmasına rağmen o dönemlerdeki zayıf manyetik özellikler sabit mıknatıslı motorlar için uygun değildi. 1931 yılında alnico'nun, 1950'de baryum ferrit'in, ve en önemlisi 1983 yılında neodyum-demir-bor (NdFeB) sürekli mıknatıs türünün keşfi sabit mıknatıslı motorları tekrardan gündeme getirmiştir. Bu yıllardan sonra SMSM teknolojisi iyi bir ivme kazanmıştır. NdFeB mıknatıs yüksek enerji seviyesine sahiptir. Bu mıknatıs SMSM ve EAM için yeni bir başlangıç olmuştur. İlerleyen zamanlarda sabit mıknatısların gelişimi yeni manyetik malzeme keşifleri ve mıknatıs küresel düzeyde ucuzlaması eksenel akılı motorların kullanılma oranını arttıracaktır. Ancak neodyum rezervlerinin sadece birkaç ülkenin elinde olması sabit mıknatıslı motorlar için önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

RAM pazara hakim olması nedeniyle, sabit mıknatıslı motorlar ilk olarak geleneksel tipte araştırılmaya başlanmıştır. 1990' lı yılların sonundan itibaren eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar gelişmeye başlamıştır. Literatürde de yaklaşık otuz yıldır eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda elektrikli araçlarda olan ilerlemeler eksenel akılı motorları tekrar popüler hale getirmiştir. Son yıllardaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak EASMSM'ler gelecek vadeden bir motor türü olarak öne çıkmaktadır.

#### 3.1. Eksenel Akılı Motorlar

Kullanım alanlarına göre çeşitli türlerde eksenel akılı sabit mıknatıslı motor çeşitleri mevcuttur. Şekil 3.1.'de en temel EASMSM şekilleri gösterilmiştir. EASMSM'ler 4 farklı şekilde üretilirler. Bunlar; tek stator tek rotorlu, tek stator iki rotorlu, iki stator tek rotorlu, çok stator çok rotorlu yapılarıdır. Bu tezde üzerine çalışılan motor iki rotorlu tek statorlu oluklu TORUS NN tip motordur.



**Şekil 3.1.** Temel eksenel akılı motor şekilleri

### 3.2. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Avantaj ve Dezavantajları

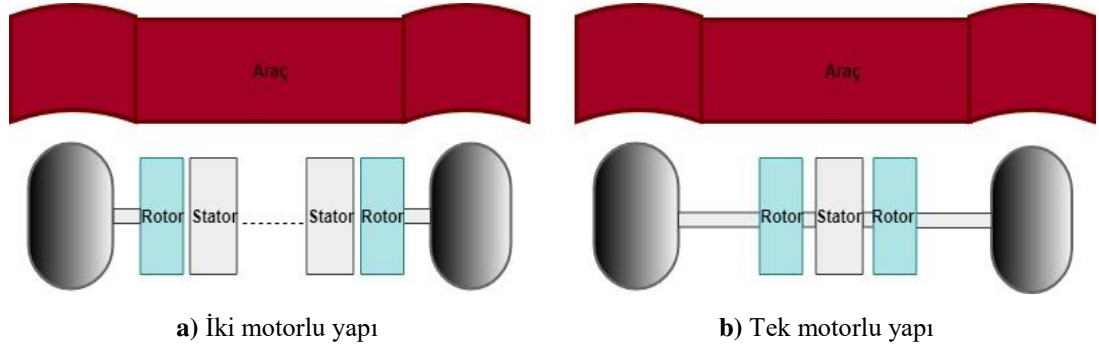
EASMSM'ler radyal akılı motorlara göre avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- EASMSM rotor sargılarının olmamasından dolayı verimleri diğer tip motorlardan daha yüksektir. Yani bu motorda birim hacimde üretilen güç moment ve verim daha yüksek olur.
- Bu tip motorların başka bir önemli avantajı ise geometrik kısıtlamalara uygun olmasıdır. Yani elektrik motorunun küçük hacimli olması gereken uygulama alanlarında kullanımı, diğer standart elektrik motorlarına kıyasla daha uygundur. Çünkü standart motorlarda stator ve rotor birbiri içinde eksenel olarak uzunlamasına yerleştiği için daha büyük bir hacim gereklidir. Ancak EASMSM'nin Şekil 3.2 'den de görüldüğü gibi eksenel uzunlukları kısa olduğu için çalışma hacimleri daha küçüktür. Zaten uygulama alanları da bu özelliği sayesinde genişlemiştir [42].
- Hacimleri küçük olduğundan dolayı diğer tipteki elektrik motorlarına kıyasla daha hafiftir.
- Bu tip motorlarda hava aralığı motorun yapısından dolayı rahatlıkla ayarlanabilir.
- Termal avantaja sahip motorlardır. Çünkü rotor diskleri doğal fanlar gibi hareket ederler ve stator sargılarının soğumasını sağlarlar [43],[44].
- Titreşim ve gürültü seviyeleri SMSM motorlara kıyasla daha azdır [45].
- EASMSM'lerin en büyük dezavantajı ise üretim zorluklarıdır.
- EASMSM'lerin mıknatıs boyutları büyük olduğundan dolayı diğer motorlara kıyasla maliyeti daha yüksektir.

### 3.3. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Kullanım Alanları

Bölüm 3.2'de de anlatıldığı gibi birçok avantaja sahip olduğundan dolayı EASMSM'lerin kullanım alanları oldukça geniştir. Bu tip motorların uygulama alanlarından birisi olan elektrikli araç uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrikli araç uygulamalarında motorun kullanımına aşağıdaki örnek verilebilir. Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi EAM'ler elektrikli aracın tekerleklerinin hemen içerisine yerleştirilir ve tekerlekler sürülür. Her bir tekerleğin yanına stator-

rotor çifti konularak iki eksenel akıllı motor ile sürüleceği gibi tek eksenel akıllı motor tekerleğin orta noktasına konumlandırılarak bir çift tekerlek içinde kullanılabilir. Motor ile tekerlek arasında bir dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.



Şekil 3.2. Eksenel akıllı motorların elektrikli araçta kullanımı

Bu tip motorlar sadece büyük elektrikli taşıtlarda değil aynı zamanda elektrikli bisikletlerde de kullanılmaktadır. Bu motorun bisiklet tekerleklerinin ortasına yerleştirilmesi durumunda, standart motordan daha az yer kaplayarak daha kompakt bir yapı sağlar. Dolayısıyla da bisiklet daha hafif olduğu için rahatça kullanılabilir.

### 3.4. Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı ve Çeşitleri

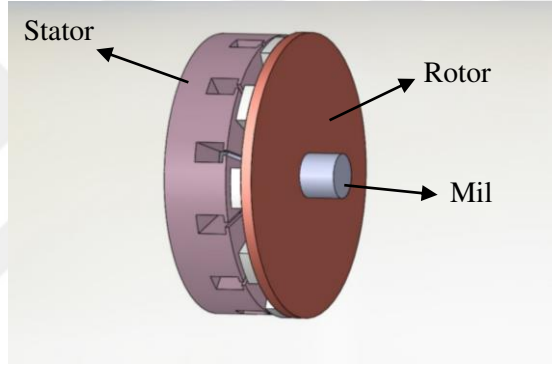
EAM'lerde akı doğrudan eksenel olarak hava boşluğundan geçer. Genellikle rotor disk stator ise halka yapıdadır. Moment üreten aktif parça statorun iç çapı ile dış çapı arasındaki radyal uzaklıktaki bölümdür. Bu motorda radyal aktif parça değiştirilmeden yani motorun iç çapı ve dış çapı değiştirilmeden kutup sayısı artırılabilir. Bu durumda motorun güç yoğunluğu artar. Bu nedenle EAM'ler düşük hızlarda bile yüksek moment üretebilirler. EAM'ler mıknatısların bulunduğu rotor diski ve sargıların bulunduğu statordan oluşur. EAM'ler genel olarak; stator ve rotor düzenine ve sayılarına, mıknatısların yerleştiriliş biçimlerine ve oluk yapılarına göre isimlendirilirler [46,47].

- **Stator ve Rotor düzenine göre;**
  - a) Tek kenarlı yapılar
  - b) Çift kenarlı yapılar
  - c) Multi – Disk yapılar
- **Mıknatısların rotordaki konumuna göre;**
  - a) İç gömülü sabit mıknatıs
  - b) Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıs

- Olukların varlığına göre;
  - a) Oluksuz sabit mıknatıslı
  - b) Oluklu sabit mıknatıslı

#### 3.4.1. Tek Kenar Yapılı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

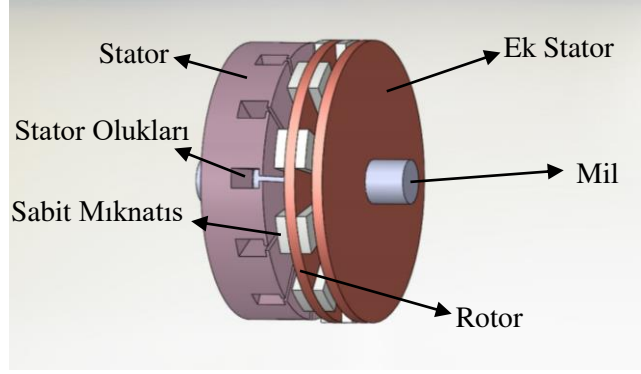
Tek kenar yapısına sahip EASMSM kendi topolojisi içinde en basit yapıya sahip motorlardır ve motor kapasiteleri düşüktür. Şekil 3.3 te görüldüğü gibi bir lamineli stator ve bir yüzey yerleştirmeli mıknatıs yapısına sahip motordan oluşmaktadır. Endüstride yaygın kullanıma sahip değildir. Çoğunlukla asansör sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip motorlarda mıknatıs tarafından oluşturulan akı mıknatısın kuzey kutbundan statora girer, dairesel olarak bir kutup boyunca statorda ilerler ve mıknatısın güney kutbuna geçip rotor diski üzerinden devresini tamamlar [48],[49].



Şekil 3.3. Tek kenarlı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor

#### 3.4.2. Stator Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu tür motorlar bir rotor bir statordan oluşmaktadır. Bu motorda stator ve rotor arasında büyük bir çekme kuvveti oluşur. SMSM’lerde normalde bilezik kullanılmaz ancak EASMSM’lerde eksenel yöndeki hareketten rotörü korumak için özel yapıda bilezikler kullanılır. Bu motor tipinde motora ek stator eklenerek çekme kuvveti dengelenebilmektedir. Rotorun karşı kısmı üzerinde, denge kuvvetini indüklemek için manyetik alan üretilmesinden dolayı sabit mıknatıslara gerek duyulmaktadır. Manyetik alan, histerisiz ve eddy kayıplarını dalgalandıracığından dolayı stator lamine edilir. Akı yüzeyi dikkatlice tasarlandığında, rotor ve ek stator arasında üretilen kuvvet, rotor ve makinenin statoru arasındaki kuvveti dengeler [50]. Şekil 3.4’de motor yapısı gösterilmektedir.



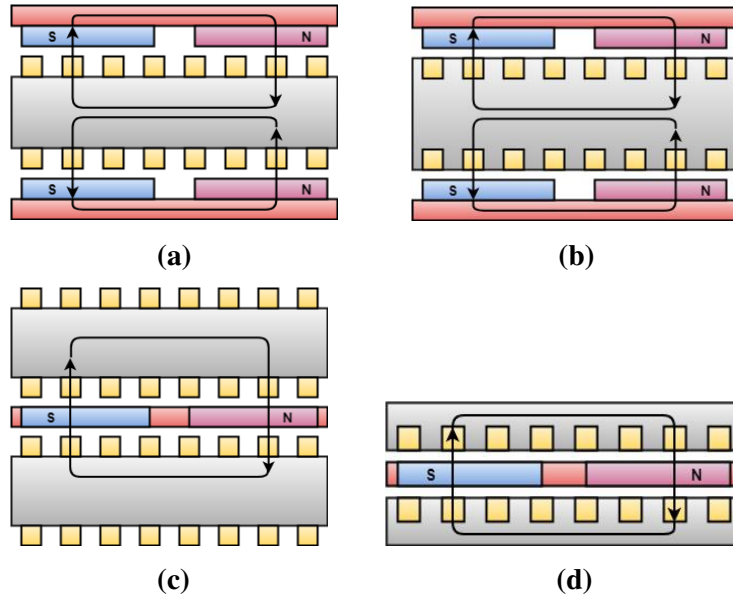
**Şekil 3.4.** Stator dengeli tek kenarlı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor

#### 3.4.3. Rotor Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

Yapı olarak stator dengeli tek kenarlı EASMSM'lere benzetilmektedir. Sadece burada çekme kuvveti dengesi, ek stator yerine ek yüzey mıknatıslı rotor eklenerek sağlanır. Bu yapıya sahip makinalarda stator dengeli motorlara göre daha fazla malzeme kullanılır.

#### 3.4.4. Çift Kenar Yapısına Sahip Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

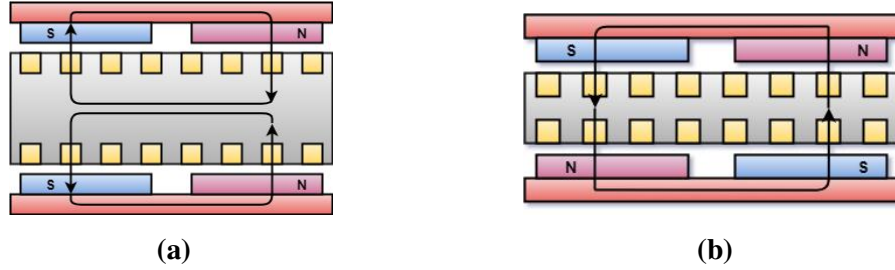
Bu yapılar tek kenarlı EASMSM'lere göre daha avantajlıdır ayrıca moment kalitesi ve yoğunluğu da daha iyidir [51]. Bu yapıya ait EASMSM tipleri Şekil 3.5 'de verilmiştir.



**Şekil 3.5.** EASM yapıları (a,b) oluksuz ve oluklu TORUS, (c,d) oluksuz ve oluklu AFIR

AFIR olarak adlandırılan makina iç rotor dış stator, TORUS olarak adlandırılan makine iç stator dış rotor yapısındadır. Çalışmamızda TORUS tip EASMSM kullanılmıştır. Bu motor

mıknatısların yerleşimine göre TORUS-NS ve TORUS NN olarak isimlendirilir [52],[53]. Çalışmamızda kullanılan motor, Şekil 3.6 a’da görülen TORUS-NN yapısındadır.

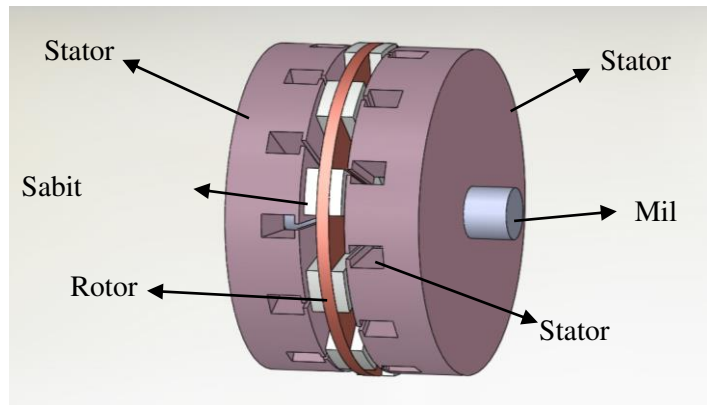


**Şekil 3.6.** EASM TORUS tip motorların akı yolları (a) TORUS NN, (b) TORUS NS

NS tip TORUS motorlar diğer motorlara göre yüksek verim ve güç yoğunluğu oranına sahiptir. Ayrıca moment yoğunluğu bakımından da bu motorlar diğerlerine göre daha yüksek değerler vermektedirler. NN tip TORUS motorlar, NS tip TORUS motorlardan sonra en yüksek verimlilik, güç yoğunluğu ve moment yoğunluğuna sahiptir. AFIR tip motorlarda stator sargı sonlarının fazla olmasından dolayı verimliliği biraz düşer. Ayrıca bakır kayıpları da artar. Bunun yanında rotor yapılarındaki nüvenin daha az olması sayesinde ağırlık bakımından daha hafif olması sağlamıştır [54].

#### 3.4.5. Çift Stator Oluklu Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu motor tipinin kesiti Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Şekil olarak benzerliğinden dolayı bu motorlar pancake motor olarak da adlandırılırlar. İki dış statora ve bir iç rotora sahiptir. Mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirmeli veya içe gömülü olabilir. Stator demir nüvesi radyal yönde lamine edilir ve konik dişli, sabit oluk aralığına sahip eş merkezli halkalara benzer.



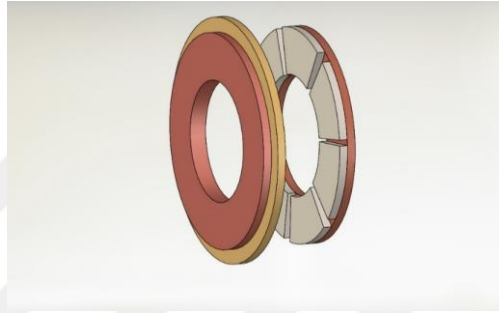
**Şekil 3.7.** Çift statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motor

### 3.4.6. Çift Rotor Oluklu Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

Yapı olarak çift statorlu oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motora benzer. Sadece bir stator iki rotora sahiptir. Stator iki rotor arasına yerleştirilmiştir. Rotor boyunduruğu üzerinde demir kısma akı yoğunluğu için ihtiyaç duyulur. Fakat stator boyunduruğu elimine edilebilir.

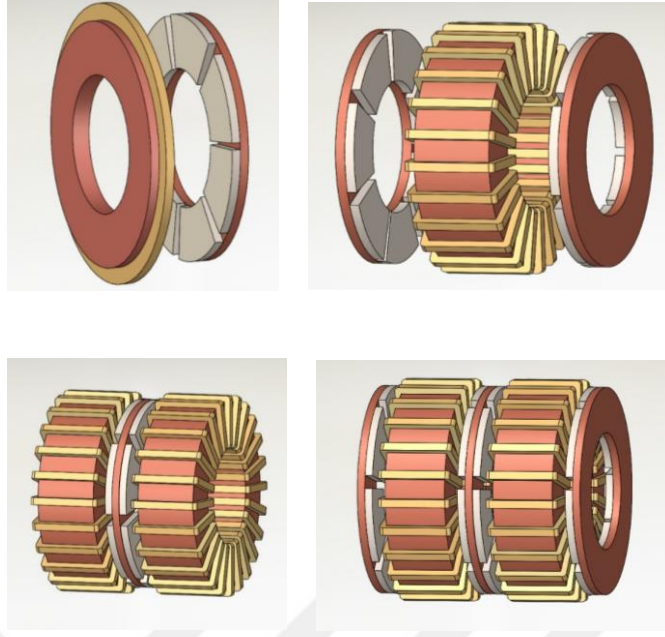
### 3.4.7. Eksenel Akılı Motorlarda Rotor ve Stator Yapıları

EASMSM'lerde rotor diskleri som demirden yapılır. Bir tarafına Şekil 3.8'de gri renkli görülen mıknatıslar özel bir yapıştırıcı ile yapıştırılır veya vidalanır. Ancak uygun tasarım ölçütlerinden dolayı mıknatısların kenarları birbirine paralel olacak şekilde de yapılabilir.



Şekil 3.8. Yüzey mıknatıslı rotor ve stator

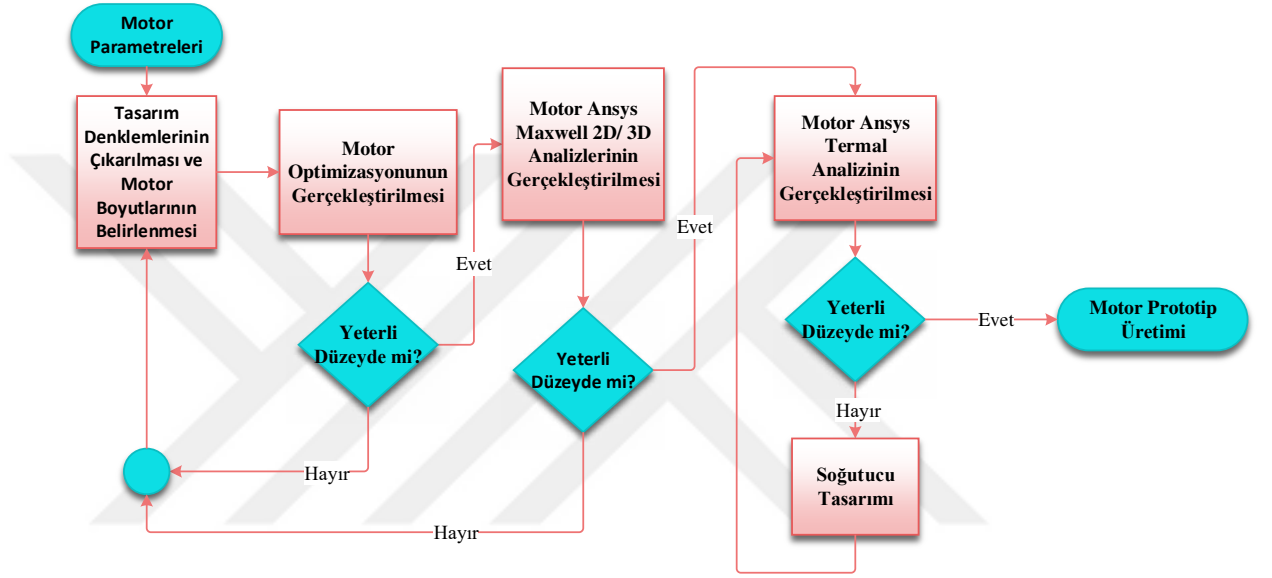
Motorun statoru, spiral bir tarzda sarılmış lamine demir tabakasıyla oluşturulur. Farklı tür stator ve rotor yapıları Şekil 3.9'da görülmektedir. Bu yapıda lamine tarzda sarılmış stator oluk yapısı tamamen açık olarak tasarlanır ve sargının bu olukların içine yerleştirilmesi sağlanır. Tez çalışmasında üzerine çalışılan EASMSM de açık oluk yapısına sahiptir. Oluk açma işlemi bu tip statorlar için masraflı ve oldukça zor bir iştir. Stator sacının kesiminde büyük problemler yaşanabilir. Eğer çok hassas olarak kesilmezse lamineler arasında kısa devreler oluşabilir. Ayrıca düzgün olmayan oluk yüzeyi oluk izolasyonuna zarar verebilir. Bunlardan dolayı çok hassas lazer kesim makineleri tarafından kesimler yapılmalıdır. Ancak bu yöntem stator üretmek için pahalı bir yöntemdir. Diğer bir yöntemde belirli bir kalıpta statoru oluşturmaktır. Stator oluklarıyla beraber oluşturduktan sonra, oluklar yalıtım malzemesi ile kaplanır. Daha sonra da sargılar stator olukları arasını çevreleyecek şekilde sarılır. Yine zahmetli işlemlerle sargılar olukun içerisine yerleştirilir. Sonrasında bunlara epoxy reçinesi emdirilir ve stator yapım işlemi bitirilmiş olur. Bu şekilde sargıları ile beraber oluklu bir stator oluşturulmuş olur.



Şekil 3.9. Eksenel akılı motor türleri

## 4. MATERYAL VE METOT

EASMSM'lerin tasarım aşamaları SMSM'lerin tasarım aşamaları ile aynıdır. Diğer motor tiplerinde olduğu gibi boyut denklemleri ile başlamaktadır. Tasarlanacak olan motorun çalışacağı değerler belirlenerek motorun ön boyutları belirlenir. Tasarım kriterleri arasında motor gücü, çalışacağı hızlar, istenen verim ve maliyet gibi birçok parametre düşünülmesi gerekmektedir. Şekil 4.1'de eksenel akılı motor tasarım aşamaları görülmektedir.

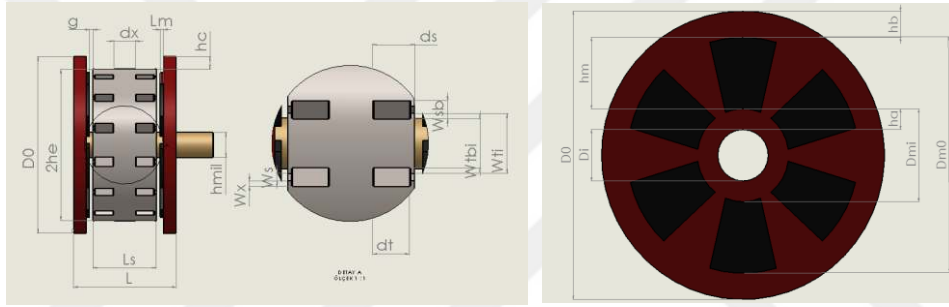


Şekil 4.1. Eksenel akılı motorun tasarım aşamaları

Gelen tasarım bilgileri doğrultusunda analitik tasarım denklemleri çıkarılır. Bu denklemler üç başlıkta incelenir bunlar; boyut denklemleri, manyetik devre denklemleri ve elektriksel devre denklemleridir. Çıkarılan denklemler sonucunda bir model oluşturulur, oluşturulan model üzerinden kriterler ve kısıtlamalara göre bir optimizasyon yapıldıktan sonra ön tasarım çalışması ortaya çıkar. Bu ön tasarım çalışması sonucu elde edilen verilerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla SEA yapılır. SEA yapabilen programlar ile 2 veya 3 boyutta analizler gerçekleştirilebilir. EASMSM'nin analizi ise sadece 3 boyutta gerçekleştirilebilir. Analiz çıktıları optimizasyon sonuçlarını doğrulamıyorsa analitik tasarım ve optimizasyon adımları tekrar incelenmelidir. Elektromanyetik tasarım çalışmalarını geçen tasarım yapısal analiz adımına geçebilir. Genel kullanımları direk sürüş olan EASMSM'ler için yapısal analiz çalışmaları oldukça önemlidir. Yapısal analiz aşamasını geçen motor tasarımının termal analiz programları kullanılarak termal analizleri yapılır. Bu adımı geçemeyen tasarım için tekrar elektromanyetik tasarım tekrarlanır. EASMSM'nin tasarım süreçlerinin tüm aşamaları bitirildiğinde son tasarım elde edilir.

#### 4.1. Analitik Tasarım

Doğru bir matematiksel tanımlama bir elektrik motorunun tasarımındaki başarı ile doğru orantılıdır. Elektrik motorlarının tanımlatıldığı her parametre motor performans göstergeleri bakımından bir etkiye sahiptir. Bu parametreler, analitik tasarım yaparken ihtiyaç duyulan gereklilikler dikkate alınarak belirlenir. Bu bölümde Şekil 4.2’de gösterilen TORUS motor modeli esas alınarak matematik modellemesi yapılır. İlk olarak TORUS motora ait boyutlandırma denklemleri oluşturulmuştur. Daha sonra TORUS motora ait manyetik devre modeli oluşturularak bu devre modeli üzerinden permeans değerleri, manyetik akı ve hava aralığı akı yoğunluğu analiz edilmiştir. Moment oluşumu incelenerek, zıt emk’sı ve motorun momenti hesaplanmıştır. Bu çalışma sonunda bütün matematiksel ifadeler MATLAB programına aktarılmış ve motor modeli ortaya konulmuştur.



Şekil 4.2. TORUS motor parametrelerinin sembolleri

##### 4.1.1. Boyutlandırma Denklemleri

Motor boyutlandırma motor tasarımına başlamak için ilk adımdır. Tasarıma başlamadan önce motorun kullanılacağı yer belirlenerek motorun boyutları belirlenir bu boyutlar sabit tutularak motor boyutları motor boyutlandırma denklemleri yardımıyla bulunur. TORUS motorlarda motorun iç çapı ile dış çapı arasında belli bir oran vardır. Bu oran (4.1) numaralı denklemde görülmektedir.

$$D_i = \frac{D_0}{\text{Lamda}} \quad (4.1)$$

Bu denklemde Lamda değeri sabit ve  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  e eşittir.

Şekil 4.1’de mıknatıs çapı  $D_{m0}$  ile isimlendirilmektedir ve mıknatıs çapının boyutunu belirleyen denklem (4.2) de görülmektedir

$$D_{m0} = D_0 - 2h_b \quad (4.2)$$

Denklem (4.3) te rotorun etkin çapı yer almaktadır.  $D_0$  moturun dış çapı,  $D_i$  ise motorun iç çapıdır.  $D_a$  ise motorun etkin çap uzunluğudur.

$$D_a = D_0 - D_i \quad (4.3)$$

Denklem 4.4’ de  $h_a$  mıknatıs ile rotor iç çapı arasındaki uzaklıktır.

$$h_a = \frac{D_a}{2} - 2h_b \quad (4.4)$$

Denklem 4.5’de  $D_{mi}$  mıknatısın iç çapını ifade etmektedir.

$$D_{mi} = D_i + 2h_a \quad (4.5)$$

Denklem 4.6’da  $h_m$  mıknatıs boyudur.

$$h_m = D_{mo} - D_{mi} \quad (4.6)$$

Denklem 4.7’de  $D_m$  mıknatıs çap uzunluğudur.

$$D_m = \frac{(D_o + D_i)}{2} \quad (4.7)$$

Denklem 4.8’de  $L_{rc}$  rotor boyudur.

$$L_{rc} = L_m + L_r \quad (4.8)$$

Denklem 4.9’da  $R_0$  motorun yarıçapıdır.

$$R_0 = \frac{D_o}{2} \quad (4.9)$$

Denklem 4.10’da  $h_c$  mıknatıs bitimi ile rotor arasındaki uzunluktur. Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir.

$$h_c = h_{s1} - h_b \quad (4.10)$$

Denklem 4.11’de  $h_d$  rotorun etkin çap uzunluğunu verir.

$$h_d = h_b + h_m + h_{s2} + h_c \quad (4.11)$$

Denklem 4.12’de  $h_e$  stator yarıçapıdır.

$$h_e = h_{s1} + h_m + h_{s2} \quad (4.12)$$

Denklem 4.13’de  $\tau_p$ (radyan) mıknatıs genişliğidir.

$$\tau_p(\text{radyan}) = \frac{2\pi}{p} \quad (4.13)$$

Denklem 4.14’de  $\tau_p$ (metre) mıknatıs genişliğidir.

$$\tau_p(\text{metre}) = \frac{D_m \pi}{p} \quad (4.14)$$

Denklem 4.15’de  $\theta_{Di}$  elektriksel derecedir.

$$\theta_{Di} = \frac{180}{m} \quad (4.15)$$

Denklem 4.16’da  $\theta$  dağıtım faktörüdür.

$$\theta = \frac{\theta_{Di} D_i}{D_m} \quad (4.16)$$

Denklem 4.17’de  $D_g$  motorun ortalama çapıdır.

$$D_g = \frac{(D_o + D_i)}{2} \quad (4.17)$$

Denklem 4.18’de  $A_{slot}$  slot alanıdır.

$$A_{slot} = W_{sb} d_b \quad (4.18)$$

Denklem 4.19’da  $W_{cuo}$  dış çaptan taşan sargı yüksekliğidir.

$$W_{cuo} = \sqrt{D_o^2 + \frac{(4A_{slot} D_g)}{K_{cu} J_s}} - \frac{D_o}{2} \quad (4.19)$$

Denklem 4.20’de  $W_{cui}$  iç çaptan taşan sargı yüksekliğidir.

$$W_{cui} = \sqrt{D_i^2 + \frac{(4A_{slot}D_g)}{K_{cu}J_s}} - \frac{D_i}{2} \quad (4.20)$$

Denklem 4.21’de  $D_{tn}$  motorun toplam dış çapıdır.

$$D_{tn} = D_0 + 2W_{cui} \quad (4.21)$$

Denklem 4.22’de  $\tau_m$  mıknatıs genişliği,  $\tau_p$  kutup adımı ve  $\tau_f$  iki mıknatıs arası mesafedir.

$$\tau_m = \tau_p - \tau_f \quad (4.22)$$

Denklem 4.23’de  $\alpha$  embrancedır.

$$\alpha = \frac{\tau_m}{\tau_p} \quad (4.23)$$

Denklem 4.24’de  $A_{pm}$  mıknatıs alanıdır.

$$A_{pm} = \frac{\alpha_{pm}\pi(D_0^2 - D_i^2)}{N_{pm}} \quad (4.24)$$

Denklem 4.25’de  $A_g$  hava aralığı alanıdır.

$$A_g = \frac{\pi(1+\alpha)}{2N_{pm}}(D_0^2 - D_i^2) \quad (4.25)$$

Denklem 4.26’da  $A_p$  bir kutup için yüzey alanıdır.

$$A_p = \frac{\pi(D_0^2 - D_i^2)}{N_{pm}} \quad (4.26)$$

Denklem 4.27’de  $L_y$  statorun boyunduruk uzunluğudur.

$$L_y = \frac{\tau_p B_{g0}}{2B_{max}} \quad (4.27)$$

Denklem 4.28’de  $\tau_{si}$  slot adımıdır.

$$\tau_{si} = \frac{D_i \pi}{(2pn_{sppm})} \quad (4.28)$$

Denklem 4.29’da  $W_{tbi}$  stator dış genişliğidir.

$$W_{tbi} = \tau_{si} - W_{sb} \quad (4.29)$$

Denklem 4.30’da  $L_{cs}$  stator yüksekliğidir.

$$L_{cs} = \frac{B_{g0} \pi D_0 (1 + \lambda)}{B_{cs}^4 p} \quad (4.30)$$

Denklem 4.31’de  $L_s$  toplam stator yüksekliğidir.

$$L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} \quad (4.31)$$

Denklem 4.32’de  $L$  motorun paket boyudur.

$$L = 2L_r + 2g + 2L_m + L_s \quad (4.32)$$

Denklem 4.33’de  $W_x$  şekil 4.1’de gösterilmiştir.

$$W_x = \frac{(W_{sb} - W_s)}{2} \quad (4.33)$$

Denklem 4.34’de  $W_{ti}$  şekil 5.1’de gösterilmiştir.

$$W_{ti} = 2W_x + W_{tbi} \quad (4.34)$$

Denklem 4.35’de  $L_e$  motorun toplam yüksekliğidir.

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g \quad (4.35)$$

Denklem 4.36’da  $L_{rc}$  toplam rotor uzunluğudur.

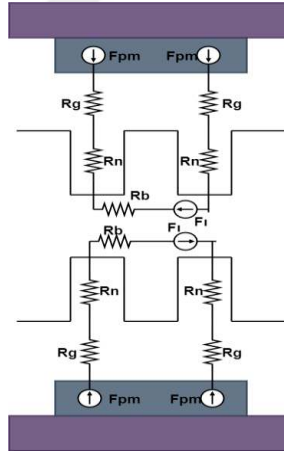
$$L_{rc} = \frac{B_{g0}\pi D_0(1+\text{Lamda})}{8pB_{rc}} \quad (4.36)$$

Denklem 4.37’de  $L_g$  toplam hava aralığı uzunluğudur.

$$L_g = \frac{n_s\mu_r(D_0^2+D_i^2)K_d}{8(L_m2\mu_rK_{cg})} \quad (4.37)$$

#### 4.1.2. Manyetik Devre Tasarımı ve Analizi

Manyetik devre tasarımı, manyetik akının izlediği yolun tanımlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu tanımlama sayesinde motora ait pek çok parametre kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Bu bölümde ele alınacak devre çift hava aralıklı TORUS motor topolojisine göre çizilmiştir. Boyutları yarıçap boyunca değişkenlik gösteren ve üretilen momentin değişen yarıçap ile belirlendiği bir yapı olan EASMSM, standart radyal akıllı motorlardaki gibi sabit bir yarıçapa sahip değildir. Şekil 4.3’ de TORUS motorun manyetik devre modeli çizilmiştir. Motorda karşılıklı yerleştirilen mıknatıslar aynı kutba sahiptir. Bu durum TORUS motorlarda NN tipi TORUS motor olarak anlatılmaktadır.



Şekil 4.3. Manyetik devre şeması

Şekilde  $R_g$ ,  $R_B$ ,  $R_N$ ,  $F_{PM}$  ve  $F_I$  sırasıyla hava aralığı relüktansı, nüve boyunduruğunun relüktansı, nüve ayağının relüktansı, sabit mıknatısın manyeto motor kuvveti (MMK) ve sargı tarafından akıma bağlı olarak üretilen mmk’dır.

Denklem 4.38’da amper kanunu verilmiştir. Amper kanununa göre bir yol boyunca akımın meydana getirdiği manyetik alan şiddeti denklem 4.38’den hesaplanır. Denklem 4.38’de  $H$  manyetik alan şiddeti birimi AT/m (metre başına amper sarım miktarı),  $I_{top}$  toplam akım değeri ve

l ise toplam yolu ifade etmektedir. Eğer toplam N tane sarım varsa denklemde  $I_{top}$  yerine  $N.i$  yazılır.

$$\oint H \cdot dl = I_{top} \quad (4.38)$$

Manyetik alan şiddeti H kapalı bir  $l_c$  yolu boyunca devresini tamamlarsa ve kaçak akılar göz ardı edilirse bu durumda denklem 4.39'da verildiği gibi yazılır.

$$H \cdot l_c = N \cdot i \quad (4.39)$$

Manyetik akı yoğunluğunu oluşturan manyetik alan şiddetidir. Manyetik akı yoğunluğu B (weber/m<sup>2</sup> veya Tesla) malzeme geçirgenliğine bağlıdır. Malzeme geçirgenliği  $\mu_m$  ile ifade edilir. Birimi Henry/metre (H/m)'dir. Malzeme geçirgenliğinin havaya göre oranı bağıl geçirgenlik  $\mu_r$  ile ifade edilir. Ortamın geçirgenliği  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m'dir.

$$B = \mu_m \cdot H \quad (4.40)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (4.41)$$

Denklem 4.39 ve 4.40'dan denklem 4.42 elde edilir.

$$B = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i}{l_c} \quad (4.42)$$

Belirli bir alandaki manyetik akı yoğunluğu  $\Phi$  (weber) denklem 4.43'den hesaplanır.

$$\Phi = \int_A B \cdot dA = B \cdot A = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i \cdot A}{l_c} \quad (4.43)$$

Manyetik akı yoğunluğu  $\Phi$  (weber) manyete motor kuvvet (amper sarım) ve relüktans R (amper sarım/weber) cinsinden ise denklem 4.44'deki gibi yazılabilir.

$$\Phi = \frac{F}{R} \quad (4.44)$$

Denklem 4.35'deki manyeto motor kuvvet F (amper sarım) denklem 4.45'da verilmiştir.

$$F = N \cdot i \quad (4.45)$$

Denklem 4.43-44-45'den yararlanarak manyetik akı  $\Phi$  (weber)'yi aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

$$\Phi = F \cdot \left( \frac{\mu_m \cdot A}{l_c} \right) \quad (4.46)$$

Denklem 4.46'da verilen parantez içindeki değer manyetik devrelerdeki iletkenliğin (permeans) tersi relüktanstır. Denklem 4.47'deki gibi ifade edilir. Birimi amper sarım/weber'dir. Relüktans seri ve paralel devrelerde elektrik devrelerindeki direnç ile aynı kurallar çerçevesinde işlem görür.

$$R = \frac{l_c}{\mu_m \cdot A} = \frac{l_c}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (4.47)$$

Şekil 4.3 'de verilen sabit mıknatısın ürettiği MMK denklem 4.43-44-47'den elde edilerek denklem 4.48'da verildiği gibidir. Denklem 4.48'de  $B_r$ ,  $l_{PM}$  ve  $\mu_{r,PM}$  sırasıyla sabit mıknatısın manyetik akı değeri, mıknatısın kalınlığı ve mıknatısın bağıl geçirgenliğidir.

$$F_{PM} = \frac{B_r \cdot l_{PM}}{\mu_{r,PM} \cdot \mu_0} \quad (4.48)$$

Denklem 4.49’da verilen  $F_I$  (amper sarım) sargının ürettiği MMK’dır.

$$F_I = N \cdot i \quad (4.49)$$

Şekil 4.3’de verilen  $R_g$ ,  $R_B$  ve  $R_N$  denklem 4.47’den yararlanılarak hesaplanır. Bu kısımda TORUS-NN tip motorun verilen basit eşdeğer devresi ile manyetik hesaplamaları yapmak mümkündür. Fakat motorun geometrisinden dolayı bir kutup altındaki oluk kenarlarının tümü Şekil 4.3’de verildiği gibi hizalanmaz. Dış çaptan iç çapa doğru mıknatıs altında kalan oluk kenarlarının yüzeyi küçülür ve diğer oluklar mıknatıs altına girmeye başlar. Dolayısıyla hesaplarda bir miktar sapma olur. Bunun için Bölüm 5’de motorun manyetik analizleri 3 boyutlu analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu analiz sayesinde değişik geometrilerdeki manyetik alan dağılımını tespit etmek daha kolaydır. Tek dezavantajı makine geometrisi karışıkça bilgisayar hızının ve kapasitesinin de artması gerekmektedir.

Denklem 4.50 de verilen denklemde  $B_{g0}$  hava aralığı manyetik akı yoğunluğudur. Değeri 0.9-1 aralığında olmalıdır.

$$B_{g0} = \frac{B_r}{(1 + 2g \frac{\mu_r}{L_m})} \quad (4.50)$$

Denklem 4.51’de verilen denklemde  $B_{g1peak}$ , hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun en üst değeridir.

$$B_{g1peak} = \frac{4}{(\pi B_{g0} \frac{\sin \alpha_{PM}}{2})} \quad (4.51)$$

Denklem 4.52’de verilen denklemde  $B_m$  mıknatıs üzerindeki akı yoğunluğudur.

$$B_m = B_{g0} \frac{\tau_f}{L_m} \quad (4.52)$$

Denklem 4.53’de verilen denklemde  $g_c$  hava aralığının efektif değeridir.

$$g_c = 2g + \frac{L_m}{\mu_r} \quad (4.53)$$

Denklem 4.54’de verilen denklem  $K_c$  karter katsayısını verir ve bu değer yaklaşık 1 e eşittir.

$$K_c = (1 + \frac{1}{(\frac{\tau_{si}}{W_s(\frac{5g_c}{W_s+1})})})^{-1} \quad (4.54)$$

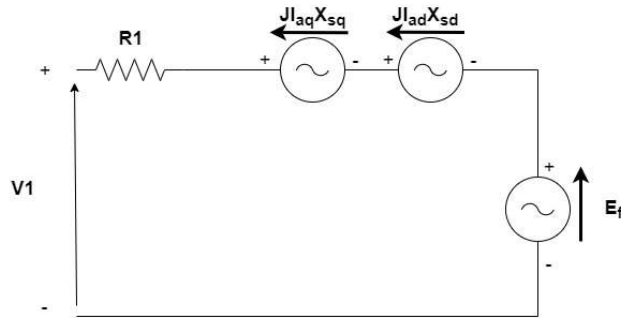
Denklem 4.55’de verilen denklem  $g_e$  hava aralığının etkin değeridir.

$$g_e = K_c g \quad (4.55)$$

#### 4.1.3. TORUS Motorun Elektriksel Eşdeğer Devresi

Tasarımı yapılacak TORUS motorun kutuplarını oluşturmak için yamuk formunda mıknatıslar kullanılmıştır. Bu yüzden eşdeğer devreyi çıkık kutuplu senkron makine eşdeğer devresine benzer şekilde çıkartmak mümkündür. Çıkık kutuplu senkron makinelerde kutbun karşısına gelen eksen d eksenini iki kutup arasında kalan hizaya denk gelen eksenini de q eksenini olarak isimlendirip çözümlemeleri bu iki eksene göre yapmak gerekir.

Öncelikle TORUS motorun bir fazının eşdeğer devresi Şekil 4.4’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 4.4. TORUS motor eşdeğer devresi**

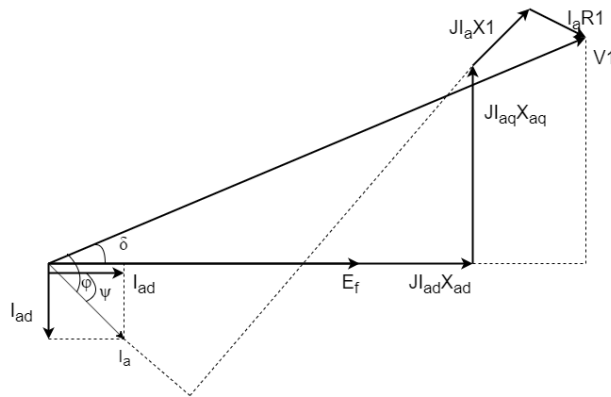
TORUS motor d ekseninde olduğunda reaktansı denklem 4.56 ile ifade edilir. Denklem 4.56'da  $X_{sd}$  d eksen senkron reaktansıdır.  $X_{ad}$  endüvi sargısının oluşturduğu reaktans,  $X_1$  ise kaçak reaktansı ifade eder.

$$X_{sd} = X_{ad} + X_1 \quad (4.56)$$

Denklem 4.56'yı referans alarak q eksenini için de aynı eşitlikler denklem 4.57'de gösterildiği gibi verilmiştir. Denklem 4.57'de  $X_{sq}$  q eksenini senkron reaktansıdır.  $X_{aq}$  endüvi sargısının oluşturduğu reaktans,  $X_1$  ise kaçak reaktansı ifade eder.

$$X_{sq} = X_{aq} + X_1 \quad (4.57)$$

Şekil 4.4, denklem 4.56 ve denklem 4.57’den yararlanılarak TORUS motorun vektör diyagramı şekil 4.5 ’deki gibi çıkartılır.



**Şekil 4.5.** TORUS motorun bir faz vektörel diyagramı

Şekil 4.5’de TORUS motorun bir fazı için verilen vektör diyagramından denklem 4.58’de verildiği gibi uygulanan gerilim eşitliği elde edilir.

$$V_1 = E_f + I_a R_1 + I_{ad} X_{sd} + I_{aq} X_{sq} \quad (4.58)$$

Denklem 4.58’de d eksenî endüvî akımı  $I_{ad}$  ve q eksenî endüvî akımı  $I_{aq}$  endüvî akımı  $I_a$  cinsinden denklem 4.59 ve 4.60’de verildiği gibi ifade edilir.

$$I_{ad} = I_a \sin \varphi \quad (4.59)$$

$$I_{aq} = I_a \cos \varphi \quad (4.60)$$

TORUS motorda uygulanan uç geriliminin iki bileşeni denklem 4.61 ve 4.62’de verildiği gibidir.

$$V_1 \sin \delta = I_{aq} X_{sq} - I_{ad} R_1 \quad (4.61)$$

$$V_1 \cos \delta = E_f + I_{ad} X_{sd} + I_{aq} R_1 \quad (4.62)$$

Denklem 4.63’de  $n_c$  faz başına düşen sargı miktarıdır.

$$n_c = \frac{Q}{m} \quad (4.63)$$

Denklem 4.64’de  $Y$  bir kutup altındaki oluk sayısıdır.

$$Y = \frac{Q}{p} \quad (4.64)$$

Denklem 4.65’de  $c$  her fazdaki kutup altına düşen oluk sayısıdır.

$$c = \frac{Q}{(p.m)} \quad (4.65)$$

Denklem 4.66’da  $I_a$  bir faz akımıdır.

$$I_a = \frac{P_{out}}{(2E_{peak.m.0.9^2})} \quad (4.66)$$

Denklem 4.67’de  $N_{turn}$  sipir sayısıdır.

$$N_{turn} = \frac{(\pi D_0 (1+K_d) A)}{(4m\sqrt{2} I_a)} \quad (4.67)$$

Denklem 4.68’de  $I_{peak}$  peak akımmıdır.

$$I_{peak} = \frac{(A\pi K_i (1+Lamda))}{\left(\frac{2D_0}{(2mN_{turn})}\right)} \quad (4.68)$$

Denklem 4.69’da  $I_{rms}$  rms akımmıdır.

$$I_{rms} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (4.69)$$

Denklem 4.70’de  $E_{rms}$  rms gerilimidir

$$E_{rms} = \frac{E_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (4.70)$$

Denklem 4.71’de  $q$  faz başına düşen oluk sayısıdır.

$$q = \frac{Q}{m} \quad (4.71)$$

Denklem 4.72’de  $n_s$  slot sayısının faz ve kutup sayısına oranıdır.

$$n_s = \frac{N_{ph}}{q} \quad (4.72)$$

Denklem 4.73’de  $K_d$  sargı faktörüdür.

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{(2m)}\right)}{(q \sin\left(\frac{\pi p}{Q}\right))} \quad (4.73)$$

Denklem 4.74’de  $K_s$  eğrilik faktörüdür.

$$K_s = 1 - \frac{p}{Q} \quad (4.74)$$

Denklem 4.75’de  $R_s$  stator direncidir.

$$R_s = \frac{\rho_{cu} n_s^2 (D_o + D_i)}{2K_c} \quad (4.75)$$

Denklem 4.76’da  $R_{ph}$  faz direncidir.

$$R_{ph} = 2cR_s \quad (4.76)$$

Denklem 4.77’de  $EMF_{max}$  back EMF dir.

$$EMF_{max} = \frac{K_e N_{ph} B_{g0} f}{(p(1-Lamda^2)D_o^2)} \quad (4.77)$$

Denklem 4.78’de  $I_{max}$  maksimum akımdır.

$$I_{max} = \frac{A\pi K_i (1 + \frac{Lamda}{2D_o})}{2mN_{ph}} \quad (4.78)$$

#### 4.1.4. TORUS Motorun Kayıp Denklemleri

TORUS motor tasarımı yapılırken motorda histerisiz, eddy akımı, çekirdek ve bakır kayıpları hesaplanmıştır.

Denklem 4.79’da  $P_h$  histerisiz kaybıdır.

$$P_h = K_h B_m^2 f \quad (4.79)$$

Denklem 4.80’de  $P_c$  eddy akımı kaybıdır.

$$P_c = K_c B_m^2 f^2 \quad (4.80)$$

Denklem 4.81’de  $P_e$  fazla çekirdek kaybıdır.

$$P_e = K_e B_m^{1.5} + f^{1.5} \quad (4.81)$$

Denklem 4.82’de  $R_f$  bakır direncidir.

$$R_f = \frac{\rho_{cu} L_s N_{turn}}{\frac{\pi}{4D_o^2}} \quad (4.82)$$

Denklem 4.83’de  $P_{cu}$  bakır kaybıdır.

$$P_{cu} = 3R_f I_{rms}^2 \quad (4.83)$$

Denklem 4.84’de  $P_{co}$  çekirdek kayıplarıdır.

$$P_{co} = P_h + P_c + P_e \quad (4.84)$$

Denklem 4.85’de  $P_{in}$  giriş gücüdür.

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu} + P_{co} \quad (4.85)$$

Denklem 4.86’da motorun verimi verilmiştir.

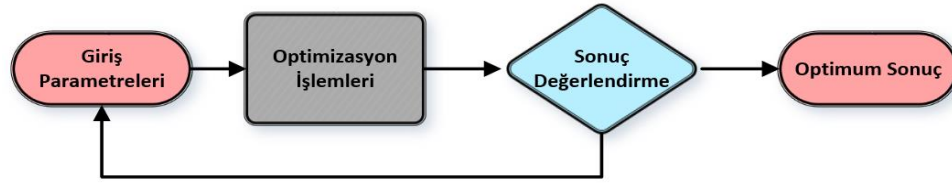
$$\text{verim} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.86)$$

## 4.2. Motor Optimizasyon Çalışması

Geçmişten günümüze insanlar hayatlarında karşılaştıkları problemlere çözümler üretmek için çalışmışlardır. Problemlere üretilen çözümler gün geçtikçe değişmiştir. Aynı zamanda zamanla değişen başka bir husus da insanların beklentisidir. Yani insanların problemleri algılayışlarındaki farklılıklar olmuştur. İnsanlar yine de amaçları doğrultusunda belirledikleri problemlere en iyi çözümlemeyi bulmak için çalışmalara devam etmektedirler. İnsanlar herhangi bir probleme en iyi çözümlemeyi bulmak için gerçekleştirdikleri faaliyetlerin tamamına optimizasyon denmektedir.

Optimizasyon işlemi bir probleme en iyi çözümlemeyi arama faaliyetidir. Ama ortaya çıkan sonuç en iyi olmayabilir. Bu durum ise optimizasyon işlemlerinin problemin tespiti, kullanılacak parametrelerin seçimi ve uygulanacak yöntemler gibi kriterler yönüyle sürekliliklerini ortaya koymaktadır.

Optimizasyon işlemlerinin temel unsurları Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Optimizasyon faaliyetlerinin temel unsurları

Optimizasyon problemlerinde kullanılan algoritmalar aşağıda sıralanmıştır.

- Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
- Benzetilmiş Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm)
- Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
- Yapay Arı Koloni Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm)
- Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization Algorithm)

Bu tezde farklı algoritmaların verdiği sonuçları karşılaştırmak amacıyla iki optimizasyon metodu kullanılmıştır. Bunlar Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonudur (PSO). GA'nın kullanım amacı, literatürde TORUS motorun optimizasyon çalışmalarında çoğunlukla bu optimizasyon yönteminin kullanılmasıdır. PSO'nun kullanım amacı ise PSO'da kullanılan parametrelerin sayısının az olmasından kaynaklı daha kolay bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmek hedeflenmiştir.

#### 4.2.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu balıkların ve kuşların sürü halindeki davranışlarından yola çıkılarak oluşturulan algoritmalarlardır. Parçacık sürü optimizasyonunun temel mantığı sürüdeki bireylerin birbirleriyle olan bilgi iletişimini en iyi biçimde sağlayarak optimizasyonu gerçekleştirmektedir.

Sürü zekası mantığıyla çalışan parçacık sürü optimizasyonu, sürüdeki bir bireyin karmaşık problemlerin çözümüne daha kolay yollarla ulaşacağı hipotezi üzerine kurulmuştur. Bu amaçla doğada yapılan gözlemlere dayalı matematiksel terimler oluşturulmuştur ve dolayısıyla bu çözümlemeler çoğu alanda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde mühendislik problemlerinde kullanılan optimizasyon yöntemlerinden oldukça başarılı sonuçlar alınmaktadır. PSO'nun parametre sayısının az olmasından dolayı diğer optimizasyon yöntemlerinden oldukça avantajlı konumdadır. PSO' da kullanılan temel parametreler aşağıdaki gibidir;

**Konum Vektörü ( $X_i^k$ ):** Konum vektörü parametresi problemi ifade etmekte kullanılır. Konum vektörünün popülasyon içindeki ifadesi  $X_i^k [X_{i1}^k, X_{i2}^k, \dots, X_{ij}^k]$  şeklindedir. k. iterasyonda i. parçacığın konum vektöründeki 1. eleman  $X_{i1}^k$  sembolü ile ifade edilir.

**Hız Vektörü ( $V_i^k$ ):** Parçacığın bir sonraki konumunu belirleyerek parametre kontrolü sağlayan değişkendir. Hız vektörünün popülasyon içindeki ifadesi  $V_i^k (V_{i1}^k, V_{i2}^k, \dots, V_{ij}^k)$  şeklindedir. k. iterasyonda i. parçacığın hız vektöründeki 1. eleman  $V_{i1}^k$  sembolü ile ifade edilir. Parametre kontrolü sağlamak için hız vektörü  $[-V_{max}, +V_{max}]$  şeklinde sınırlandırılabilir.

**Parçacık Sayısı:** Sürüde yer alan birey sayısıdır. Problemden probleme değişiklik gösterir.

**Parçacık Boyutu:** Problem boyutunun ifade edildiği ve probleme göre değişken ya da sabit değer alabilen parametredir.

**Öğrenme Faktörleri ( $c_1, c_2, \dots, c_n$ ):** Sosyal ve kavramsal değerleri ifade eder.

**Atalet Ağırlığı ( $w$ ):** Bir önceki hız vektörünün bir sonraki hız vektörü üzerindeki etkisini kontrol eden parametredir.

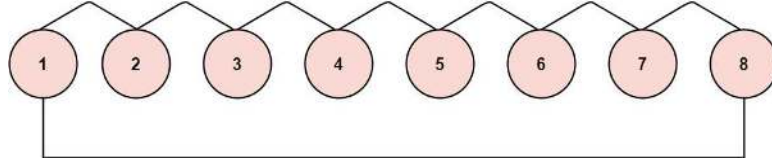
**Rastgele Değerler ( $r_1, r_2, \dots, r_n$ ):** Düzgün dağılmış rastgele değerlerdir.

**Yerel En İyi Değer ( $l_{best}$ ):** i. parçacığın o ana kadar elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değeridir.

**Küresel En İyi Değer ( $G_{best}$ ):** O ana kadar elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değeridir.

**Durdurma Kriteri:** Belirlenen iterasyon sayısına ulaşıldığında ya da istenen amaç fonksiyonu değeri elde edildiği zaman algoritmayı durduracak olan kriterdir.

PSO'da bireylerin geçmiş tecrübelerinden veya sürüdeki diğer bireylerin tecrübelerinden yararlanarak bilgi edinmesini sosyometrik prensip olarak adlandırırlar. Bireylerin kendi aralarında iletişim şekilleri bulunmaktadır. Bireyin tüm sürüyle haberleşerek elde ettiği bilginin değeri, küresel en iyi değer ( $g_{best}$ ), sadece komşusuyla haberleşerek elde ettiği bilginin değeri, yerel en iyi değer ( $l_{best}$ ) olarak adlandırılır.



**Şekil 4.7.** Komşu bireylerin birbiriyle etkileşimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi komşular arasında ve sürünün tamamında bilgi paylaşımı bulunmaktadır. Örneğin 4 ve 5 numaralı bireyler arasındaki ilişkiden ortaya çıkan en iyi değer ya da 1 numaralı birey hariç, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 numaralı bireyler arasındaki bilgi paylaşımı, yerel en iyi değer yani  $l_{best}$  olarak adlandırılırken, tüm elemanlar arasındaki bilgi paylaşımı, küresel en iyi değer yani  $g_{best}$  olarak adlandırılır.

Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında sürüdeki bireyler kendi davranışlarını yönlendirebilecek şekilde hareket etmektedirler. Bu yönlendirme oldukça basit bir mantığa dayalı olduğundan sürüdeki bireyler bu konuda zorlanmamaktadırlar. Genel olarak birey davranışlarının özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Sürüdeki bireyler arasındaki davranışlarda rastlantısal değişkenlikler görülebilir.
- Bireyler yeni davranışlarını, komşu bireylerin en iyi davranışlarını ya da sürüdeki en iyi davranış örnek alarak gerçekleştirir.
- Bireylerin davranışlarında olumlu ya da olumsuz geri beslemeler mevcuttur. Olumlu geri beslemeler hareketlerin güçlenmesini, iyiye gitmesini sağlarken; olumsuz geri beslemeler hareketlerin dengeli bir şekilde değişmesini sağlamaktadır.
- Bireysel davranışlar birbirinden bağımsız gibi görünse de sürü geneline bakıldığında aslında bağlantılı olduğu görülmektedir [55].

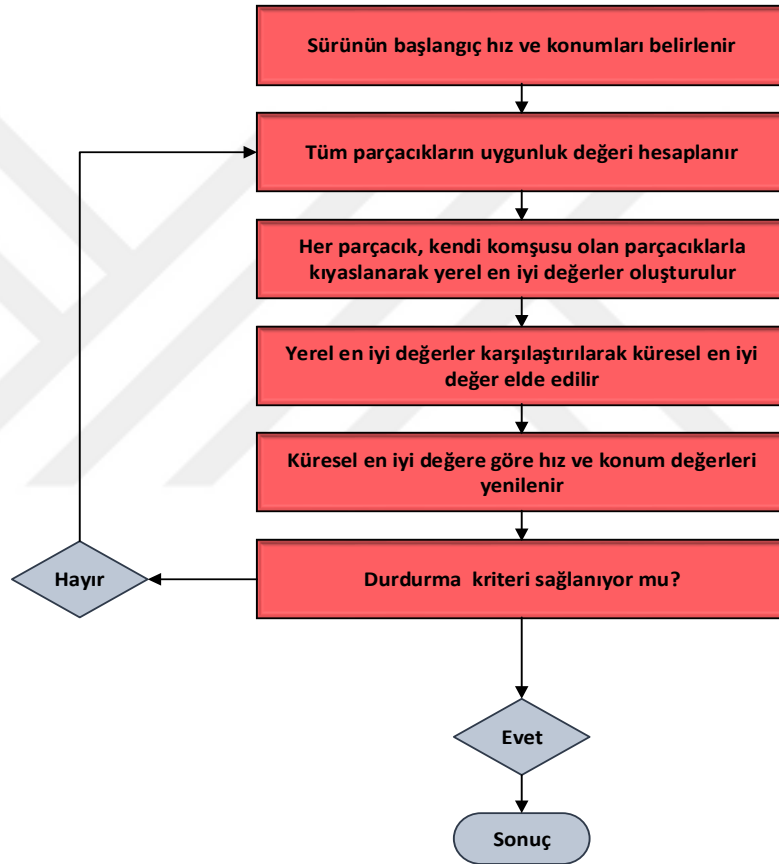
Birey davranışları sürü zekası ile son derece uyumludur. Bireysel davranışların sürü zekasına uyumlu olmasının yanı sıra sürü zekasının da pek çok avantajı vardır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Sürünün büyüklüğü problemin tipine ve zorluğuna göre değiştirilebilir özelliktedir. Dolayısıyla sürüdeki birey sayısı esnek yapıdadır.

- En önemli faktörlerden biri lider merkezli olmamasıdır. Çünkü lider merkezli sistemlerde liderlerin en iyi hareketi yapması ve sürünün buna uyması gerektiğinden liderlerin hareketleri oldukça önemlidir. Ancak lider merkezli olmayan PSO da liderlerin bireysel hataları sürüyü etkilemez. Ayrıca bireylerin arasında iletişim olduğu için bireyleri hatalı hareketleri de sürü genelinde büyük etkiler oluşturmaz. Bu nedenle PSO’nun lider merkezli olmayışı ile diğer optimizasyon şekillerine göre daha avantajlı olmaktadır.

- Sürü zekâsında sürü sayısı, sürüdeki hareketlerin hızları ve konumları gibi az sayıda parametreyle problem çözümü yapıla bilindiğinden oldukça tercih edilen algoritmalarıdır.
- Algoritmada yapılan değişiklikler, sürünün bilgi paylaşımı fazla olduğundan bilginin hemen yayılmasını ve doğru sonuca daha hızla ulaşılmasını sağlamaktadır.
- Problem karmaşıktıkça diğer optimizasyonlar da karmaşılaşır. Fakat PSO'nun basit yapısı problemler karmaşık olsa da kolayca düzenlenebilir.

PSO algoritmasının akış şeması aşağıda gösterildiği gibidir;



Şekil 4.8. PSO algoritma akış şeması

#### 4.2.2. Genetik Algoritma ile Optimizasyon

Pek çok pratik optimizasyon problemleri sürekli ayrık değişkenler ya da süreksiz dış büyü uzaylarla karakterize edilir. Bu türden optimizasyon problemleri için doğrusal olmayan programlama yöntemlerinin kullanılması yetersiz ve yüksek maliyetlidir. Genetik algoritma bu tarz problemler için oldukça uygundur. Ayrıca genetik algoritma yüksek uygunlukta küresel optimum çözüm bulur [56].

1970'lerde Michigan Üniversitesinde John Holland tarafından geliştirilen genetik algoritma tarafından doğal sistemin adaptasyon sürecini anlamak ve doğal sistemin sağlamlığını sürdüren

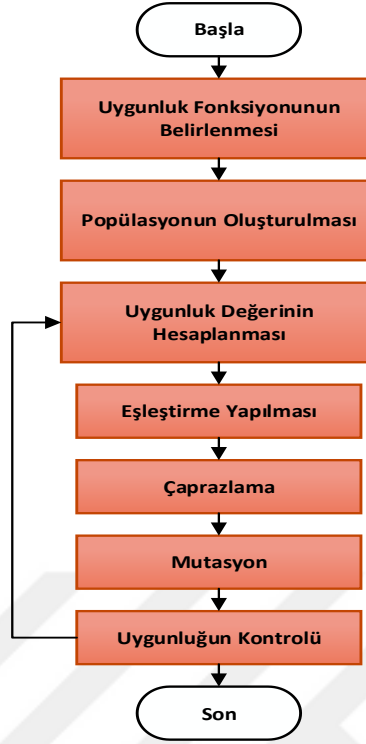
yapay sistem tasarlamak için geliştirilen bir algoritmadır. Günümüzde bilim, mühendislik ve işletme alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır.

Genetik algoritmalar, diğer optimizasyon yöntemlerinin aksine tek bir yapının geliştirilmesi yerine, bu yapılardan oluşturulan bir küme yaratırlar. Genetik algoritma terminolojisinde problem için olağan pek çok çözümü temsil eden bu küme popülasyon olarak adlandırılmaktadır. Popülasyonlar kromozom, vektör veya birey adı verilen sayı dizilerinden oluşur. Birey sayı dizisinin içerisindeki her bir eleman gen olarak adlandırılmaktadır. Evrimsel süreç içinde nüfustaki bireyler genetik algoritma işlemcileri tarafından belirlenmektedir. Algoritmanın temel çalışma prensibi aşağıdaki Şekil 4.9’da verildiği gibidir [57].

Algoritmanın çalışmasını kısaca özetlenecek olursa:

**1. Adım:** Optimizasyona göre popülasyon için uygun amaç fonksiyonu belirlenir. Bütün çözümlemelerin aynı boyutlara sahip bitler dizisi şeklinde gösterilmesi gerekmektedir. Problemin çözüm uzayındaki rastgele bir noktası dizilerden her birini simgeler. Parametreler kodlanarak probleme ait bilgilerin genetik algoritmanın kullanılabileceği hale getirilir. Bu fonksiyon genetik algoritmanın beynidir. Fonksiyon, genetik algoritmada probleme özel çalışan tek kısmı oluşturmaktadır. Genetik algoritmanın başarı ölçütü çoğu zaman bu fonksiyonun verimli ve hassas olmasına bağlıdır [58].

**2. Adım:** Çözüm grubuna biyolojideki benzerliği nedeniyle popülasyon, çözüm kodlarına ise kromozom adı verilir. Bu isimlendirme popülasyonda yer alan birey sayısını belirler. Bu sayı için sabit bir değer yoktur. Popülasyon, büyüklük seçiminde yapılan işlemlerin karmaşıklığı ve aramanın derinliği işlemlerinden sonra rastgele oluşturulur. Bu işlem popülasyon için oldukça önemlidir [58].

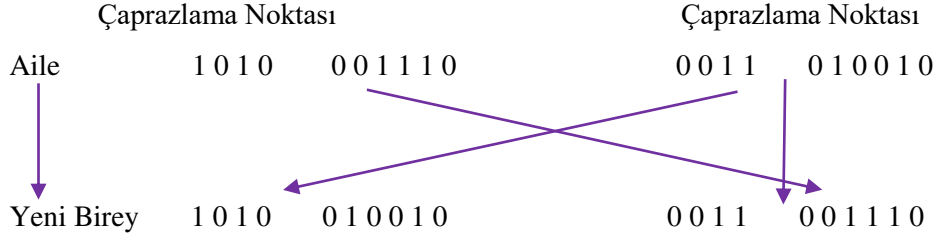


Şekil 4.9. Genetik algoritmanın genel çalışma prensibi

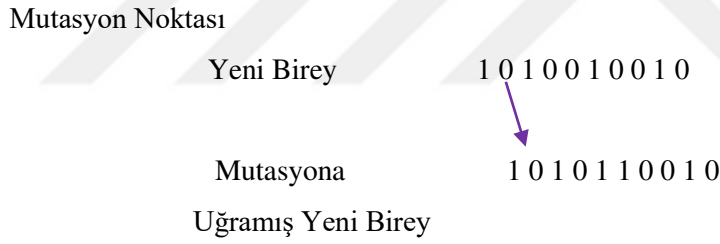
**3. Adım:** Popülasyonda bulunan her kromozom için uygunluk değeri hesaplanır. Bu uygunluk değerleri eşleşme yapılırken kullanılır.

**4. Adım:** Eşleyerek yeniden kopyalama ve değiştirme operatörleri kromozomlara uygulanır. Bu durumda yeni bir popülasyon oluşturulur. Seçim yapmak için rulet tekerleği seçimi ya da turnuva seçimi gibi seçme yöntemleri vardır. Seçim işlemi bir sonraki nesil için yeni birey üretmek amacıyla hangi ailelerin kullanılacağını belirlemek için kullanılır. Bu işlem sonucunda, ortalama uygunluğun üzerindeki değerlere çoğalma fırsatı verir [58].

**5. Adım:** Çaprazlama operatörü, genetik algoritmanın performansını etkileyen parametrelerden biridir ve doğal popülasyonlarda ki çaprazlamaya karşılık gelir. Çaprazlama, eşleşme havuzunda bulunan bireylerden rastgele iki tanesinin seçilerek karşılıklı olarak çaprazlanmasıdır. Bir çaprazlama noktası belirlenerek birinci kromozomun çaprazlama noktasının solundaki bitlerin hepsi ikinci kromozoma geçerken, aynı şekilde ikinci kromozomun çaprazlama noktasının solundaki bitlerde birinci kromozoma geçer. Elde edilen yeni kromozomlar her iki kromozomunda özelliklerini taşımaktadır. Böylece popülasyonda çeşitlilik sağlanır. Bu işlemde amaç aile kromozom genlerinin yerlerini değiştirerek yeni birey kromozomlar üretmek ve böylece var olan uygunluk değeri daha yüksek olan kromozomlar elde etmektir.



**6. Adım:** Genetik algoritmada mutasyon karar verici olarak ikinci derecede rol oynar. Mutasyondaki amaç, kromozomun genlerinin bir veya birkaçının yerlerinin değiştirilerek yeni kromozom oluşturulmasıdır. Sürekli ve yeniden yeni nesil kromozom üretimi sonucunda belirli bir süre sonra yeni nesildeki kromozomlar birbirini tekrarlamaya başlayabilir ve bunun sonucunda farklı kromozom üretimi azalabilir ya da durabilir. Bu nedenle yeni nesildeki kromozomların çeşitliliğini arttırmak amacıyla kromozomların bazıları mutasyona uğratılır. Mutasyon sonucunda kromozomdaki bitler “1” ise “0”, “0” ise “1” yapılır. Mutasyon noktaları,  $N_{\text{popülasyon}} \times N_{\text{bit}}$  ‘lik bir popülasyon matrisinde rastgele olarak seçilmektedir. Algoritmanın daha geniş parametre uzayını taramak için mutasyonun yüzdelik değeri artırılır. Son iterasyonda ise mutasyon meydana gelmez [58].



**7. Adım:** Eski kromozomlar ortadan kaldırılarak yeni kromozomlara yer açılır. Bu sayede popülasyonun sabit büyüklükte olması sağlanır. Popülasyondaki bütün kromozomların uygunluk değerleri tekrar hesaplanarak yeni popülasyonun başarısı bulunur. İterasyon sonucunda, mutasyona ve çaprazlamaya uğrayan kromozomların uygunluk değerleri hesaplanarak yeni nesil kromozomlar oluşturulur. Sonraki adımda kromozomlar uygunluk değerlerine göre yeniden sıralanarak eşleştirme havuzuna koyulur. Tekrarlanan mutasyon, çaprazlama ve sıralamadan sonra yeni bir nesil daha elde edilir. Bu işlemler uygun bir çözüme ulaşıncaya kadar ya da iterasyon sayısına kadar devam eder. Her yeni neslin uygunluk değeri iterasyon sayısı kadar artar.

#### 4.3. Motor Optimizasyon Sonuçları

TORUS Motor optimizasyon çalışması iki optimizasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar GA ve PSO yöntemleridir. Motor optimizasyon çalışmalarında motorun bazı parametrelerinin sabit alınması gerekmektedir. Bu çalışmada da motorun bazı parametreleri sabit alınmıştır. Bu parametreler Tablo 4.1’de gösterildiği gibidir.

**Tablo 4.1.**Optimizasyonda sabit alınan parametreler

| Sembol                          | Anlamı                                    | Değeri               |
|---------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| <b>D</b>                        | Bakır tel çapı                            | 1 mm                 |
| <b><math>\rho_{cu}</math></b>   | Bakır öz direnci                          | $16.72 \times 10^9$  |
| <b><math>J_{max}</math></b>     | Maksimum akım yoğunluğu                   | 5                    |
| <b><math>B_{cs}</math></b>      | Stator manyetik akı yoğunluğu             | 1.6 T                |
| <b><math>K_h</math></b>         | Histerisiz katsayısı                      | 27.056               |
| <b><math>K_i</math></b>         | Düzeltilme katsayısı                      | $\sqrt{2}$           |
| <b>A</b>                        | Akı yoğunluğu                             | 8000                 |
| <b><math>n_{spp}</math></b>     | Oluk kutup kombinasyonuna bağlı katsayı   | 1.5                  |
| <b><math>n_{strans}</math></b>  | Tel sayısı                                | 1                    |
| <b>P</b>                        | Kutup sayısı                              | 4                    |
| <b>Q</b>                        | Oluk sayısı                               | 12                   |
| <b>g</b>                        | Hava aralığı uzunluğu                     | 0.5 mm               |
| <b><math>K_{fill}</math></b>    | Oluk doluluk faktörü                      | 0.45                 |
| <b><math>\mu_0</math></b>       | Havanın manyetik geçirgenlik katsayısı    | $4\pi 10^{-7}$       |
| <b><math>B_r</math></b>         | Mıknatısın kalıcı akı yoğunluğu           | 1.2 T                |
| <b><math>\mu_r</math></b>       | Mıknatısın manyetik geçirgenlik katsayısı | 1.03 T               |
| <b><math>\alpha_{PM}</math></b> | Mıknatıs açısı                            | 41.4                 |
| <b><math>K_{cu}</math></b>      | Bakır dolum katsayısı                     | 56                   |
| <b><math>J_s</math></b>         | Akım yoğunluğu                            | $3.5 \text{ A/mm}^2$ |
| <b><math>B_{max}</math></b>     | Maksimum manyetik alan yoğunluğu          | 1.8 T                |
| <b><math>P_{out}</math></b>     | Çıkış gücü                                | 4000 W               |
| <b>Gerilim</b>                  | Motor gerilimi                            | 400 V                |
| <b>Hız</b>                      | Motor hızı                                | 400 rpm              |
| <b>Lamda</b>                    | Stator dış ve iç çapın oranı              | $1/\sqrt{3}$         |
| <b>Sac Tipi</b>                 | M470-50A                                  | -                    |
| <b>Mıknatıs Tipi</b>            | NdFe35                                    | -                    |

Bu çalışmada ilk olarak Matlab programında üzerinde genetik algoritma kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra parçacık sürü optimizasyon yöntemi ile bir optimizasyon çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Bu iki optimizasyon sonuçlarından alınan çıktılar Tablo 4.2’de GA sonuçları ve PSO sonuçları sütunlarında yer almaktadır. Yapılan GA optimizasyon çalışmasında birey sayısı 320, kromozom başına bit sayısı 32 ve mutasyon oranı ise 0.05 olarak ayarlanmıştır. PSO ile yapılan optimizasyon çalışmasında ise birey sayısı 500, maksimum adım sayısı 1000 ve atalet momenti 0.01 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonuçlarında elde edilen çıktılar optimizasyonu teyit etmek amacıyla ANSYS Maxwell programına girdi olarak yazılmıştır. ANSYS Maxwell çıktıları Tablo 4.2’de optimizasyon sonuçlarının ANSYS Maxwell üzerindeki doğrulama sonuçları sütununda yer almaktadır. Bu sütunda yer alan

parametrelerden verim ve akım değerinin istenilen değerlerde çıkmamasından ötürü motor verimini arttırmak ve akım değerini düşürmek amacıyla ANSYS Maxwell programında bir optimizasyon çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasının sonucu Tablo 4.2’de ANSYS Maxwell üzerinde yapılan optimizasyon sonuçları stnunda yer almaktadır. ANSYS Maxwell’in kendi optimizasyon modülü üzerinde yapılan optimizasyon çalışmasında ise tekrar GA kullanılmıştır ve birey sayısı 500, kromozom başına bit sayısı 32 ve mutasyon oranı ise 0.01 olarak ayarlanmıştır.

Matlab’da yapılan optimizasyon alışması, ANSYS Maxwell programı ile doğrulandığında iki çalışma arasında çıkan verim değerleri arasındaki hata payı % 5.43 çıkmıştır. Matlab programında optimize edilen parametreler, stator dış çapı, stator iç çapı, mıknatıs kalınlığı, oluk genişliği, oluk uzunluğu, oluk ağzı genişliği ve oluk ağzı yüksekliğidir. Motor parametreleri ise %90 ve üzerindeki verime göre optimize edilmiştir. ANSYS Maxwell’de gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında ise verimi arttırabilecek parametrelerin optimize edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, stator dış çapı, stator iç çapı, oluk uzunluğu, oluk ağzı genişliği, mıknatıs kalınlığı ve embrance’dır. Motor verimi kısıtlaması tekrar %90 ve üzerinde olacak şekilde ayarlanmış ve buna ek olarak da akım değeri 18 A’in altında olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

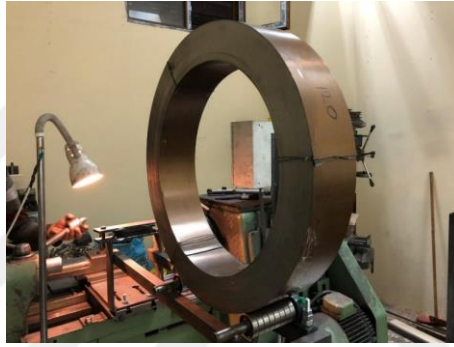
**Tablo 4.2.** TORUS motor optimizasyon sonuçları

| Parametre Adı                             | GA Sonuçları | PSO Sonuçları | Optimizasyon Sonuçlarının Ansys Maxwell Üzerindeki Doğrulama Sonuçları | Ansys Maxwell Optimizasyon Sonuçları |
|-------------------------------------------|--------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Çıkış Gücü (W)                            | 4000         | 4000          | 4000                                                                   | 4001.39                              |
| Moment (Nm)                               | 95.4930      | 95.4919       | 95.5093                                                                | 95.526                               |
| Faz Akımı (A)                             | 14           | 19.19         | 18                                                                     | 16                                   |
| Verim (%)                                 | 92.62        | 91.8511       | 87.1495                                                                | 93.0460                              |
| Stator Dış Çap (mm)                       | 250          | 290           | 250                                                                    | 250.175                              |
| Rotor Dış Çap (mm)                        | 250          | 290           | 250                                                                    | 250.175                              |
| Stator İç Çap (mm)                        | 127          | 172           | 127                                                                    | 144.439                              |
| Rotor İç Çap (mm)                         | 127          | 172           | 127                                                                    | 144.439                              |
| Stator Oluk Uzunluğu (mm)                 | 25           | 27.05         | 25                                                                     | 27.322                               |
| Stator Oluk Ağız Genişliği (mm)           | 4            | 4             | 4                                                                      | 3.52962                              |
| Mıknatıs Kalınlığı (mm)                   | 5            | 5             | 5                                                                      | 5.74743                              |
| Embrance (%)                              | 0.99         | 0.97          | 0.99                                                                   | 0.781884                             |
| Tel Çapı (mm)                             | 1            | 1             | 1                                                                      | 1                                    |
| Stator Dişi Akı Yoğunluğu (Tesla)         | 1.6          | 1.6           | 1.11889                                                                | 1.37925                              |
| Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (Tesla)   | 1.6          | 1.6           | 1.82962                                                                | 1.93646                              |
| Rotor Boyunduruk Akı Yoğunluğu (Tesla)    | 1.6          | 1.6           | 2.00609                                                                | 1.83109                              |
| Hava Aralığı Akı Yoğunluğu (Tesla)        | 0.99         | 0.99          | 0.736554                                                               | 0.851925                             |
| Sargı Akım Yoğunluğu (A/mm <sup>2</sup> ) | 5            | 5             | 5.78885                                                                | 4.77836                              |

## 5. TORUS MOTORUN ÜRETİMİ

TORUS motorun üretimi uzun ve zorlu bir süreçtir. Motorun statorunun üretimi radyal akılı motorlardaki gibi kolay değildir. Ayrıca motor mıknatısları Türkiye’ de bulunmamaktadır. Bu nedenle mıknatıslar yurtdışından temin edilmektedir. Dolayısıyla mıknatısların temin edilme süreci uzun sürmektedir. Eksenel akılı motorların mıknatısları oldukça güçlü mıknatıslar olmaktadır bu nedenle motor montajı da oldukça zordur.

Eksenel akılı motorlarda stator, silisli sacların rulo şeklinde sarılmasıyla oluşturulur. Dolayısıyla silisli sac da rulo şeklinde satın alınır. Satın alınan silisli sacın tipi M470-50A’dır. Şekil 5.1’de alınan rulo halinde silisli sac görülmektedir.



Şekil 5.1. Rulo şeklindeki silisli sac

Statorun sarılması için bir düzenek ve stator için kalıp yapılmıştır. Düzenek ve stator kalıbı Şekil 5.2’de görülmektedir.



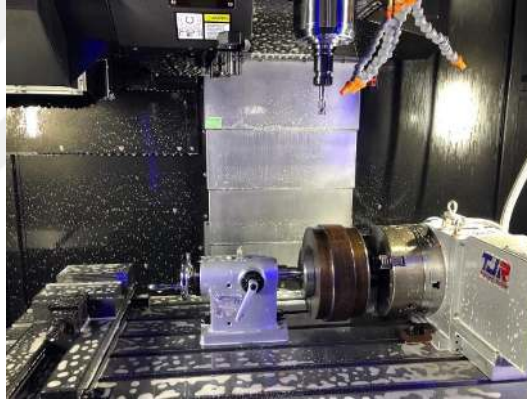
Şekil 5.2. Stator sarım aparatı

Sarılan stator Şekil 5.3’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.3.** Sarılmış stator

Sarılan statorun oluklarının açılması işlemi de oldukça zor bir işlemdir. Normal şartlarda tel erezyon yöntemiyle olukların açılması gerekirken, bu işlem oldukça maliyetli olduğu için 3 eksenli CNC ile oluk açma işlemi gerçekleştirilmiştir. Statorun CNC de oluk açma işlemi Şekil 5.4’de görülmektedir.



**Şekil 5.4.** CNC ile oluk açma işlemi

Olukları açılan statora sargı sarımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’de sargıları sarılmış stator görülmektedir.



**Şekil 5.5.** Sargıları sarılmış stator

TORUS motorun mıknatısları Türkiye de bulunmadığı için Çin'den getirilmiştir. Mıknatıslar  $25^\circ$  lik açıya sahiptir. Yani  $25^\circ$  kaykıya sahiptir. Mıknatıs Şekil 5.6'da görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.6.** Mıknatıs

Mıknatıslar yapıştırıldıktan sonra iki rotor da son halini almıştır. Şekil 5.7'de bir rotorun son hali görülmektedir. Mıknatıslar iki rotora simetrik olarak yapıştırılmıştır. Yani aynı kutba sahip mıknatıslar karşılıklı olarak yerleştirilmiştir.



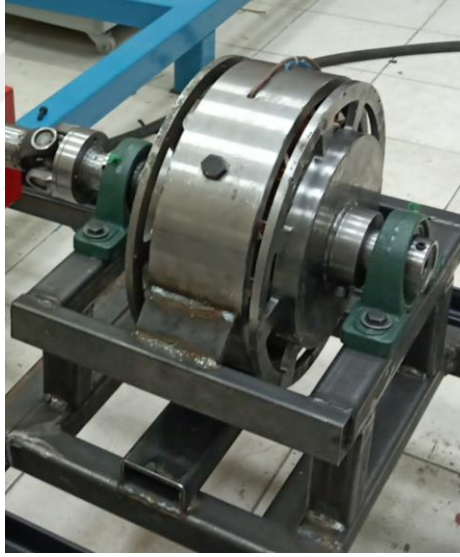
**Şekil 5.7.** Rotor

Motor montaj işleminde ise bir kafesleme sistemi uygulanmıştır. Şekil 5.8'de görüldüğü gibi stator bir silindir kafes içine yerleştirilerek sabitlenmiştir. Motor milini yataklamak için ise kafesin sağ ve sol tarafına yataklı rulman monte edilmiştir.



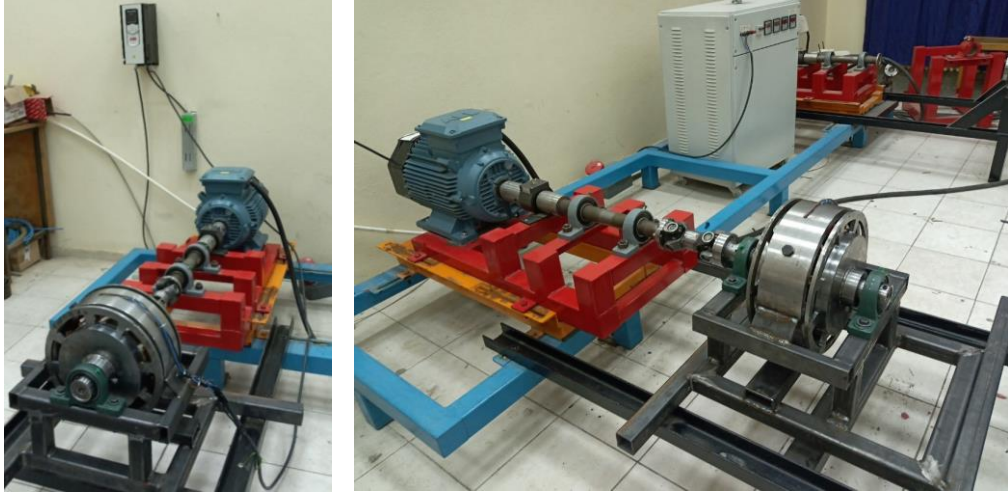
**Şekil 5.8.** Kafes içine sabitlenmiş stator

Motor mili yataklanarak her iki tarafa rotorlar yerleştirildi. Rotorlar ile stator arasındaki hava aralığı ayarlanarak rotorlar mile açılan yuvalardan civatalar ile sabitlenmiştir. Motor montajının son hali Şekil 5.9’da görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.9.** TORUS motor

TORUS motor test aşaması için test yatağı hazırlanmıştır. Test yatağı Şekil 5.10’da görüldüğü gibidir. Motor sürücüsü olarak ABB marka ACS880 kodlu 5.5 kW’lık sürücü kullanılmıştır. Motoru yüklemek için ise Şekil 5.10’da görüldüğü gibi asenkron motor kullanılmıştır.



Şekil 5.10. TORUS motor test düzeneği

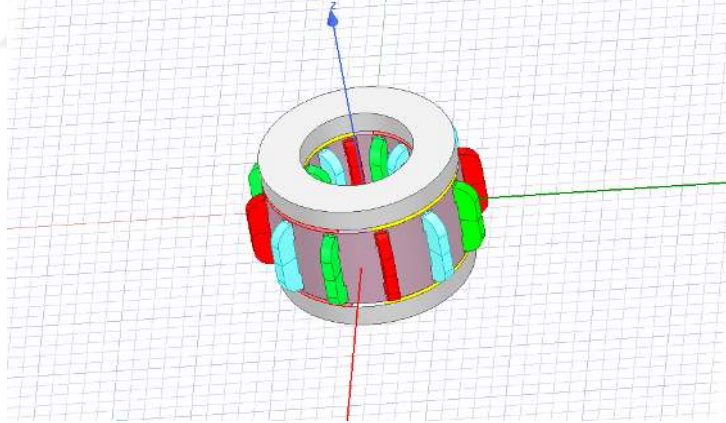
## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektrik motorlarında sonlu elemanlar analizi programı olarak kullanılan ANSYS Maxwell programı ile TORUS motorun elektromanyetik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 3 ayrı motor tasarımı sonuçları yer almaktadır. Alınan analiz sonuçları sonucunda elde edilen bulgular detaylı olarak Bölüm 6.1’ de açıklanmaktadır.

### 6.1. TORUS Motor 3D Elektromanyetik Analiz Sonuçları

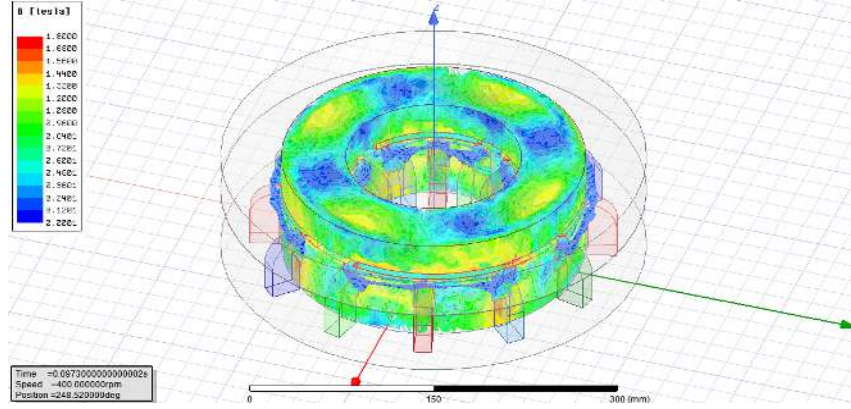
Eksenel akıllı motorların manyetik analizi yapılarından dolayı sadece üç boyutlu olarak yapılabilir. Radyal akıllı motorlarda simetrik kesit olduğu için kesit alınabiliyorken eksenel akıllı motorlarda bu durum söz konusu değildir. Bu durum hem tasarım hem analiz sürecini uzatmaktadır. Ancak yine de motoru üç boyutlu simetrik parçalara ayırarak analiz süresi kısaltılabilmektedir.

ANSYS Maxwell programının RMXprt modülünde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının sonucunda elde edilen model 3 boyuta aktararak çözümleme yapılmıştır. Motorun ANSYS Maxwell 3D modülünde çizilmiş modeli Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



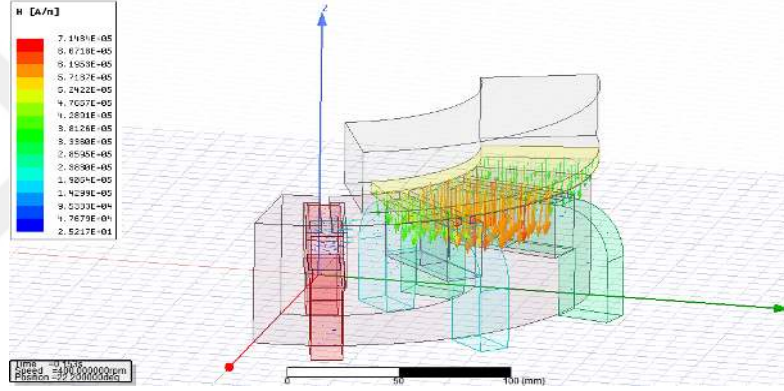
Şekil 6.1. TORUS motor 3D çizimi

ANSYS 3 boyut analizde tam motor analizi uzun zaman aldığından dolayı motorun yarısı üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2’de motorun manyetik akı yoğunluğu verilmiştir ve görüldüğü gibi motorda doyum meydana gelmemiştir.



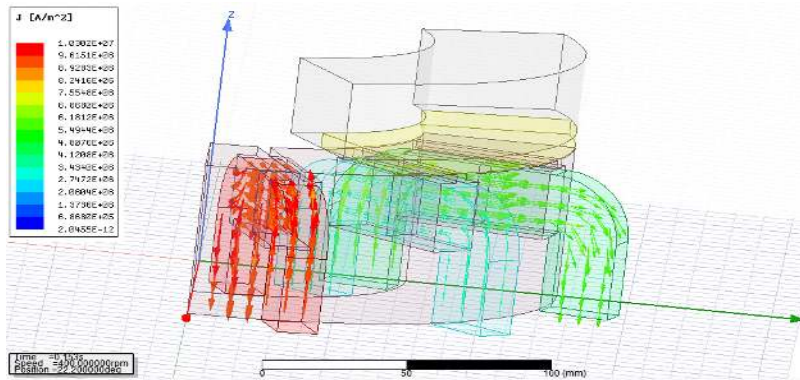
Şekil 6.2. TORUS motor manyetik akı yoğunluğu

Motor modelindeki N mıknatısının manyetik akı yönü Şekil 6.3’de gösterildiği gibidir. S mıknatısının manyetik akı yönü ise N mıknatısının yönünün tam tersidir.



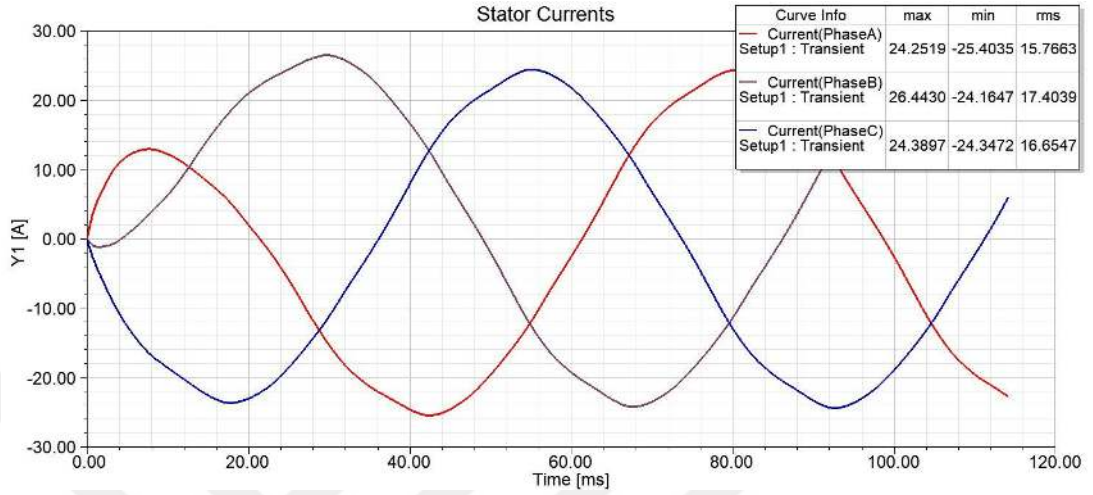
Şekil 6.3. Mıknatıs manyetik akı yönü

Motor modelindeki A, B, C fazlarındaki sargıların akım yönleri Şekil 6.4’de gösterilmektedir. A ve B fazlarındaki akımların yönü aynı C fazındaki akım yönü ise A ve B fazındaki akım yönlerinin tam tersidir.



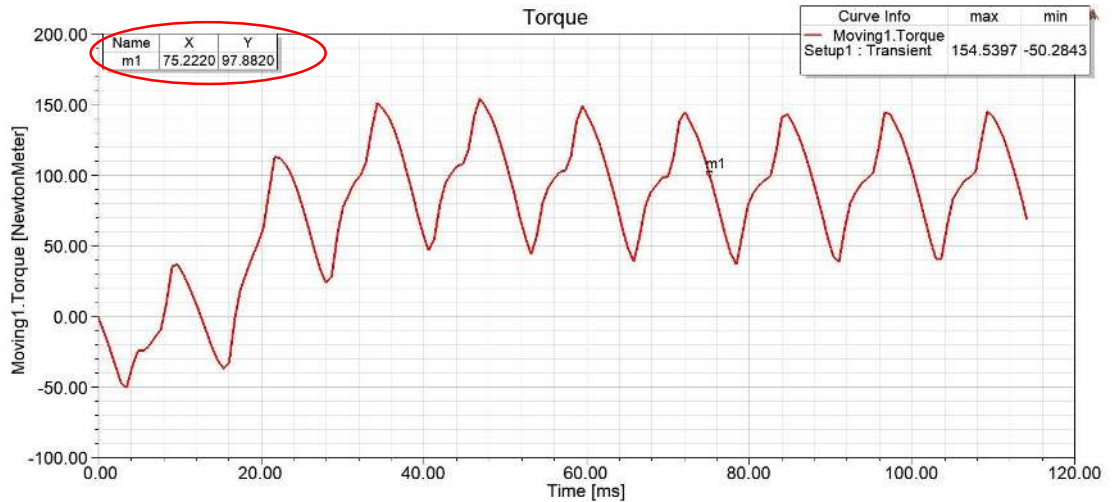
Şekil 6.4. Sargı akım yönleri

Motor analizi sonucu elde edilen akım değişimi Şekil 6.5’de görüldüğü gibidir. Rms akım değeri ise yaklaşık 16 – 17 A bandındadır. Motor akımı GA optimizasyon çalışmasına göre yaklaşık olarak 14 A civarında çıkması gerekmektedirken akım beklenen değerin üstünde çıkmıştır.



Şekil 6.5. Motor akımlarının değişimi

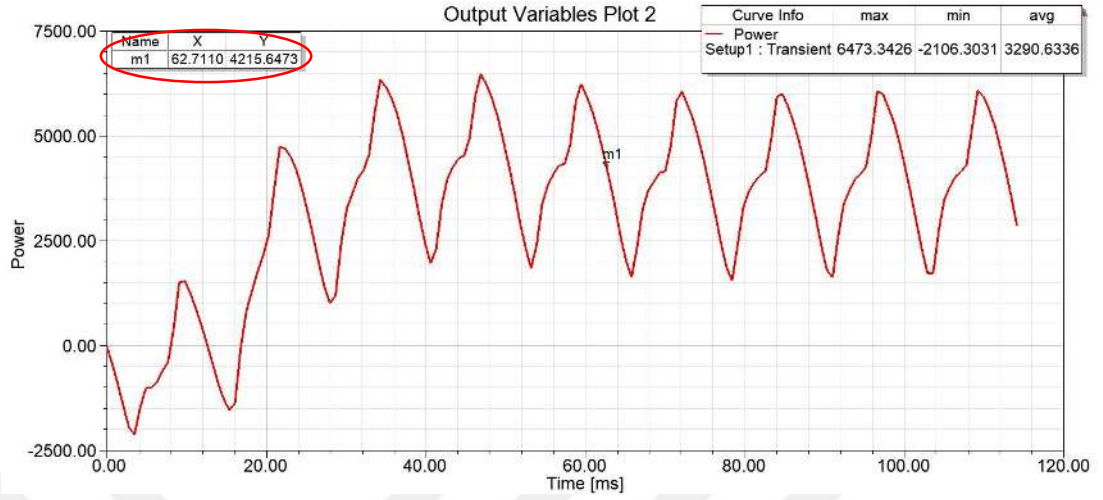
Motor analizi sonucundan elde edilen moment değeri Şekil 6.6’da m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve değer daire içine alınmıştır. Moment değeri 97.8820 Nm çıkmıştır. Motordaki moment dalgalanmaları vuruş momentinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Vuruş momentini azaltmak için mıknatıslarda kaydırma işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar alınmıştır. Üretim kaydırılmış mıknatıslara göre yapılmıştır.



Şekil 6.6. Motor moment değişimi

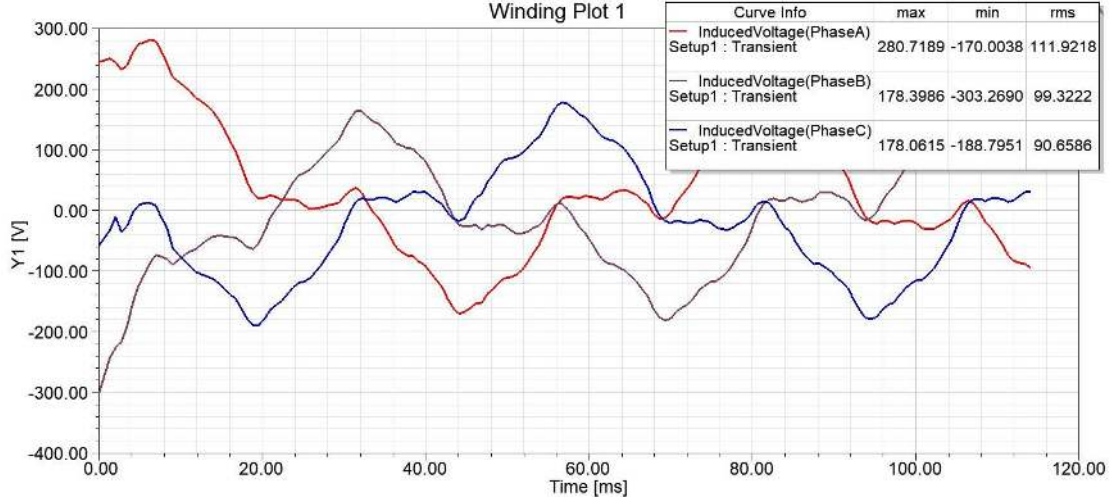
Motor analizi sonucunda elde edilen çıkış gücü Şekil 6.7’ de m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve daire içine alınmıştır. Motor çıkış değeri 4215.6473 W çıkmıştır. Motor çıkış gücünde motor

momenti gibi yüksek dalgalanmaya sahiptir. Bu sorun mıknatıs kaydırma işlemi gerçekleştirildikten sonra düzelmiştir.



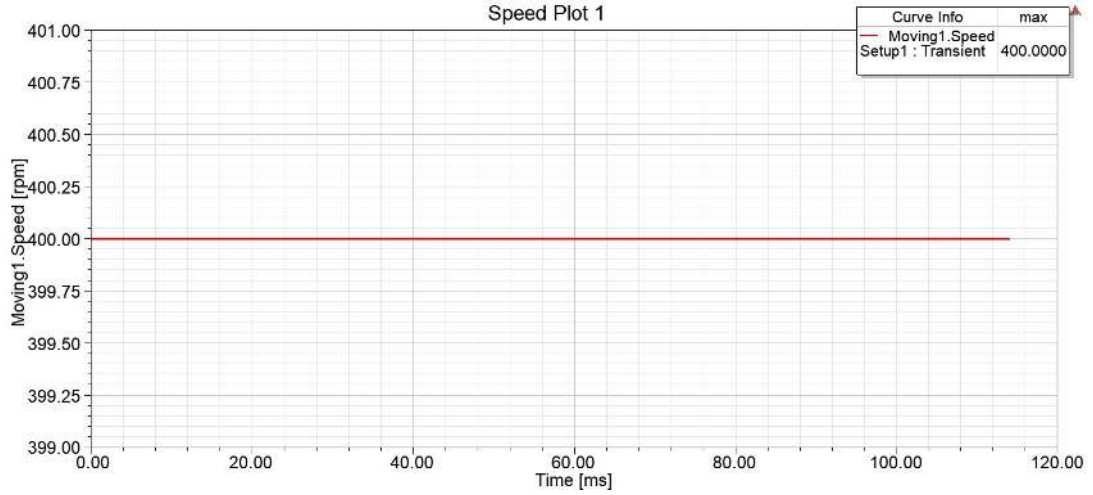
Şekil 6.7. Motor güç değişimi

Motor analizi sonucunda elde edilen fazlarında endüklenen gerilimlerin değişimi Şekil 6.8’de gösterildiği gibidir. Gerilim grafiğinin de dalgalanması yüksektir. Bu durum yine vuruğu momentinin yüksek olmasıyla ilgilidir.



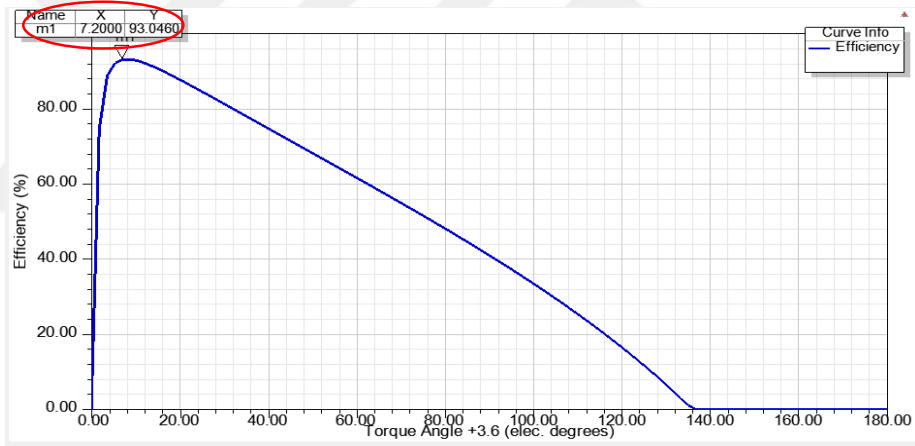
Şekil 6.8. Motor fazlarında endüklenen gerilimlerin değişimi

Motor hız değişimi ise Şekil 6.9’da gösterildiği gibidir ve değeri 400 rpm de sabittir. ANSYS Maxwell analiz programında motor sürücüsü motorun sabit hızla hareket etmesi için ayarlanmıştır. Bu nedenle motor hızı her sn’de sabittir.



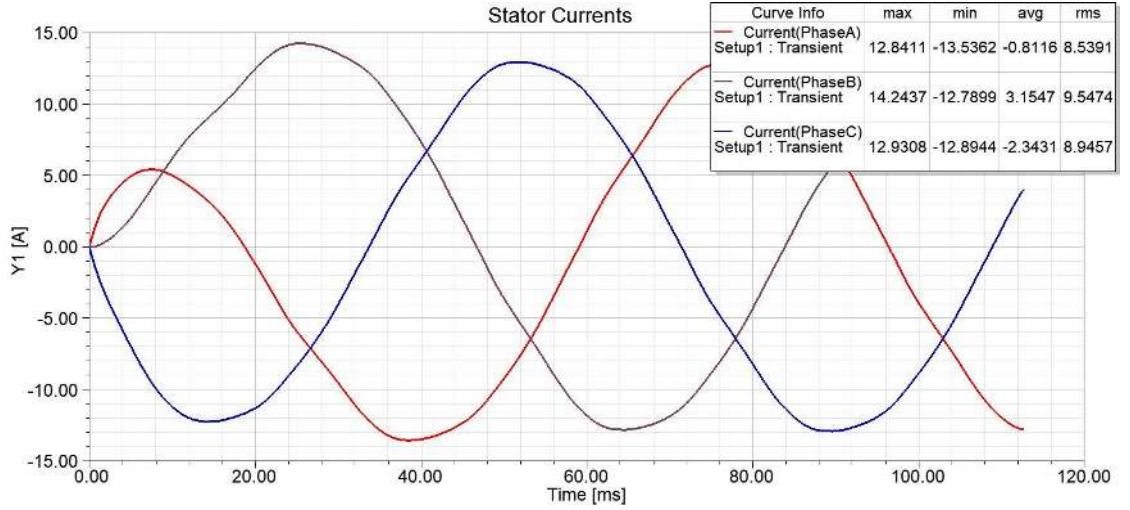
Şekil 6.9. Motor hız değişimi

Motor analizi sonucunda elde edilen verim değeri Şekil 6.10'da m1 işaretlemesiyle gösterilmiş ve daire içerisine alınmıştır. Elde edilen motor verimi % 93.0460' tır.



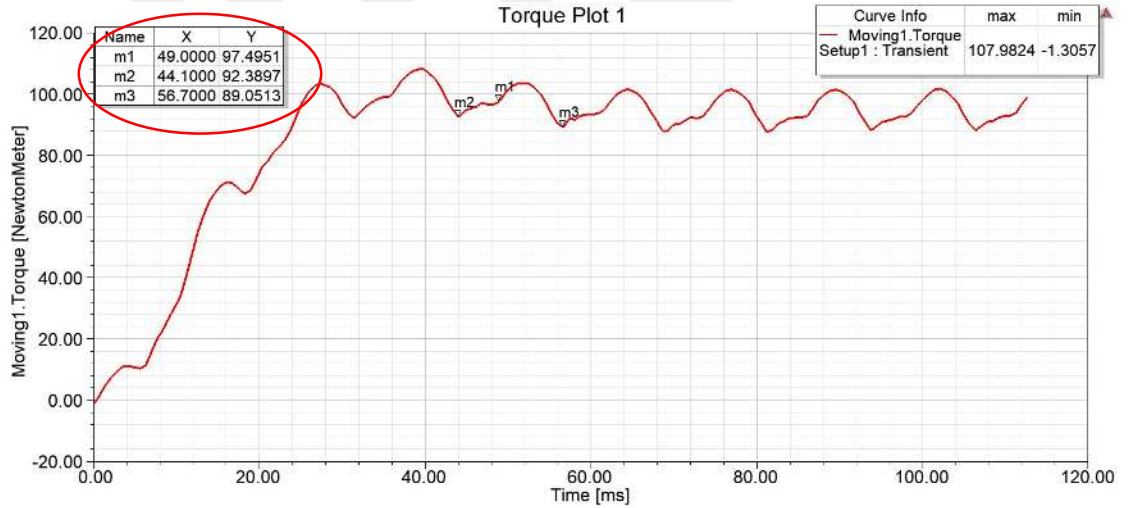
Şekil 6.10. Motor verimi

Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi akım, moment ve güç değerlerinde istenilmeyen dalgalanma meydana gelmiştir. Bu dalgalanmaları azaltmak için mıknatıslara sırayla 5, 10, 15, 20, 25 derecelik kaydırma işlemi gerçekleştirilmiştir. En uygun derecenin ise 25 derece olduğu görülmüştür. Bu nedenle motor mıknatıslarına 25 derecelik kaydırma işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda akım, moment ve güç değerlerinde düzelmeler meydana gelmiştir. Şekil 6.11'de motor akım değişimi verilmiştir, görüldüğü gibi akım rms değeri düşerek 8 – 9 A bandına geçmiştir ve akım dalgalılığı ortadan kalkmıştır.



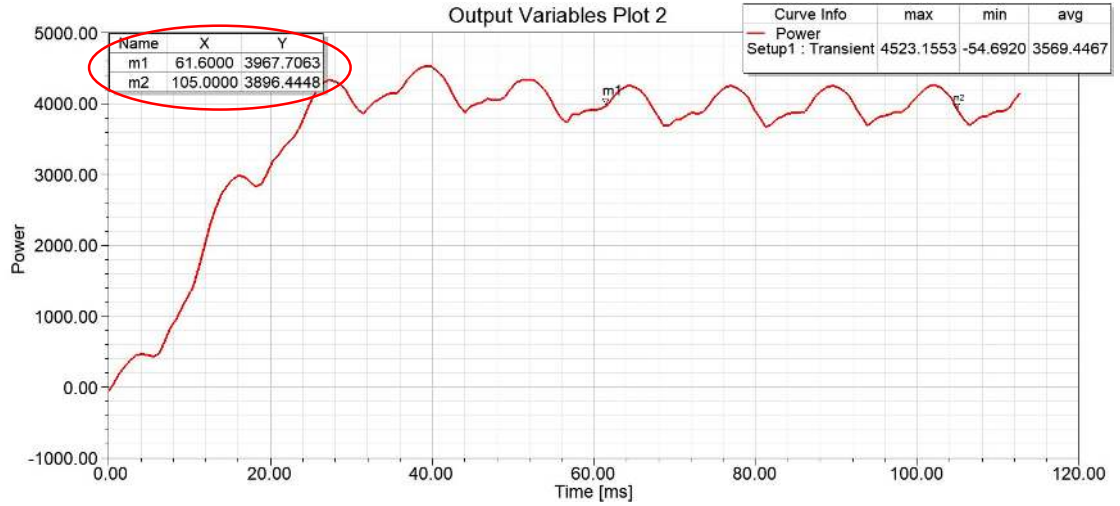
Şekil 6.11. Stator akımları değişimi

Motor moment değişimi Şekil 6.12’de görüldüğü gibidir. Motor mıknatıslarının 25 derece kaydırılması sonucunda moment dalgalanmaları düzelerek, grafik daha düzgün bir hal almıştır ve moment değeri m1 işaretlemesiyle gösterilmiştir. Moment değeri yaklaşık olarak 97.4951 Nm’ dir.



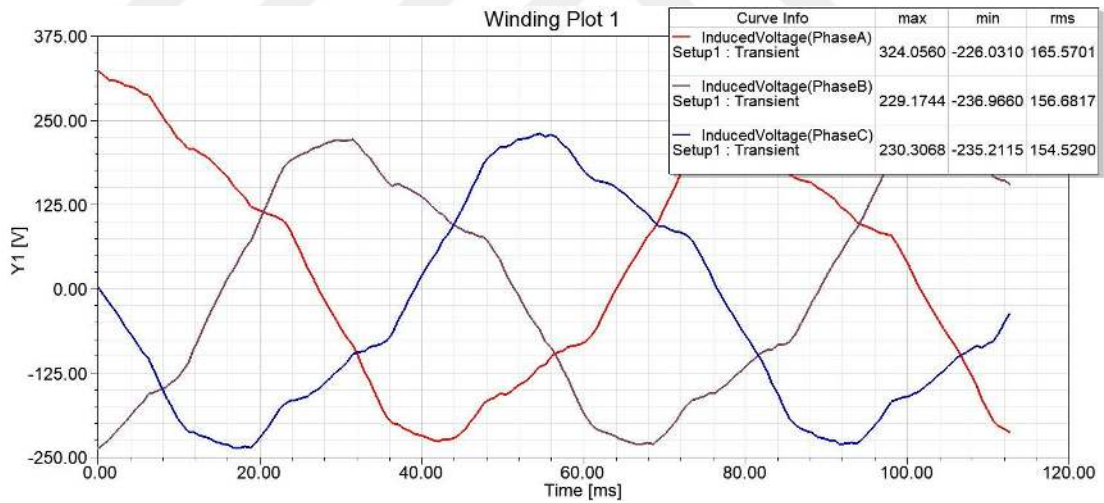
Şekil 6.12. Motor moment değişimi

Motor güç değişimi Şekil 6.13’de görüldüğü gibidir. Motor mıknatıslarının 25 derece kaydırılması sonucunda motor çıkış gücündeki dalgalanmalar azalarak daha düzgün bir hal almıştır. Çıkış gücü değeri m1 işaretlemesiyle gösterilmiştir. Çıkış gücü değeri ise yaklaşık olarak 3967.7063 W’ dır.



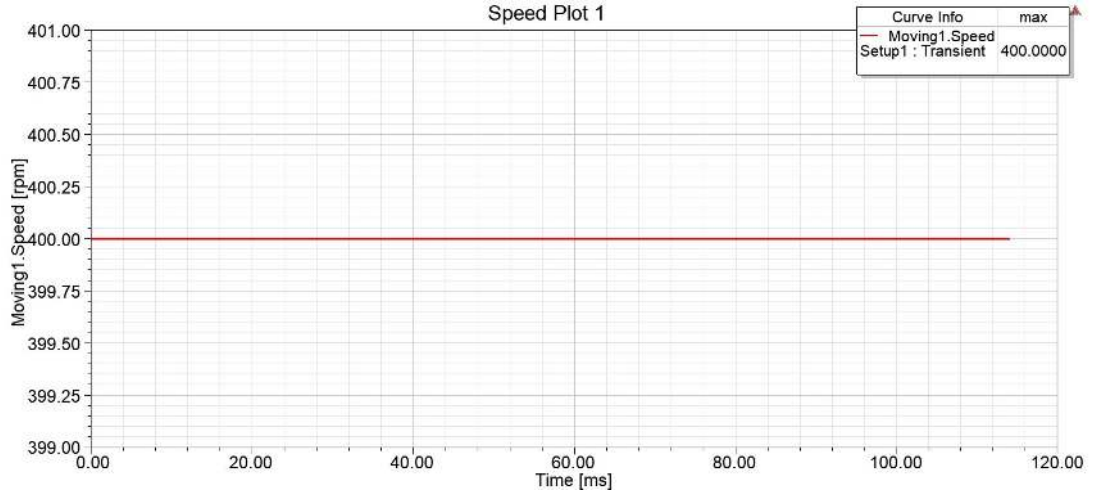
Şekil 6.13. Motor güç değişimi

Motor fazlarında endüklenen gerilim değişimi Şekil 6.14’de görüldüğü gibidir. Motor mıknatısındaki 25 derecelik kaydırma işleminden sonra diğer değerlerde oluşan iyileşme endüklenen gerilimde de gözlemlenmektedir.



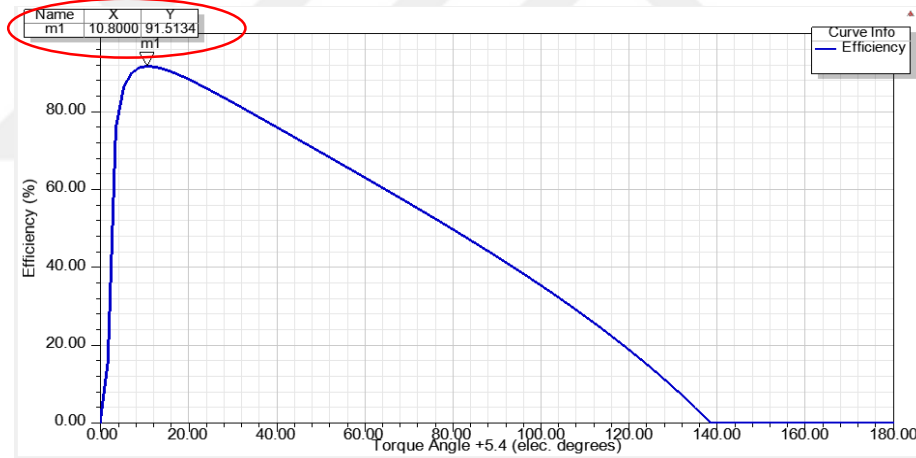
Şekil 6.14. Motor fazlarında endüklenen gerilimlerin değişimi

Motor hız değişimi Şekil 6.15’de görüldüğü gibidir. Hız değeri sabit ve 400 rpm’ dir. Önceki analizde motor sürücüsünde yapılan sabit hız ayarlaması bu analizde de yapılmıştır.



Şekil 6.15. Motor hız değişimi

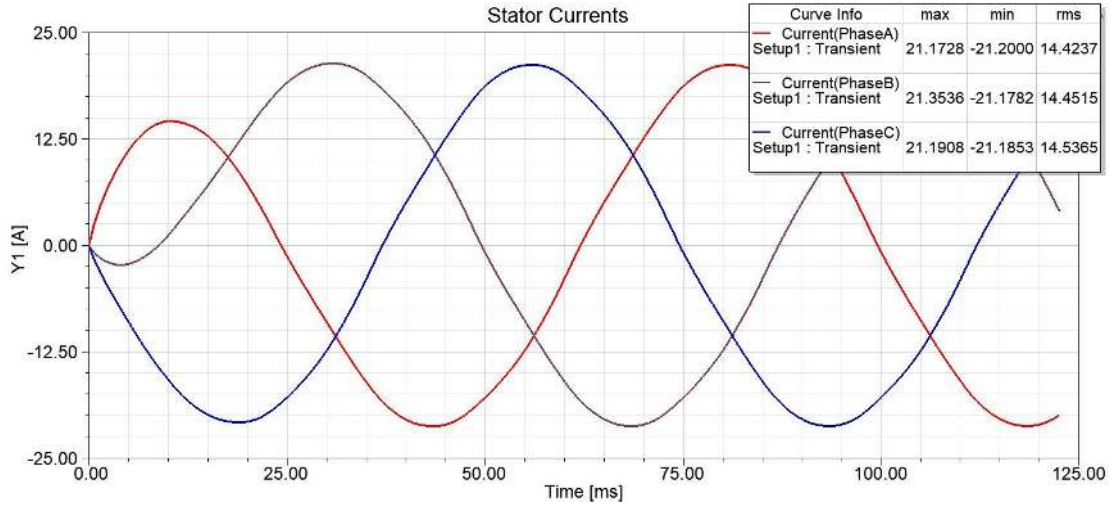
Motor verimi Şekil 6.16’da görüldüğü gibidir. Motor mıknatıslarının 25 derece kaydırma işleminden sonra motor veriminin düştüğü gözlemlenmektedir önceki analizde motor verimi %93.0460 iken yeni analizde motor verimi % 91.5434 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.16. Motor verimi

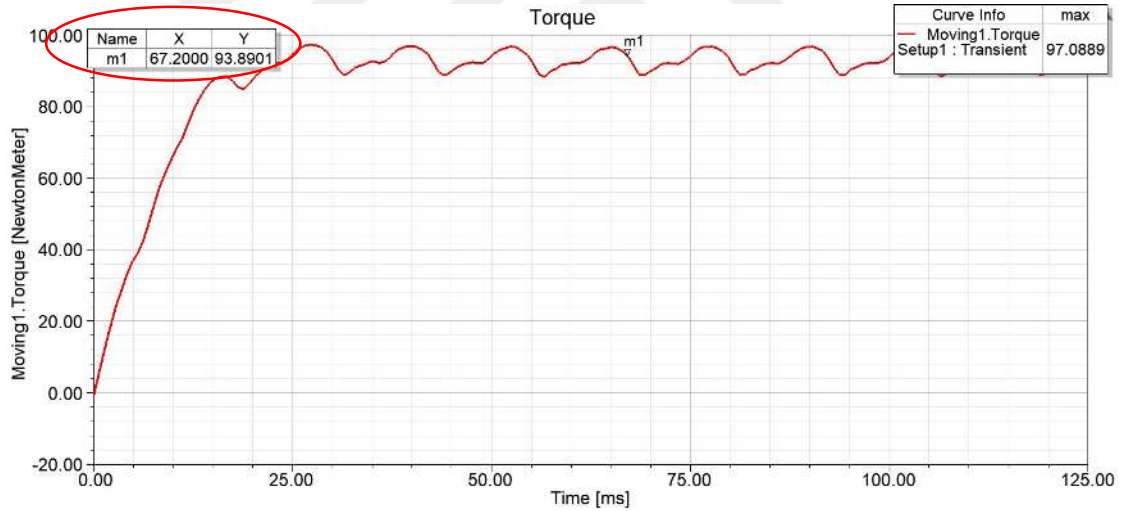
Son yapılan analiz sonucunda motor üretiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ancak yapılan tasarımda oluk şekli dikdörtgen oluk yapısındadır. Dolayısıyla tasarlanan statorun oluk yapısı CNC tornalama ile elde edilemeyeceği için yeni oluk yapısına göre tasarım yenilenmiştir. Dikdörtgen şeklinde olan oluk yapısı oval oluk yapısına dönüştürülerek tekrar analizler gerçekleştirilerek sonuçlar alınmıştır.

Üretimi yapılan motorun akım değişimi Şekil 6.17’de görüldüğü gibidir. Yeni oluk yapısına göre motor akımının değeri artmıştır. Motor akımının rms değeri 14 – 15 A bandındadır.



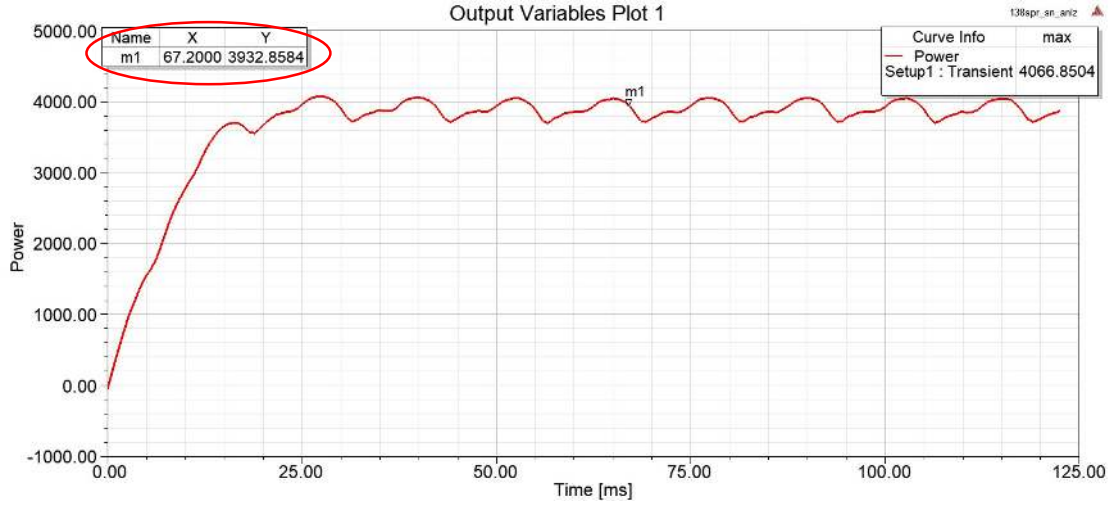
Şekil 6.17. Motor akımları değişimi

Motor moment değişimi Şekil 6.18’de görüldüğü gibidir. m1 işaretlemesiyle gösterilen değer motorun ortalama momentini vermektedir. Yeni tasarımda motor momentinin düştüğü görülmektedir. Motorun ortalama moment değeri 93.8901 Nm’dir.



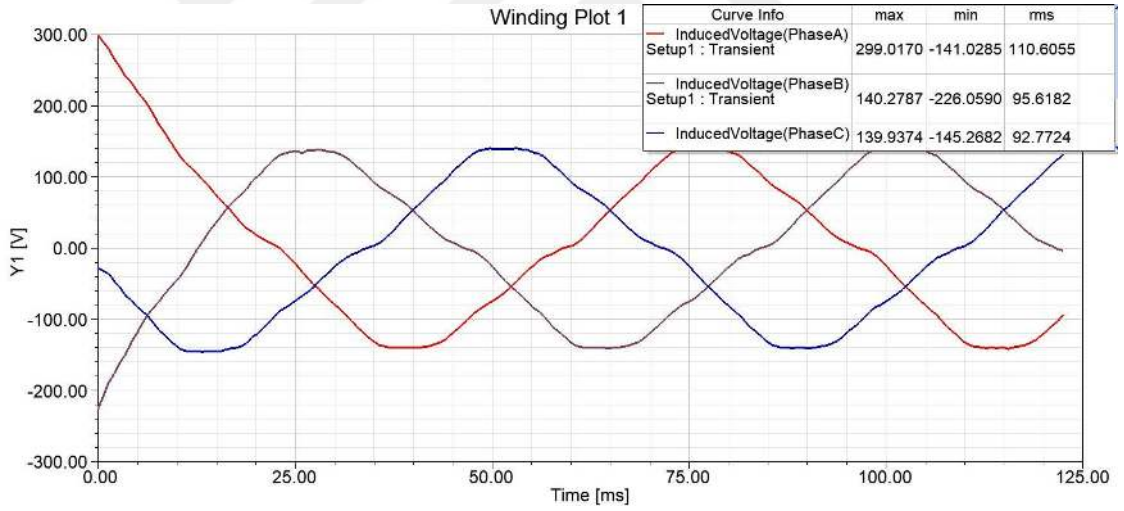
Şekil 6.18. Motor moment değişimi

Motor çıkış gücünün değişimi Şekil 6.19’da görüldüğü gibidir. m1 işaretlemesi ile gösterilen değer motorun ortalama güç değeridir. Motorun çıkış gücü 3932.8584 W’tır.



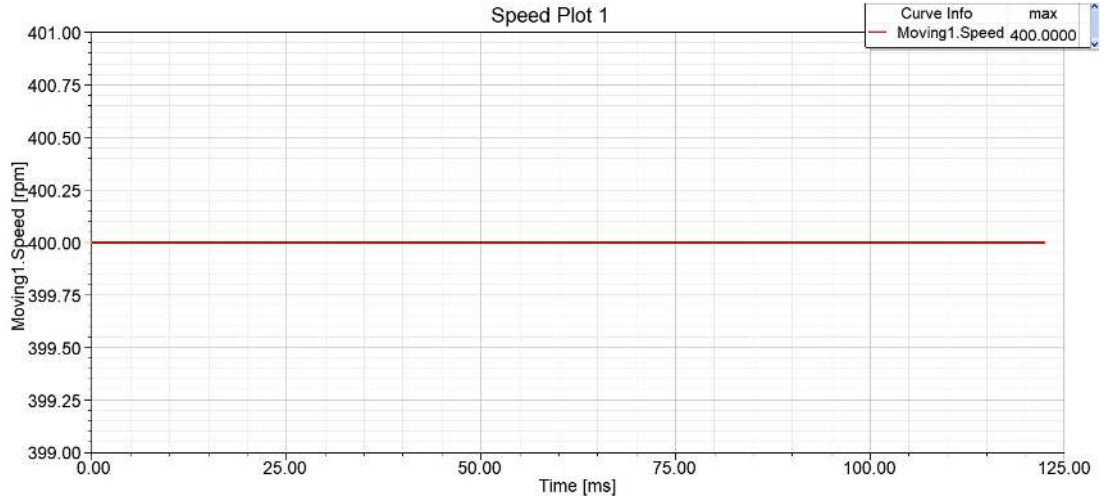
Şekil 6.19. Motor çıkış gücü değişimi

Motorun fazlarında endüklenen gerilimlerinin değişimi Şekil 6.20’de görüldüğü gibidir. Diğer analiz çalışmalarına göre daha düzgün bir gerilim grafiği elde edilmiştir. Yeni stator oluk yapısı gerilim grafiğinde iyileşmeye neden olmuştur.



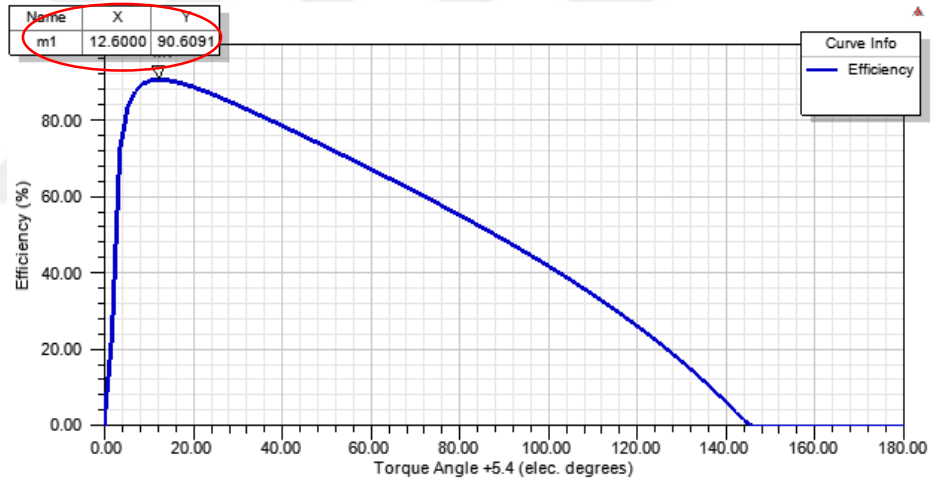
Şekil 6.20. Motor fazlarında endüklenen gerilim değişimi

Motor hız değişimi Şekil 6.21’de görüldüğü gibidir. Hız değeri sabit ve 400 rpm’dir. Önceki analizlerde olduğu gibi sürücü sabit hız modunda çalıştırılmıştır.



Şekil 6.21. Motor hız değişimi

Motor verimi Şekil 6.22’de görüldüğü gibidir. Motor verimi %90.6091’dir. Motor verimi yeni oluk yapısından sonra düşmüştür.



Şekil 6.22. Motor verimi

Üretilmek için tasarlanan motorda elde edilebilecek en iyi değerler elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre motor verimi oluk yapısı ile doğrudan ilişkilidir.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının hedefi eksenel akılı sabit mıknatıslı motor sınıfından olan TORUS motorun analitik tasarımı, optimizasyonu, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ve üretimi gerçekleştirmektir. Bu hedefler, çift rotorlu eksenel akılı motor tasarlanıp üretilerek gerçekleştirilmiştir.

Literatüre katkı olması açısından tez çalışmasında iki probleme çözüm aranmıştır. Bunlardan birincisi eksenel akılı motorlarda meydana gelen motor moment dalgalanması sorunudur. Pek çok uygulamada moment dalgalanması oldukça önem arz etmektedir. Tez çalışmasında tasarlanan TORUS motorun moment dalgalanması motor mıknatıslarına eğim verilerek önemli oranda düşürülmüştür. Bunun sonucunda motorun diğer çıkış verilerinde de iyileşme gözlemlenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ulusal ve uluslararası dergilerde yayınlanarak yerini alacaktır. İkincisi ise TORUS motorun fabrikasyon zorluklarıdır. Motor statorunun üretimi oldukça zordur. Bu zorluğu biraz olsun hafifletmek amacıyla stator için kalıp ve statorun sarımı için düzenek üretilmiştir. Bunun yanı sıra stator oluklarının açılması önemli bir problem teşkil etmektedir. Çünkü TORUS motorun oluk açım işlemi oldukça maliyetli ve zor bir işlemdir. Bu soruna çözüm üretmek adına oluk açma işlemi 3 eksenli CNC torna ile yapılmıştır.

Üretim süreci Elazığ'da yaşanan deprem ve dünya çapında ortaya çıkan pandemi nedeniyle gecikmelere uğramıştır. Dolayısıyla oluşan gecikmeler motor test sürecini de geciktirmiştir. Süreç içinde test sonucu gecikmelerden dolayı alınamamıştır ancak çalışma TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek 118E943 nolu proje ile desteklenmiş olup ve proje süreci devam etmektedir. Motor test çalışması bu süreç içerisinde devam ederek sonuçlar alınacaktır.

## ÖNERİLER

Bu çalışmada, maliyet problemi nedeniyle belirlenen tasarım zorunlu nedenlerle üretilenmiştir. Bunun sebebi stator oluk yapısının CNC ile işlenememesinden kaynaklanmaktadır. Oluk yapısının değişimi motor verimini düşürmüştür. Bu nedenle tasarlanacak statorun ya oluk yapısının oval oluk yapısında olması ya da stator üretimine fazla bütçe ayrılması tavsiye edilmektedir.

Fabrikasyon zorlukları nedeniyle zaman kaybı yaşanmıştır. İlerleyen süreçte eksenel akılı motorların üretimi yaygınlaştıkça fabrikasyon zorluklarının azalacağı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra motor hava aralığının tekrar fabrikasyon zorlukları nedeniyle ayarlanması zor olmuştur. Motor hava aralığının daha rahat ayarlanabilmesi için ayrı bir sistem tasarlanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Taran, N., Ardebili, M. (2014). A novel approach for efficiency and power density optimization of an Axial Flux Permanent Magnet generator through genetic algorithm and finite element analysis, IEEE Int. Symp. Ind. Electron. 709–714. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864699>.
- [2] Ordóñez, H.S. (2015). Analysis and Design of Fault Tolerant Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors, <http://www.tdx.cat/handle/10803/286323>.
- [3] Vrtič, P. Vražić, M. Papa, G. (2016). Design of an axial flux permanent magnet synchronous machine using analytical method and evolutionary optimization, IEEE Trans. Energy Convers. 31 150–158. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2477319>.
- [4] Kahourzade, S., Gandomkar, A., Mahmoudi, A., Rahim, N.A., Hew, W.P., Uddin, M.N. (2013). Design optimization and analysis of AFPM synchronous machine incorporating power density, thermal analysis, and back-EMF THD, Prog. Electromagn. Res. 136 327–367. <https://doi.org/10.2528/PIER12120204>.
- [5] Eldoromi, M., Tohidi, S., Feyzi, M.R., Rostami, N., Emadifar, R., (2018). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine, Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci. 26 3084–3099. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-402>.
- [6] Christophe, V., Deblecker, O., Lobry, J. (2016). Multiobjective Optimal Design of an Inverter Fed Axial Flux Permanent Magnet In-Wheel Motor for Electric Vehicles, Intech. i 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- [7] Yousefi, B., Shirazi, A.N., Soleymani, S., Gholamian, S.A., (2012). Genetic Algorithm Application for Optimum Design of Three Phases Disk Type PM Motor, 1–7.
- [8] Hwang, C.C., Li, P.L., Chuang, F.C., Liu, C.T., Huang, K.H. (2009). Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine, IEEE Trans. Magn. 45 1760–1763. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2012811>.
- [9] Gholamian, S.A., Ardebili, M., Abbaszadeh, K., Gholamian, S.A., (2011). Optimum Design of Slotted Axial Flux Internal Stator Motor Using Genetic Algorithm for Electric Vehicle, Int. J. Softw. Eng. Appl. 2 79–93. <https://doi.org/10.5121/ijsea.2011.2306>.
- [10] Hippolyte, J.L., Espanet, C., Chamagne, D., Bloch, C., Chatonnay, P. (2008). Permanent magnet motor multiobjective optimization using multiple runs of an evolutionary algorithm, IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677611>.
- [11] Martin, R. (2007). Axial flux permanent magnet machines for direct drive applications, Doctoral Dissertation, Durham University. <http://etheses.dur.ac.uk/2567/>
- [12] Du-Bar, C. (2011). Design of an axial flux machine for an in-wheel motor application, Chalmers Reproservice, Göteborg. 1–2. <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/DubarChristian.pdf>.
- [13] Yang, Y.P., Shih, G.Y., (2016). Optimal design of an axial-flux permanent-magnet motor for an electric vehicle based on driving scenarios, Energies. 9 <https://doi.org/10.3390/en9040285>.
- [14] Gottipati, P. (2007). Comparative Study on Double-Rotor PM Brushless Motors With Cylindrical and Disc Type Slot-Less Stator, LSU Master Thesis, Graduate School [http://digitalcommons.lsu.edu/gradschool\\_theses](http://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses)
- [15] Mahmoudi, A., Ping, H.W., Rahim, N.A. (2011). A comparison between the TORUS and AFIR axial-flux permanent-magnet machine using finite element analysis, IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2011. 242–247. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2011.5994853>.

- [16] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A. (2001). TORUS concept machines: Pre-prototyping design assessment for two major topologies, Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc. 3 1619–1625. <https://doi.org/10.1109/ias.2001.955751>.
- [17] Rahman, K.M., Patel, N.R., Ward, T.G., Nagashima, J.M., Caricchi, F., Crescimbeni, F. (2006). Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system, IEEE Trans. Ind. Appl. 42 1185–1192. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.880886>.
- [18] Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A. (2004). Axial flux permanent magnet disc machines: a review, Res. Rep. 61–71.
- [19] Jagiela, M., Mendrela, E.A., Wrobel, R. (2005). Current control for the smoothing of torque in a single-phase permanent-magnet disc motor using 3-D FEM, Electr. Eng. 87 191–196. <https://doi.org/10.1007/s00202-004-0236-4>.
- [20] Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A. (2001). Design and 3D electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted permanent magnet disc machines, IEMDC 2001 - IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. 645–651. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2001.939382.w>
- [21] Bohlmann, M.A. (1986). Permanent Magnet Materials., J. Met. 38 37–40.
- [22] Deng, Q.L., Xiao, F., Huang, W.T. (2010). Design of new-type axial flux permanent magnet in-wheel machine, Proc. - Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2010. 5831–5834. <https://doi.org/10.1109/ICECE.2010.1463>.
- [23] Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Ping, H.W., Gandomkar, A. (2013). Design optimization and analysis of AFPM synchronous motor considering electrical and thermal parameters, 1st Int. Futur. Energy Electron. Conf. IFEEC 2013. 562–567. <https://doi.org/10.1109/ifeec.2013.6687569>.
- [24] Libert, F. (2004) Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer. <http://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1338064112.6994pmsg.pdf>.
- [25] Maia, T.A.C., Faria, O.A., Cardoso, A.A.R.F.E., Borges, F.S., Mendonça, H.G., Silva, M.A., Vasconcelos, J.A., Silva, S.R., Lopes, B.M. (2011). Electromechanical design for an optimized axial flux permanent magnet torus machine for 10kW wind turbine, 2011 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2011. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073323>.
- [26] Neethu, S., Shinoy, K.S., Shajilal, A.S. (2011). FEA- aided design, optimization and development of an axial flux motor for implantable ventricular assist device, World Acad. Sci. Eng. Technol. 73 93–97. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1055532>.
- [27] Fasil, M., Mijatovic, N., Jensen, B.B., Holboll, J. (2016). Finite-Element Model-Based Design Synthesis of Axial Flux PMBLDC Motors, IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2537743>.
- [28] Gholamian, S.A., Yousefi, A. (2010). Power density comparison for three phase non-slotted double-sided AFPM motors, J. Appl. Sci. Res. 6 5947–5955.
- [29] Gholamian, S.A., Ardebili, M., Abbaszadeh, K. (2011). Selecting of Slotted AFPM Motors with High Torque Density for Electric Vehicles, 2 1–7.
- [30] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A. (2001). Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted permanent magnet machines, Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc. 3 1603–1610. <https://doi.org/10.1109/ias.2001.955749>.
- [31] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A. (2001). TORUS concept machines: Pre-prototyping design assessment for two major topologies, Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc. 3 1619–1625. <https://doi.org/10.1109/ias.2001.955751>.

- [32] Howey, D.A. (2010). Thermal design of air-cooled axial flux permanent magnet machines, 195. <http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.513640>.
- [33] Wang, R.J. (2003). Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator.
- [34] Montecinos, W.E.J. (2016). Axial Flux Permanent Magnet Machines, Springer Science & Business Media.
- [35] Arslan, S., Kurt, E., Akizu, O., Lopez-Guede, J.M. (2018). Design optimization study of a torus type axial flux machine, J. Energy Syst. 43–56. <https://doi.org/10.30521/jes.408179>.
- [36] Mirzahosseini, R., Darabi, A., Assili, M. (2019). An analytical formula for selecting the feeding voltage and frequency in a TORUS-type nonslotted axial flux permanent magnet machine design, Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci. 27 2295–2308. <https://doi.org/10.3906/elk-1804-45>.
- [37] Hubmann, E.J., Bortis, D., Flankl, M., Kolar, J.W., Granegger, M., Hubler, M. (2019). Optimization and Calorimetric Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Motor for Implantable Blood Pump Assisting the Fontan Circulation, 2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921580>.
- [38] Friedrich, L.A.J., Gysen, B.L.J., Jansen, J.W., Lomonova, E.A. (2020). Analysis of Motional Eddy Currents in the Slitted Stator Core of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine, IEEE Trans. Magn. 56 <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2953625>.
- [39] Jung, T. (2013). Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator and Motor, 18, U.S. Patent Application No 13/522,206.
- [40] Le, W., Lin, M., Jia, L., Ai, J., Fu, X., Chen, Z. (2019). Multi-Objective Optimization of an Air-Cored Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine with Segmented PMs based on Support Vector Machine and Genetic Algorithm, 2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922465>.
- [41] Tesla, N. (1889). Electro-Magnetic Motor, 24–26, U.S. Patent No. 382,279. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [42] Hüner, E. (2012). Toroidal sargılı açık oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı NN tip motor tasarımı ve uygulaması, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] Deodhar, R.P., Staton, D.A., Jahns, T.M. (1996). Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique, IEEE Trans. Ind. Appl. 32 569–576. <https://doi.org/10.1109/28.502168>.
- [44] Zhu, Z.Q., Ruangsinchaiwanich, S., Chen, Y., Howe, D. (2006). Evaluation of superposition technique for calculating cogging torque in permanent-magnet brushless machines, IEEE Trans. Magn. 42 1597–1603. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.861831>.
- [45] Letelier, A.B., González, D.A., Tapia, J.J.A., Wallace, R., Valenzuela, M.A. (2007). Cogging torque reduction in an axial flux PM machine via stator slot displacement and skewing, IEEE Trans. Ind. Appl. 43 685–693. <https://doi.org/10.1109/TIA.2007.895738>.
- [46] Jurisch, F., (DE) H. (2005). Shell-Shaped Magnet. U.S. Patent No. 6,873,077. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [47] Castillo, R., Cañedo, J.M. (2008). A 2-D finite-element formulation for unambiguous torque calculation, IEEE Trans. Magn. 44 373–376. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.914649>.
- [48] González, D.A., Tapia, J.A., Bettancourt, A.L. (2007). Design consideration to reduce cogging torque in axial flux permanent-magnet machines, IEEE Trans. Magn. 43 3435–3440. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.899349>.

- [49] Caricchi, F., Capponi, F.G., Crescimbeni, F., Solero, L. (2004). Experimental study on reducing cogging torque and no-load power loss in axial-flux permanent-magnet machines with slotted winding, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 40 1066–1075. <https://doi.org/10.1109/TIA.2004.831273>.
- [50] Silaghi, H., Spoială, V. (2008). PM wind generator topologies, *J. Electr. Electron. Eng.* 1 125–129.
- [51] Zhu, Z.Q., Howe, D. (2000). Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines, *IEEE Trans. Energy Convers.* 15 407–412. <https://doi.org/10.1109/60.900501>.
- [52] Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A. (2006). Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 53 822–830. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.874268>.
- [53] Islam, M.S., Mir, S., Sebastian, T. (2004). Issues in Reducing the Cogging Torque of Mass-Produced Permanent-Magnet Brushless DC Motor, 40 813–820.
- [54] Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A. (2002). A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control, *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.* 2 1250–1257. <https://doi.org/10.1109/ias.2002.1042719>.
- [55] Küçükdeniz, T. (2009). Sürü Zekâsı Optimizasyon Tekniği ve Tedarik Zinciri Yönetiminde Bir Uygulama, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 26 - 48.
- [56] Rao, S.S. (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice*, Electronics Books, John Wiley & Sons, Canada,
- [57] Mutluer, M., Bilgin, O., Çunkaş, M. (2007). Parameter determination of induction machines by hybrid genetic algorithms, *Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. 4692 LNAI 116–124. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74819-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74819-9_15).
- [58] Emel, G.G., Taşkın, Ç. (2002). Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları, Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi. 21 129–152.

# ÖZGEÇMİŞ

**Rüya AKINCI**

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Doğum Yeri** : Elazığ  
**Doğum Yılı** : 1994  
**Uyruğu** : T.C  
**Adres** : Yeni mah. Mimar Faruk Cad. No:61/B Blok Daire No:11 Merkez/ELAZIĞ  
**E-posta** : ruyyaakinci@gmail.com  
**Yabancı Diller** : YÖKDİL (Düzey: 61.25)

## EĞİTİM BİLGİLERİ

**Lisans** : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 2017  
**Lise** : Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi, Elazığ, 2012

## ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ C-C++, MATLAB, LABVIEW.
- ✓ SOLIDWORKS, ANSYS, ANSYS Maxwell, CD Adapco (Speed), PROTEUS,

## İŞ DENEYİMİ

**2017 – 2018** : ZCM Enerji – Sezgin Motor AR-GE Merkezi

## AKADEMİK FAALİYETLER

### Makaleler:

1. Polat, M., Akıncı, R. (2020). Tr dizin makale, Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi (Kabul Edildi.)

### Bildiriler:

1. Akıncı, R., Polat M. (2019). Uluslararası Konferans, Design and Optimization with Genetic Algorithm of Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type) for Electrical Vehicles. [10.1109/ICPEA1.2019.8911175](https://doi.org/10.1109/ICPEA1.2019.8911175)

### Projeler:

1. TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı - Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi. Proje No: 118E943, 15.02.2019-15.10.2020.