

**T.C.**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM**  
**DALI**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN SENKRON RELÜKTANS**  
**MOTOR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SADULLAH ESMER**

**TEZ DANIŞMANI**  
**Prof. Dr. ERDAL BEKİROĞLU**

**BOLU, OCAK - 2023**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Sadullah ESMER** tarafından hazırlanan “**Elektrikli Araçlar İçin Senkron Relüktans Motor Tasarımı**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği/ oy çokluğuyla kabul edilmiştir. 4/01/2023

### Jüri Üyeleri

### İmza

Danışman  
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye  
Doç. Dr. Emre ÇELİK  
Düzce Üniversitesi

.....

Üye  
Doç. Dr. Nihat DALDAL  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı**

**Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 05/12/2022 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 9 olarak tespit edilmiştir.

.....

**SADULLAH ESMEER**

# ÖZET

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN SENKRON RELÜKTANS MOTOR  
TASARIMI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
SADULLAH ESMER  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ERDAL BEKİROĞLU)**

**BOLU, OCAK - 2023  
XV + 67**

Bu tez çalışmasında, yeni nesil elektrikli araçlarda çekiş motoru olarak kullanılmak üzere bir senkron relüktans motor (SynRM) tasarlanmıştır. Tasarımda çift aşamalı optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Yeni nesil elektrikli araçlardaki elektrik motorlarının özellikleri belirlenmiş ve bu özellikleri karşılaması için SynRM'nin stator ve rotor parametreleri için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. SynRM'nin en iyi tasarım parametrelerini elde etmek için genetik algoritma ve duyarlılık analizi yöntemleri kullanılmıştır. Tasarım ve analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Ansys Maxwell paket programında gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada SynRM'nin tork ve tork dalgalanması gibi çıkış değerlerini iyileştirmek için stator ve rotor parametre optimizasyonunda genetik algoritma kullanılmıştır. İkinci aşamada ise SynRM'nin statoruna burma tekniği uygulanmıştır. Duyarlılık analizi ile stator burma açısının SynRM'nin performansına etkisi incelenmiştir. Genetik algoritma ve duyarlılık analiz sonuçlarına göre elde edilen en iyi parametreler SynRM'nin tasarımında kullanılmıştır. Tasarlanan SynRM'nin performansı Ansys Maxwell paket programında Machine Toolkit eklenti paketi kullanılarak simüle edilmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyonlar sayesinde SynRM'nin tork, tork dalgalanması ve verimi iyileştirilmiştir. Tasarlanan SynRM 470 Nm tork ve 285 kW güç üretebilmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde tasarlanan SynRM'nin 10.000 d/d gibi geniş bir hız aralığında yüksek verimle yüksek tork ve yüksek güç ürettiği görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Elektrikli Araçlar, Senkron Relüktans Motor, Genetik Algoritma, Duyarlılık Analizi, Optimizasyon

# **ABSTRACT**

**SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DESIGN FOR ELECTRIC  
VEHICLES  
MSC THESIS  
SADULLAH ESMER  
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. ERDAL BEKIROGLU)**

**BOLU, JANUARY 2023**

**XV + 67**

In this thesis, a synchronous reluctance motor (SynRM) has been designed to be used as a traction motor in new generation electric vehicles. Two-stage optimization technique has been used in the design. The specifications of the electric motor in new generation electric vehicles have been determined and then stator and rotor parameters of SynRM have been optimized to meet these specifications. Genetic algorithm and sensitivity analysis methods have been used to obtain the best design parameters of SynRM. Design and analyses have been carried out using the finite element method with the Ansys Maxwell package program. In the first stage, the stator and rotor parameters have been optimized using a genetic algorithm to improve output values of SynRM such as torque and torque ripple. In the second stage, the skew technique has been applied to the stator of SynRM. The effect of stator skew angle on the performance of SynRM has been investigated with sensitivity analysis. The best parameters obtained according to the genetic algorithm and sensitivity analysis results have been used in the design of SynRM. The performance of the SynRM has been simulated in the Ansys Maxwell package program using the Machine Toolkit plugin package. Optimizations have improved torque, torque ripple, and efficiency of SynRM. Therefore, the designed SynRM can produces torque of 470 Nm and power of 285 kW. When the simulation results are examined, it has seen that the designed SynRM produces high torque and high power with high efficiency in a wide speed range such as 10.000 rpm.

**KEYWORDS:** Electric Vehicles, Synchronous Reluctance Motor, Genetic Algorithm, Sensitivity Analysis, Optimization

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| KABUL VE ONAY SAYFASI .....                                              | iii |
| ETİK BEYAN.....                                                          | iv  |
| ÖZET.....                                                                | v   |
| ABSTRACT .....                                                           | vi  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | vii |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                       | ix  |
| TABLO LİSTESİ .....                                                      | xi  |
| KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ .....                                      | xii |
| TEŞEKKÜR .....                                                           | xv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                            | 1   |
| 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR .....                                              | 5   |
| 2.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi .....                                 | 7   |
| 2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Çekiş Motorları .....                | 9   |
| 2.2.1 Doğru Akım Motoru.....                                             | 11  |
| 2.2.2 Asenkron Motor.....                                                | 12  |
| 2.2.3 Fırçasız Doğru Akım Motoru .....                                   | 13  |
| 2.2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor .....                             | 14  |
| 2.2.5 Anahtarlama Relüktans Motor .....                                  | 15  |
| 2.2.6 Senkron Relüktans Motor.....                                       | 16  |
| 2.2.7 Kalıcı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor.....              | 17  |
| 3. SENKRON RELÜKTANS MOTOR.....                                          | 18  |
| 3.1 SynRM'nin Çalışma Prensipleri .....                                  | 20  |
| 3.2 SynRM'nin Matematiksel Modeli ve Eşdeğer Devresi .....               | 21  |
| 4. TASARIM, ANALİZ VE OPTİMİZASYON İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER .....       | 25  |
| 4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi .....                                        | 25  |
| 4.1.1 Maxwell Denklemleri .....                                          | 25  |
| 4.1.2 Sınır Koşullarının Belirlenmesi .....                              | 26  |
| 4.1.3 Modelin Ağ Yapısı .....                                            | 26  |
| 4.2 Genetik Algoritma .....                                              | 27  |
| 4.3 Duyarlılık Analizi .....                                             | 30  |
| 5. SynRM'NİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU.....                              | 31  |
| 5.1 Başlangıç Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Tasarım .....  | 34  |
| 5.2 GA ile SynRM'nin Stator Parametreleri Optimizasyonu .....            | 37  |
| 5.3 GA ile SynRM'nin Rotor Parametreleri Optimizasyonu .....             | 41  |
| 5.4 GA ile SynRM'nin Stator ve Rotor Parametrelerinin Optimizasyonu .... | 44  |
| 5.5 Duyarlılık Analizi ile SynRM'nin Optimizasyonu.....                  | 48  |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6 SynRM'nin Elde Edilen En İyi Parametrelerle Tasarımı ..... | 52        |
| <b>6. TASARLANAN SynRM'NİN PERFORMANS ANALİZLERİ.....</b>      | <b>55</b> |
| <b>7. SONUÇLAR.....</b>                                        | <b>61</b> |
| <b>8. KAYNAKLAR.....</b>                                       | <b>63</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Elektrikli Araçların Temel Parçaları.....                                                                                                                | 5  |
| Şekil 2.2. Elektrikli Bir Aracın Blok Diyagramı .....                                                                                                               | 6  |
| Şekil 2.3. EA Mimarileri. (A) Tek Motorlu. (B) Birden Fazla Motorlu.....                                                                                            | 6  |
| Şekil 2.4. Tesla'nın Ürettiği Model S EA.....                                                                                                                       | 8  |
| Şekil 2.5. DAM'ın Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Mazda Bongo. (B) Fiat panda Elettra. (C) GMC Conceptor G-Van. ....                                                  | 12 |
| Şekil 2.6. ASM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Mercedes EQC. (B) Audi e-tron. (C) BJEV EC180.....                                                                 | 13 |
| Şekil 2.7. FDAM'ın Kullanıldığı Bir EA Olan Chevrolet Bolt .....                                                                                                    | 14 |
| Şekil 2.8. SMSM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Nissan Leaf. (B) Soul EV. (C) BMW i8.....                                                                         | 15 |
| Şekil 2.9. ARM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Chloride Lucaz. (B) Holden Ecommodore. ....                                                                        | 16 |
| Şekil 2.10. KMDSynRM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Tesla Model 3. (B) BMW i3.....                                                                               | 17 |
| Şekil 3.1. SynRM'nin Stator ve Rotor Yapısı .....                                                                                                                   | 18 |
| Şekil 3.2. SynRM'nin Rotor Yapıları. (A) Çıkık Kutuplu Rotor. (B) Eksenel Laminasyonlu Anizotropi Rotor. (C) Enine Laminasyonlu Anizotropi Rotor.....               | 19 |
| Şekil 3.3. Relüktans Torkun Oluşma Prensibi.....                                                                                                                    | 20 |
| Şekil 3.4. SynRM'nin Eşdeğer Devresi .....                                                                                                                          | 21 |
| Şekil 3.5. SynRM'nin d-q Eksenlerine Göre Eşdeğer Devresi. (A) d-ekseni Eşdeğer Devresi. (B) q-ekseni Eşdeğer Devresi. ....                                         | 23 |
| Şekil 4.1. Ağ İşleminde Kullanılan Eleman Geometrilere. (A) Bir Boyutlu Eleman Geometrisi. (B) İki Boyutlu Eleman Geometrisi. (C) Üç Boyutlu Eleman Geometrisi..... | 27 |
| Şekil 4.2. GA'nın Akış Diyagramı .....                                                                                                                              | 29 |
| Şekil 5.1. SynRM'nin Stator Oluk Parametreleri .....                                                                                                                | 32 |
| Şekil 5.2. SynRM'nin Rotor Parametreleri.....                                                                                                                       | 32 |
| Şekil 5.3. Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Yapısı....                                                                                         | 35 |
| Şekil 5.4. Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği .....                                                                                 | 36 |
| Şekil 5.5. Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği .....                                                                                 | 36 |
| Şekil 5.6. Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı .....                                                                                           | 39 |
| Şekil 5.7. Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği.....                                                                                      | 40 |
| Şekil 5.8. Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği.....                                                                                      | 40 |
| Şekil 5.9. Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı.....                                                                                             | 42 |
| Şekil 5.10. Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği.....                                                                                      | 43 |
| Şekil 5.11. Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği.....                                                                                      | 43 |
| Şekil 5.12. Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı .....                                                                                 | 45 |
| Şekil 5.13. Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği .....                                                                           | 46 |



|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.14.</b> Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği .....           | 46 |
| <b>Şekil 5.15.</b> GA Optimizasyonu Boyunca Tasarlanan SynRM'nin Manyetik Akı Dağılımı.....                | 47 |
| <b>Şekil 5.16.</b> SynRM'nin Stator Burma Konsepti .....                                                   | 48 |
| <b>Şekil 5.17.</b> Stator Burma Açısının Değişimine Göre SynRM'nin Tork ve Tork Dalgılanması Grafiği ..... | 50 |
| <b>Şekil 5.18.</b> Duyarlılık Analizi Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği ..                         | 50 |
| <b>Şekil 5.19.</b> Duyarlılık Analizi Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği ..                         | 51 |
| <b>Şekil 5.20.</b> Tasarlanan SynRM'nin 3D Görünümü. (A) Stator Yapısı. (B) Rotor Yapısı. ....             | 53 |
| <b>Şekil 5.21.</b> M19-24G Tipi Çelik Malzemenin B-H Eğrisi.....                                           | 54 |
| <b>Şekil 5.22.</b> Tasarlanan SynRM'nin Manyetik Akı Dağılımı .....                                        | 54 |
| <b>Şekil 5.23.</b> SynRM'nin Stator Burma Konsepti. (A) Burma Açısı 0°. (B) Burma Açısı 5°. ....           | 55 |
| <b>Şekil 6.1.</b> Tasarlanan SynRM'nin Tork-Hız-Güç Grafiği .....                                          | 57 |
| <b>Şekil 6.2.</b> Tasarlanan SynRM'nin Verim Haritası .....                                                | 57 |
| <b>Şekil 6.3.</b> Tasarlanan SynRM'nin Toplam Kayıplar haritası.....                                       | 58 |
| <b>Şekil 6.4.</b> Tasarlanan SynRM'nin Sargı Kayıpları .....                                               | 59 |
| <b>Şekil 6.5.</b> Tasarlanan SynRM'nin Çekirdek Kayıpları .....                                            | 59 |
| <b>Şekil 6.6.</b> Tasarlanan SynRM'nin Mekanik Kayıpları.....                                              | 59 |
| <b>Şekil 6.7.</b> Tasarlanan SynRM'nin Termal Analizi.....                                                 | 60 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1.</b> EA Modeline Göre Motor Tipi, Güç ve Tork Tablosu .....                                                                       | 9  |
| <b>Tablo 2.2.</b> EA’larda Kullanılan Elektrik Motorlarının Karşılaştırması.....                                                               | 10 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Maxwell Denklemleri. (A) Gauss Yasası. (B) Gauss Manyetizma Yasası. (C) Faradayın İndüksiyon Yasası. (D) Ampère Yasası. .... | 25 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Duyarlılık Analizi Tablosu.....                                                                                              | 30 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Hedeflenen SynRM’nin Özellikleri .....                                                                                       | 31 |
| <b>Tablo 5.2.</b> SynRM’nin Başlangıç Parametre Değerleri.....                                                                                 | 34 |
| <b>Tablo 5.3.</b> SynRM’nin Optimizasyonunda Kullanılan Stator Parametreleri ve Sınır Değerleri.....                                           | 37 |
| <b>Tablo 5.4.</b> SynRM’nin Stator Optimizasyon Sonuçları .....                                                                                | 38 |
| <b>Tablo 5.5.</b> SynRM’nin Optimizasyonunda Kullanılan Rotor Parametreleri ve Sınır Değerleri.....                                            | 41 |
| <b>Tablo 5.6.</b> SynRM’nin Rotor Optimizasyon Sonuçları .....                                                                                 | 42 |
| <b>Tablo 5.7.</b> SynRM’nin Stator ve Rotor Optimizasyon Sonuçları.....                                                                        | 44 |
| <b>Tablo 5.8.</b> Burma Açısına Göre Tork ve Tork Dalgalanması Değerleri .....                                                                 | 49 |
| <b>Tablo 5.9.</b> SynRM’nin Optimizasyon ve Duyarlılık Analizi Boyunca Parametre Değişimi .....                                                | 51 |
| <b>Tablo 5.10.</b> Tasarlanan SynRM’nin Stator ve Rotor Parametreleri .....                                                                    | 52 |
| <b>Tablo 6.1.</b> Machine Toolkit’te Kullanılan Parametreler .....                                                                             | 56 |

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

|                 |                                                       |
|-----------------|-------------------------------------------------------|
| <b>ARM</b>      | : Anahtarlamaalı Relüktans Motor                      |
| <b>ASM</b>      | : Asenkron Motor                                      |
| <b>DAM</b>      | : Doğru Akım Motoru                                   |
| <b>EA</b>       | : Elektrikli Araç                                     |
| <b>FDAM</b>     | : Fırçasız Doğru Akım Motoru                          |
| <b>GA</b>       | : Genetik Algoritma                                   |
| <b>GSMSM</b>    | : Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor             |
| <b>HEA</b>      | : Hibrit Elektrikli Araç                              |
| <b>KMdSynRM</b> | : Kalıcı Mıknatıs destekli Senkron Relüktans Motor    |
| <b>NaS</b>      | : Sodyum Sülfür                                       |
| <b>SEY</b>      | : Sonlu Elemanlar Yöntemi                             |
| <b>SMSM</b>     | : Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor                    |
| <b>SynRM</b>    | : Senkron Relüktans Motor                             |
| <b>YSMSM</b>    | : Yüzeysel Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor           |
| <b>3D</b>       | : 3 Boyutlu                                           |
| <b>A</b>        | : Akım                                                |
| <b>B</b>        | : Manyetik Akı Yoğunluğu                              |
| <b>B0</b>       | : Akı Bariyeri Hava Aralığı                           |
| <b>Bs0</b>      | : Stator Oluk Dış Arası Genişliği                     |
| <b>Bs1</b>      | : Stator Oluk Üst Genişliği                           |
| <b>Bs2</b>      | : Stator Oluk Alt Genişliği                           |
| <b>D</b>        | : Analiz Edilen Durum                                 |
| <b>E</b>        | : Elektrik Alan Şiddeti                               |
| <b>H</b>        | : Akı Bariyeri ile Rotor Dış Çapı Arasındaki Genişlik |
| <b>Hs0</b>      | : Stator Oluk Dış Kalınlığı                           |
| <b>Hs1</b>      | : Dış ile Sargı Alanı Arası Mesafe                    |
| <b>Hs2</b>      | : Stator Oluk Yüksekliği                              |
| <b>Hz</b>       | : Hertz                                               |
| <b>J</b>        | : Akım Yoğunluğu                                      |
| <b>j</b>        | : Eylemsizlik Momenti                                 |
| <b>M</b>        | : Ortak İndüktans                                     |
| <b>P</b>        | : Serbest Yük Yoğunluğu                               |

|                         |                                      |
|-------------------------|--------------------------------------|
| <b>R</b>                | : Akı Bariyeri Ucu Girinti Miktarı   |
| <b>R<sub>b</sub></b>    | : Akı Bariyerinin Başlama Çapı       |
| <b>R<sub>ms</sub></b>   | : Karekök Ortalama                   |
| <b>R<sub>pm</sub></b>   | : Bir Dakikadaki Dönüş Sayısı        |
| <b>R<sub>s</sub></b>    | : Stator Oluk Tabanı Girinti Miktarı |
| <b>V</b>                | : Gerilim                            |
| <b>W</b>                | : Köprü Genişliği                    |
| <b>Y<sub>0</sub></b>    | : Demir Bölüt Genişliği              |
| <b>Ç<sub>j</sub></b>    | : Çıkış Parametreleri                |
| <b>d/d</b>              | : Bir dakikadaki devir sayısı        |
| <b>ε<sub>0</sub></b>    | : Dielektrik Sabiti                  |
| <b>μ<sub>0</sub></b>    | : Manyetik Geçirgenlik               |
| <b>G<sub>i</sub></b>    | : Giriş Parametreleri                |
| <b>L<sub>m</sub></b>    | : Mıknatıslanma İndüktansı           |
| <b>L<sub>s</sub></b>    | : Stator İndüktansı                  |
| <b>L<sub>sd</sub></b>   | : d-Eksenli Stator İndüktansı        |
| <b>L<sub>sl</sub></b>   | : Toplam Sargı Sızıntı İndüktansı    |
| <b>L<sub>sq</sub></b>   | : q-Eksenli Stator İndüktansı        |
| <b>R<sub>cm-r</sub></b> | : Rotor Demir Direnci                |
| <b>R<sub>cm-s</sub></b> | : Stator Demir Direnci               |
| <b>R<sub>s</sub></b>    | : Sargı Direnci                      |
| <b>T<sub>L</sub></b>    | : Yük Torku                          |
| <b>T<sub>dal</sub></b>  | : Tork Dalgalanması                  |
| <b>T<sub>maks</sub></b> | : En Yüksek Tork                     |
| <b>T<sub>min</sub></b>  | : En Düşük Tork                      |
| <b>T<sub>ort</sub></b>  | : Ortalama Tork                      |
| <b>V<sub>s</sub></b>    | : Stator Gerilimi                    |
| <b>V<sub>sd</sub></b>   | : d-Eksenli Stator Gerilimi          |
| <b>V<sub>sq</sub></b>   | : q-Eksenli Stator Gerilimi          |
| <b>X<sub>k</sub></b>    | : Parametre Değerleri                |
| <b>e<sub>m</sub></b>    | : Hava Boşluğu Elektromotor Gerilimi |
| <b>i<sub>cs</sub></b>   | : Stator Demir Akımı                 |
| <b>i<sub>d</sub></b>    | : d-Eksenli Stator Akımı             |

|                  |                                        |
|------------------|----------------------------------------|
| $i_m$            | : Mıknatıslanma Akımı                  |
| $i_{md}$         | : d-Eksenı Mıknatıslanma Akımı         |
| $i_{mq}$         | : q-Eksenı Mıknatıslanma Akımı         |
| $i_q$            | : q-Eksenı Stator Akımı                |
| $i_s$            | : Stator Akımı                         |
| $\theta_{burma}$ | : Statorun Burulma Açısı               |
| $\lambda_d$      | : d-Eksenı Hava Aralığı Bağlantı Akısı |
| $\lambda_q$      | : q-Eksenı Hava Aralığı Bağlantı Akısı |
| $\varphi_B$      | : Manyetik Akı                         |
| $\omega_r$       | : Açısıl Hız                           |
| $\lambda$        | : Hava Aralığı Bağlantı Akısı          |
| $p$              | : Kutup Çifti                          |

## TEŞEKKÜR

Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca ve özellikle tez sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen, akademik gelişimim için emek veren, eğitimciliğiyle yol gösteren, yüksek enerjisiyle motive eden ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışmanım Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na saygılarımı ve en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca hem maddi hem manevi desteklerini her zaman hissettiğim babam Âdem ESMER'e, annem Lemanur ESMER'e ve kardeşim Merve ESMER'e, özellikle her koşulda beni destekleyen, yoğun olduğumda sabırla bana yardım eden sevgili eşim Elif Betül ESMER'e çok teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında enerji verimliliği ve temiz çevre gibi konular gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu konularda verim arttırmak için teknolojiler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de elektrikli araç (EA) teknolojileridir. EA'lara duyulan ilgiyi sera gazı etkisi ve hava kirliliği nedenleriyle düzenlenen yasalarda arttırmaktadır (1). EA'ların en önemli parçalarından biri elektrik motorlarıdır. EA'da kullanılacak elektrik motorunun seçiminde çekiş sistemden beklenen performans ile maliyet arasındaki denge önemlidir. Güç yoğunluğu, güvenilirlik, verimlilik ve maliyet gibi dört temel parametrenin yanı sıra hata toleransı, uzun ömürlülük, termal limit, tork dalgalanması gibi birçok ikincil parametre de elektrik motoru seçiminde önemlidir (2). EA'larda doğru akım motoru (DAM), fırçasız doğru akım motoru (FDAM), asenkron motor (ASM), sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM), anahtarlama relüktans motor (ARM), senkron relüktans motor (SynRM) ve kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor (KMdSynRM) gibi çeşitli motor tipleri kullanılmaktadır (3). EA'ların çekiş motoru olarak kullanılacak bir motorda hızlı tork tepkisi, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, geniş hız aralığı, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet gibi özelliklerinin olması istenir (4).

Literatürde EA'larda kullanılan elektrik motorları ile ilgili pek çok çalışma vardır. Bir çalışmada EA'lar için rotoru sargılı senkron motor tasarımı yapılmıştır. 120 kW gücünde olan motor 10000 d/d'ye kadar hızlanabilmektedir. Tasarlanan motor en yüksek 280 Nm tork ve en yüksek %96,5 verim sunmaktadır (5). Başka bir çalışmada EA'lar için dış rotorlu ARM optimizasyonu ve tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan ARM 5,5 kW güç ve en yüksek 65 Nm tork üretmektedir (6). Literatürde hafif EA'lar için FDAM tasarımı sunan çalışmalar da vardır. Bunlarda sırasıyla 0,56, 0,75 ve 1,5 kW güçlerinde FDAM tasarımı yapılmıştır (7), (8), (9). Başka çalışmalarda EA'lar için mıknatıslı bir motor olan SMSM'nin tasarımı gerçekleştirilmiş. C. Zhou ve ark. EA ve HEA'lar için SMSM tasarlamışlardır. Tasarlanan SMSM 12000 d/d gibi geniş bir hızda çalışmaktadır. Tasarlanan SMSM, 80 kW güç ve yaklaşık 270 Nm çıkış torkuna sahiptir (10). A. Sheela ve ark. hafif EA'lar için 3 kW'lık bir SMSM tasarlamışlardır. Tasarlanan SMSM 4100 d/d'de 7 Nm tork üretmektedir ve en yüksek %94 verim sunmaktadır (11). H. Dhulipati ve ark. tarafından EA'lar için 6 fazlı SMSM optimizasyonu ve tasarımı yapılmıştır. Çalışmada, optimizasyonlar gerçekleştirilerek 3 kW'lık bir SMSM'nin tork ve tork

dalgalanması iyileştirilmiştir. Nihai SMSMS tasarımında en yüksek 70 Nm tork, %2,5 tork dalgalanması ve %94 verim elde edilmiştir fakat SMSM 400 d/d gibi çok düşük hızlarda analiz edilmiştir (12).

EA'larda çekiş motoru olarak çoğunlukla nadir toprak malzemeleri ile üretilen yüksek performanslı kalıcı mıknatıslara dayalı motorlar (SMSM, FDAM) kullanılmaktadır. Mıknatıslar için hammaddelerin yüksek/değişken maliyeti, doğada sınırlı miktarda bulunmaları ve mıknatıs rezervlerinin tüm dünya ülkeleri için ulaşılabilir olmaması mıknatıslı motorların dezavantajıdır (13). Ayrıca mıknatıs kullanan motorlarda, motorun performansını sınırlayan bazı durumlar vardır. Mıknatıslı bir motorun sıcaklığı, çalışma koşullarını aştığında demanyetizasyon etkisinden dolayı motorun performansı olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, azaltılmış miktarda mıknatıs içeren veya SynRM gibi mıknatıs içermeyen elektrik makinelerine artan bir ilgi vardır (14).

Son yıllarda birçok araştırmacı SynRM üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. M. Sanada ve ark. SynRM'nin rotorunda simetrik ve asimetrik akı bariyeri tasarımı gerçekleştirmiştir. Asimetrik akı bariyerinin, simetrik akı bariyerine göre daha az tork dalgalanması ürettiği gözlemlenmiştir. Çalışmalarında yaklaşık 1 Nm olan ortalama tork değişmeden tork dalgalanması %50'den %10 civarına indirgenmiştir (15). N. Bianchi ve ark. tork harmoniklerini azaltmaya yönelik farklı akı bariyer geometrileri üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada "Romeo and Juliet", "Machaon" ve "IPM" adlı farklı rotor tipleri tasarlanmış ve bu farklı yapıdaki motorların tork, tork dalgalanması ve faz akımları incelenmiştir. Yaklaşık 5 Nm tork üreten bu motorların tork dalgalanmaları da sırasıyla %4,84, %4,76 ve %13,08 olarak hesaplanmıştır (16). Bomela ve ark. çalışmalarında stator sargı kırılganlığı, rotor burma (skew) gibi tasarım parametrelerinin tork dalgalanması, ortalama tork ve güç üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 9 kW ve 45 kW'lık 2 tane motor incelenmiştir. Burma tekniği sayesinde tork dalgalanmasının %35'lerden %8'e kadar düştüğü görülmüştür (17). E. Armando ve ark. tork dalgalanmasını azaltmada, rotor burma tekniğini incelemişlerdir. Çalışmada adım burma (step skewing) yerine sürekli burma (continuous skewing) tekniğini uygulamışlardır. Tork dalgalanmasında adım burmaya kıyasla sürekli burma tekniği daha iyi sonuç vermiştir (18). Son zamanlarda yapılan başka bir çalışmada S. Taghavi ve ark. EA'lar için SynRM tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada rotor geometrisi için optimizasyon gerçekleştirilmiştir ve sonlu



elemanlar yöntemi kullanarak motor analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 45 kW'lık 48 kutuplu bir SynRM tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan motor ile EA'lar için yeterli tork üretimi gerçekleştirilmiş fakat EA'ların ihtiyaç duyduğu yüksek hızlarda analizler yapılmamıştır (19). A. Credo ve ark. EA'lar için yeni bir SynRM tasarımı önermiştir. Çalışmada simetrik ve asimetrik rotor şekillerine sahip farklı topolojiler tasarlanmış, optimizasyon gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. SynRM'lerin rotorunda bulunan köprü yapıları kaldırılmış, akı bariyerlerinin içine sıvı epoksi yapıştırıcı reçine doldurarak gerekli dayanım sağlanmıştır (20). A. Bozkurt ve ark. hafif EA'lar için dış rotorlu kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor (KMdSynRM) tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada parametrik analiz yardımıyla akı bariyerleri için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 1 kW'lık KMdSynRM 750 d/d çalışma hızında 12,87 Nm tork üretmiştir. Tork dalgalanması %6,96 ve verim %91,30 olarak hesaplanmıştır (21). S. Panda ve I. Song yine hafif EA'lar için SynRM optimizasyonu ve tasarımı yapmışlardır. Yapılan çalışmada SynRM'nin bariyer sayısı değişiminin tork dalgalanmasına etkisi incelenmiştir. Uygun değerlerle tasarlanan SynRM'nin tork dalgalanması %17,27, çıkış gücü 1,5 kW ve 10 Nm tork ürettiği görülmüştür (22). Diğer çalışmada SynRM'nin rotorundaki kaburga ve bariyer kalınlıkları için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonda elde edilen değerlerle tasarlanan SynRM'nin tork dalgalanması %4,86, çıkış gücü 15 kW ve çıkış torku 9,5 Nm'dir (23). EA'larda kullanılmak üzere SynRM ile mıknatıslı motorların karşılaştırıldığı çalışmalar da vardır. S. Nattuthurai ve Y. Guan SynRM ile KMdSynRM'yi karşılaştıran çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada 1,2 kW ve 1500 d/d hızında iki motor tasarlanmıştır. Tasarlanan SynRM'nin %90,17 verim ve 7,92 Nm tork, KMdSynRM'nin ise %92,11 verim ve 8,43 Nm tork ürettiği görülmüştür (24). Diğer çalışmada SynRM ve KMdSynRM'nin rotor parametreleri için GA kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Tasarlanan motorlar incelendiğinde SynRM'nin 41 birim maliyetle %93 verim ve yaklaşık 160 Nm tork ürettiği, KMdSynRM'nin ise 110 birim maliyetle %95 verim ve yaklaşık 250 Nm tork ürettiği görülmüştür (25). A. Arkadan ve D. Herrera EA'larda çekiş motoru olarak kullanılacak SynRM için kontrol ve sürücü hakkında çalışmalar yapmıştır. Bir çalışmada Takuchi Algoritması kullanılarak sürücü optimizasyonu ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sayesinde ortalama tork değişmeden toplam kayıplar %61 ve tork dalgalanması %42 iyileştirilmiştir (26). Diğer bir çalışmada

ise SynRM'nin sürülmesi için ikili 3-faz güç dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistem sayesinde SynRM 60 kW, 400 Nm, %94,8 verim ve 9000 d/d hız üretmektedir (27).

Bu tez çalışmasında EA'lar için çekiş motoru olarak kullanılacak, senkron relüktans motor (SynRM) tasarımı yapılmış ve tasarım aşamaları detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin yeni nesil EA'ların gereksinimlerini karşılaması hedeflenmiştir. Hedeflenen özellikler Tesla Model-S elektrikli arabada kullanılan elektrik motorunun tork, güç ve verim gibi özellikleri göz önüne alınarak belirlenmiştir (28). SynRM'nin en büyük dezavantajı olan tork dalgalanmasının iyileştirilmesi, EA'larda kullanılan çekiş motoru olarak SynRM'nin tercih edilmesini sağlayacak büyük bir gelişim olacaktır. SynRM'nin geniş bir hız aralığında ve düşük tork dalgalanmasında, yüksek güç ve yüksek tork üretimini sağlaması için optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonun ilk aşamasında genetik algoritma kullanılarak en iyi performansı sağlayan stator ve rotor parametrelerinin bulunması hedeflenmiştir. Daha sonraki aşamada duyarlılık analizi yöntemiyle, burma (skew) tekniğinin SynRM'nin performansına olan etkileri incelenmiştir ve en uygun burma açısı tespit edilip tasarımda kullanılmıştır. Analizler sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve optimizasyonlar için Ansys Maxwell paket programı kullanılmıştır. SynRM'nin optimizasyonlarla elde edilen en iyi stator ve rotor parametreleri ile en iyi burma açısı kullanılarak yapılan tasarımda, hedeflenen performans kriterlerine ulaşıldığı görülmüştür.

## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Günümüzde elektrikli araçlar hızla gelişiyor ve yaygınlaşıyor. Fosil yakıtların azalması ve çevre kirliliği gibi olaylar bu yayılmayı desteklemektedir. Hatta 2040 yılında yeni araç satışlarının %50'den fazlasının elektrikli araçlar olacağı tahmin edilmektedir (29). Elektrikli bir araçta bulunan temel parçalar Şekil 2.1'de de gösterildiği gibi elektrik makinesi, batarya, güç yönetim sistemi ve sürücüdür.



**Şekil 2.1.** Elektrikli Araçların Temel Parçaları

EA'ların blok diyagramı incelenecek olursa, araç denetleyicisi için giriş bilgisi hız ve fren pedallarıdır. Motor denetleyicisi, araç denetleyicisinden ve bataryadan aldığı bilgi ile güç elektroniği dönüştürücüsünü kontrol eder. Elektrik makinesi için gerekli gerilim, akım ve frekans gibi değerler güç elektroniği dönüştürücüsü tarafından sağlanır. Elektrik makinesinin sürekli en verimli çalışma bölgesinde kalması isteniyorsa, sisteme vites kutusu da eklenebilir. Fakat bu EA'lar için maliyet ve ağırlığı arttıran bir durumdur. Elektrik makinesinin ürettiği mekanik güç daha güvenilir ve konforlu bir sürüş için diferansiyel aracılığıyla tekerleklerle aktarılır. EA'ların blok diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir.



## 2.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araçların tarih içinde gelişimine bakıldığında ilk öne çıkan olay 19.yy. başlarında İtalyan fizikçi Volta tarafından pilin keşfedilmesi olmuştur (30). Daha sonra İskoç mucit Robert Davidson 1842’de ilk gerçek boyutlarında elektrikli lokomotif tasarlayan kişi olmuştur. Tasarlanan lokomotif tek kullanımlık pillerle enerjilendirilmiştir (31). 1859’da Fransız mucit Gaston Planté şarj edilebilen batarya sistemini geliştirmiştir (32). Bu gelişme elektrikli araçlarda hem maliyeti düşürmek hem de EA’lara olan ilgiyi artırmak için önemli bir gelişme olmuştur. 19.yy. sonlarında Fransa, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri’nde pek çok şirket elektrikli araç üretimine başlamıştı (33), (34).

EA’lardaki gelişmeler devam ederken içten yanmalı motorlu araçlarda da gelişmeler olmuştur. 20. yy. başlarında petrol yataklarının artmasından dolayı petrol fiyatlarının ucuzlamış olması ve seri üretime başlayan bazı firmalar sayesinde, içten yanmalı motorların maliyeti azalmış popülerliği artmıştır (33). EA’lar ile ilgili yapılan çalışmalarda yaklaşık yarım yüzyıl boyunca pek kayda değer gelişmeler yaşanmamıştır. 1960’lı yıllarda sodyum sülfür (NaS) bataryaların geliştirilmesi ile EA’ların menzili artmıştır. Hem bataryadaki bu gelişim hem de 1973’teki petrol krizinin yaşanması EA’lara duyulan ilgiyi tekrar arttırmıştır. Böylece Japonya, ABD, Almanya ve İtalya gibi otomotiv endüstrisi gelişmiş ülkeler EA’lar için AR-GE çalışmalarını başlatmıştır (34). 1976’da Fiat, 14 kW’lık bir elektrik motoru ile hareket eden 2 kişilik X1/23 isimli prototip bir elektrikli araç geliştirmiştir. Fiat’ın geliştirdiği bu araçta rejeneratif fren sistemi kullanılmış ve 80 km’lik menzili ile dönemin en kapsamlı taşıtı olmuştur (35).

20.yy. sonlarında sera gazı ve çevresel kirlilik gibi konulara kayıtsız kalamayan hükümetler EA’lara teşvik amacıyla maddi destek vermeye başlamışlardır. 1971 ile 1976 yılları arasında Japonya hükümeti EA üzerine birlikte çalışma yapan Mitsubishi, Toyota, Daihatsu ve Mazda gibi firmalara 20 milyon dolarlık destek sağlamıştır. Ford ve GM, ABD enerji bakanlığı tarafından destek alarak ETX-1’i üretmişlerdir. Fransa’da 1988’de Citroën ve Peugeot marka birçok araç deneysel amaçlarla EA’lara dönüştürülmüştür. 1988’de Almanya’da EA’ya dönüştürülen “GES City Stromer” isimli araç döneminin Avrupa Güvenlik Standartları’nı karşılamıştır (36).

1997’de Toyota’nın ürettiği Prius modeli seri üretime geçmiştir. Prius, hibrit teknolojiye sahip bir hibrit elektrikli araç (HEA)’dır. HEA’larda içten yanmalı motor ve elektrik motoru birlikte bulunur (37). 1999’da Honda, Amerika pazarında HEA’ları piyasaya süren ilk firma oldu. Honda’nın ürettiği Insight modeli HEA, Amerika pazarında büyük başarı elde etmiştir (38). 21.yy. başlarında çoğu firma seri üretim HEA üretmeye başlamıştır. Ayrıca EA’ların menzilini arttırmak için batarya teknolojisi üzerine çalışılmıştır. 2008’de Tesla’nın ürettiği “Roadster” modelinde lityum-iyon batarya kullanılmıştır. Roadster’ın tek şarj ile 320 km’den daha fazla yol gidebilmesi, en yüksek 201 km/sa hıza çıkabilmesi ve 0’dan 100 km/sa hıza 4 saniye civarında ulaşması döneminin otomobil dünyasında ona popülerlik kazandırmıştır (39).

Günümüzde pek çok otomotiv firması benzin veya dizel yakıtlı araçların yanında EA modelleri de üretmektedir. Bunlardan bazıları; Bmw i3, Chevrolet Bolt, Jaguar I-Pace, Hyundai Kona, Volvo XC40 P8, Mercedes-Benz EQC, Nissan Leaf, Audi Q4 E-TRON, Kia e-Soul, Fiat 500e, Volkswagen id.3, Mazda MX-30, Porsche Taycan 4S, Tesla Model S’dir (40). Detayları Tablo 2.1’de verilen bu EA’lar yeni nesil EA’lara örnektir. Bu çalışmada tasarlanacak olan motor gereksinimlerinin baz alındığı Tesla Model S Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Tesla’nın Ürettiği Model S EA

EA’ların en önemli parçalarından biri elektrik makinesidir. EA’lardaki verim, hız, maliyet, taşıma kapasitesi gibi pek çok özellik kullanılan elektrik makinesiyle alakalıdır. Bu yüzden elektrik makinelerini detaylı incelemek

gerekmektedir. EA’larda kullanılan elektrik makineleri ve özelliklerinin detayları aşağıda verilmiştir.

## 2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Çekiş Motorları

EA’larda kullanılan elektrik makineleri, aracın hareketlenmesi için bataryada depolanan enerjiyi mekanik enerjiye çeviren elektrik motoru ve hareket halindeki aracın rejeneratif frenlemesi ile mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren jeneratör olarak görev yapabilmektedir. EA’da kullanılan elektrik makinesinin, jeneratör olarak kullanımından daha fazla motor olarak kullanımına odaklanıldığı için tezde elektrik motoru tabiri ile devam edilecektir. EA’lar ilk ortaya çıktığı zamanlarda elektrik motoru olarak DA motor (DAM) kullanılmaktaydı. Sonraki dönemlerdeki gelişmeler ile EA’larda asenkron motorun (ASM) kullanılması yaygınlaşmaya başlamıştır (41).

İlerleyen yıllarda EA’ların gereksinimlerine göre farklı elektrik motorları tercih edilmiştir. Genel olarak EA’larda kullanılan elektrik motorları, doğru akım motoru (DAM), asenkron motor (ASM), fırçasız doğru akım motoru (FDAM), sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM), anahtarlamalı relüktans motor (ARM) ve kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor (KMdSynRM)’dur. Bazı EA’ların motor tipi, güç ve tork değerleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir (2), (42).

**Tablo 2.1.** EA Modeline Göre Motor Tipi, Güç ve Tork Tablosu

| EA’nın Modeli    | Yıl  | Motor Tipi | Güç (kW) | Tork (Nm) |
|------------------|------|------------|----------|-----------|
| Volvo XC40 P8    | 2021 | SMSM       | 300      | 660       |
| Nissan Leaf      | 2020 | SMSM       | 110      | 320       |
| Jaguar I-Pace    | 2020 | SMSM       | 298      | 696       |
| Volkswagen id.3  | 2020 | SMSM       | 100      | 275       |
| Porche Mission E | 2020 | ASM        | 320      | 600       |
| Chevrolet Bolt   | 2020 | FDAM       | 150      | 360       |
| Toyota Prius     | 2020 | SMSM       | 53       | 163       |
| Kia e-Soul       | 2020 | SMSM       | 100      | 395       |
| BMW i3           | 2019 | KMdSynRM   | 125      | 250       |
| Hyundai Kona E   | 2019 | SMSM       | 150      | 395       |

|                        |      |          |     |     |
|------------------------|------|----------|-----|-----|
| Mercedes Generation EQ | 2019 | ASM      | 300 | 760 |
| Audi E-Tron 55 Quatro  | 2019 | ASM      | 265 | 561 |
| Jac iEVS4              | 2019 | SMSM     | 110 | 330 |
| Smart EQ Fortwo        | 2019 | SMSM     | 60  | 160 |
| Tesla Model 3          | 2018 | KMdSynRM | 568 | 980 |
| BMW i8                 | 2018 | SMSM     | 170 | 320 |
| BJEV EC180             | 2016 | ASM      | 30  | 140 |
| Fiat 500e              | 2013 | SMSM     | 83  | 200 |
| BYD E6 EV              | 2008 | SMSM     | 90  | 450 |
| Holden Ecommodore      | 2007 | ARM      | -   | -   |
| Lucas Chloride         | -    | ARM      | -   | -   |
| Mazda Bongo            | 1991 | DAM      | -   | -   |
| Fiat Panda Elettra     | 1990 | DAM      | -   | -   |

Tablo 2.1’den de anlaşılacağı üzere günümüzde EA’larda en çok SMSM tercih edilmektedir. EA’larda kullanılan bu elektrik motorlarının tercih edilmesini etkileyen özellikleri ve karşılaştırılması Tablo 2.2’de verilmiştir (43).

**Tablo 2.2.** EA’larda Kullanılan Elektrik Motorlarının Karşılaştırması

("+" Avantajlı Durum, "0" Nötr Durum, "-" Dezavantajlı Durum)

| Özellikler                       | Motor Tipi |     |      |      |     |       |          |
|----------------------------------|------------|-----|------|------|-----|-------|----------|
|                                  | DAM        | ASM | FDAM | SMSM | ARM | SynRM | KMdSynRM |
| <b>Maliyet</b>                   | 0          | ++  | -    | -    | +   | ++    | +        |
| <b>Tork/ Güç yoğunluğu</b>       | -          | 0   | ++   | ++   | 0   | 0     | +        |
| <b>Verim</b>                     | -          | +   | ++   | ++   | +   | +     | ++       |
| <b>Basitlik/ Üretilebilirlik</b> | ++         | ++  | +    | 0    | ++  | ++    | +        |
| <b>Kontrol Edilebilirlik</b>     | ++         | +   | +    | +    | 0   | +     | +        |
| <b>Güvenilirlik</b>              | -          | ++  | +    | +    | ++  | ++    | +        |
| <b>Boyut/ Ağırlık/ Hacim</b>     | -          | +   | ++   | ++   | +   | +     | +        |



|                            |    |    |   |    |    |    |    |
|----------------------------|----|----|---|----|----|----|----|
| <b>Aşırı Yükleme</b>       | -  | +  | + | +  | +  | ++ | ++ |
| <b>Kapasitesi</b>          |    |    |   |    |    |    |    |
| <b>Sağlamlık</b>           | 0  | ++ | + | +  | ++ | ++ | +  |
| <b>Manyetik Alan</b>       |    |    |   |    |    |    |    |
| <b>Zayıflatma</b>          | ++ | ++ | - | +  | ++ | ++ | ++ |
| <b>Hata Toleransı</b>      | +  | ++ | - | -  | ++ | +  | +  |
| <b>Termal</b>              |    |    |   |    |    |    |    |
| <b>Sınırlamalar</b>        | 0  | +  | - | -  | ++ | ++ | +  |
| <b>Gürültü/ Titreşim/</b>  |    |    |   |    |    |    |    |
| <b>Tork Dalgallılığı</b>   | -  | ++ | 0 | ++ | -  | -  | 0  |
| <b>Uzun Ömürlülük</b>      | -  | ++ | + | +  | ++ | ++ | +  |
| <b>Geliştirilebilirlik</b> | -  | ++ | 0 | ++ | ++ | +  | ++ |

EA'ların çekiş motoru olarak tercih edilecek motorda güç yoğunluğu, verim, geniş bir hız aralığı, maliyet ve güvenilirlik özelliklerinin iyi olması istenmektedir (4). EA'larda kullanılan elektrik motorlarının incelemesi aşağıda verilmiştir.

### 2.2.1 Doğru Akım Motoru

Doğru akım motoru (DAM), hız kontrolünün kolaylığı sebebiyle modern dönemin başlarında EA'ların çekiş sisteminde yaygın olarak kullanılmıştır. DAM, rotorunda sargıları ile birlikte fırça ve bilezik sistemine sahiptir. Statorunda manyetik akıyı sağlayacak sargı veya mıknatıslar bulunabilir. Fırça ve bilezik yapısının olması sebebiyle düşük güvenilirlik, büyük kütle, düşük verim ve bakım gereksinimlerinin çok olması gibi dezavantajları vardır. Ayrıca mekanik açıdan hızlanma kapasitesi kısıtlıdır (44). Bu yüzden yeni nesil EA'larda kullanımı oldukça azdır. 1990'lı yıllarda bazı seri üretim EA'larda DAM kullanılmıştır. Bunlardan bazıları Şekil 2.5'te gösterilen Mazda Bongo, Fiat panda Elettra ve GMC Conceptor G-Van'dır (42). Mazda Bongo 'da şönt DAM, Fiat panda Elettra 'da seri DAM ve GMC Conceptor G-Van 'da ise harici uyartımlı DAM kullanılmıştır.



**Şekil 2.5.** DAM'ın Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Mazda Bongo. (B) Fiat panda Elettra. (C) GMC Conceptor G-Van.

DAM'ın avantajlarından bazıları şunlardır;

- Kontrol edilebilme kolaylığı,
- Akı ve tork kontrolünün birbirinden bağımsız olarak sağlanabilmesi,
- Hız ve yön değiştirebilme basitliği.

DAM'ın dezavantajlarının bazıları ise şunlardır;

- Sık ve yüksek bakım gereksinimi,
- Düşük verimlilik,
- Düşük güvenilirlik,
- Düşük nominal hız.

### 2.2.2 Asenkron Motor

Asenkron motorlar (ASM), statorunda 3 faz alternatif akım sargıları bulunan, rotorunda ise sincap kafes (kısa devre çubukları) veya bilezik (sargı) yapısı bulunan bir motor tipidir. Genel olarak EA'larda sincap kafesli ASM tercih edilmektedir. ASM, düşük maliyetli, basit ve güçlü bir yapıya ve az bakım gereksinimi özelliğine sahiptir fakat verimliliği ve güç yoğunluğu diğer EA'larda kullanılan motorlara kıyasla düşüktür (45). Günümüzde EA'ların bazılarında elektrik motoru olarak ASM kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bunlardan bazıları Mercedes EQC, Audi e-tron ve BJEV EC180'dir (2).



**Şekil 2.6.** ASM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Mercedes EQC. (B) Audi e-tron. (C) BJEV EC180.

ASM'lerin diğer motorlara göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır (46). ASM'lerin avantajları;

- Güçlü bir yapıya sahip olması,
- ASM'ler mıknatıslı motorlara göre daha düşük maliyetlidir,
- Kalıcı mıknatıslar olmadığı için daha sağlam yapıya sahiptir.

ASM'lerin dezavantajları;

- Karmaşık kontrol devresine sahip olması,
- Harekete başlama anında çok yüksek akım çekmesi,
- Bazı durumlarda düşük güç faktörüne sahip olmasıdır.

### 2.2.3 Fırçasız Doğru Akım Motoru

Fırçasız doğru akım motoru (FDAM), statorunda sargı yapısı ve rotorunda mıknatısların bulunduğu bir elektrik motorudur. FDAM'larda bilezik ve fırça sistemi yoktur. Elektriksel komütasyon sağlanır. FDAM'ların rotor şekilleri yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı olarak 2 farkı yapıda olabilir (47). EA'larda genellikle mıknatısların gömülü olduğu ve böylece mekanik dayanımın daha yüksek olduğu gömülü mıknatıslı rotor tipi tercih edilmektedir (48). Şekil 2.7'de gösterilen Chevrolet Bolt, FDAM'ın kullanıldığı bir EA'ya örnektir (49).



**Şekil 2.7.** FDAM'ın Kullanıldığı Bir EA Olan Chevrolet Bolt

FDAM'ların avantajları;

- Rotorlarında güçlü mıknatıslar barındırdıkları için daha düşük eylemsizliğe sahiptirler.
- Yüksek verimli motorlardır.
- Güç yoğunlukları yüksektir. Böylece daha düşük hacim ve ağırlığa sahiptirler.
- Komütasyon elektronik olarak gerçekleştirildiği için mekanik gürültü seviyeleri düşüktür.
- Bakım gereksinimi az, uzun ömürlü ve güvenilir elektrik motorlarıdır.

FDAM'ların dezavantajları;

- Yüksek maliyete sahiptirler.
- Rotorlarında mıknatıs barındırdıkları için zamanla ve yüksek sıcaklıkla mıknatısların demanyetize olma riski vardır.

#### **2.2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor**

Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM), statoru ASM'nin statoru ile aynı ya da benzer yapıdadır. SMSM'nin rotorunda mıknatıslar bulunmaktadır. Rotorundaki mıknatısların konumuna göre 2 farklı tipte SMSM vardır. Bunlar; Yüzeysel sürekli mıknatıslı senkron motor (YSMSM) ve gömülü sürekli mıknatıslı senkron motor (GSMSM)'dur. GSMSM, mıknatısın rotorun içine gömülü olmasından dolayı daha sağlamdır. Ayrıca yüksek hızlara daha dayanıklıdır. Bu yüzden EA'larda daha yaygın olarak GSMSM kullanılmaktadır. EA'larda SMSM'ler en çok kullanılan motor tipidir. Elektrik motoru olarak SMSM kullanan

EA'lerden bazıları Toyota Prius, Nissan Leaf, Soul EV, Volvo XC40 ve BMW i8'dir (42), (50).



**Şekil 2.8.** SMSM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Nissan Leaf. (B) Soul EV. (C) BMW i8.

SMSM'lerin de diğer elektrikli motorlara göre avantaj ve dezavantajları vardır (33). SMSM'lerin avantajları;

- Yüksek verimlilik,
- Hacim/boyutları aynı performansa sahip diğer elektrikli motorlar göre daha küçük olması,
- Kullanım ömrünün uzun olmasıdır.

SMSM'lerin dezavantajları ise;

- Mıknatıs kullanımından kaynaklı maliyetin yüksek olması,
- Karmaşık kontrol devresine ihtiyaç duymasıdır.

### 2.2.5 Anahtarlamalı Relüktans Motor

Anahtarlamalı relüktans motor (ARM), statoru ve rotoru çıkıntılı bir yapıya sahip olan elektrik motorudur. Statorunda sargı vardır fakat rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmaz. Bu da ARM'yi maliyet bakımından avantajlı hale getirir. ARM, rotor yapısının basitliği sayesinde yüksek hızlarda çalışabilir. ARM'nin en büyük dezavantajı tork dalgalanmasının yüksek olmasıdır. Bu yüzden yeni nesil EA'larda çok tercih edilmezler. Bu motorlarda her bir faz birbirinden bağımsız bir şekilde enerjilendirilmektedir böylece herhangi bir fazda arıza meydana gelse bile diğer fazlar sayesinde motor çalışmaya devam edebilmektedir (51). ARM'nin

kullanıldığı EA'lara Şekil 2.9'da gösterilen Chloride Lucaz ve Holden Ecommodore örnek olarak verilebilir (42).



**Şekil 2.9.** ARM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Chloride Lucaz. (B) Holden Ecommodore.

ARM'lerin diğer elektrikli motorlara göre avantajları;

- Basit yapıya sahip olması,
- Yüksek verimliliğe sahip olması,
- Düşük maliyetli olması
- Arıza koşullarında dahi çalışabilir olması,
- Yüksek hızlarda çalışabilme potansiyeli,
- Güç elektroniği teknolojisinin gelişimi ile ARM'nin de gelişebilir olmasıdır.

ARM'lerin dezavantajları ise;

- Pozisyon bilgisi ihtiyaç duyması,
- Yüksek tork dalgalanması/gürültü 'ye sahip olmasıdır.

### 2.2.6 Senkron Relüktans Motor

Senkron relüktans motor (SynRM) statoru sargılı, rotorunda ise mıknatıs veya sargı bulundurmayıp akı bariyeri bulunduran bir elektrik motorudur. SynRM basit ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Rotor yapısında sargı ve mıknatıs olmaması daha verimli, daha az maliyetli ve daha yüksek hızlara ulaşabilmeyi sağlamaktadır (52). Mıknatıslı olan motorlara kıyasla sıcaklığa bağlı olarak demanyetize olma problemi yoktur. Bu gibi avantajlarından dolayı bu tez çalışmasında hedeflenen



motor tasarımı için SynRM tercih edilmiştir. SynRM'nin daha detaylı anlatımı Bölüm 3'te verilmiştir.

### 2.2.7 Kalıcı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor

Kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor (KMdSynRM), SynRM'nin rotoruna mıknatıs eklenmiş bir elektrik motorudur, onun haricinde yapısal olarak SynRM ile aynıdır. KMdSynRM'ler SynRM'lere göre daha yüksek güç yoğunluğu ve daha düşük tork dalgalanması üretmektedir fakat rotorunda bulunan mıknatıslar KMdSynRM'nin maliyetinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır (53). Ayrıca basitlik, sağlamlık, güvenilirlik, uzun ömür ve termal sınırlar bakımından SynRM daha avantajlıdır. KMdSynRM'nin kullanıldığı EA'lara Şekil 2.10'da gösterilen Tesla Model 3 ve BMW i3 örnek olarak verilebilir.



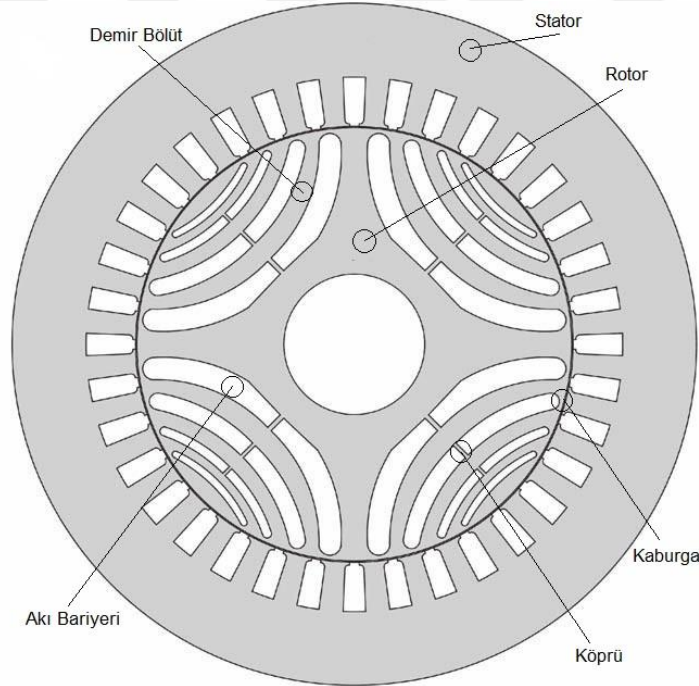
**Şekil 2.10.** KMdSynRM'nin Kullanıldığı Bazı EA'lar. (A) Tesla Model 3. (B) BMW i3.

EA'larda çekiş motoru olarak çoğunlukla nadir toprak malzemeleri ile üretilen yüksek performanslı kalıcı mıknatıslara dayalı motorlar kullanılmaktadır. Mıknatıslar için hammaddelerin yüksek/değişken maliyeti, doğada sınırlı miktarda bulunmaları ve mıknatıs rezervlerinin tüm dünya ülkeleri için ulaşılabilir olmaması (13) KMdSynRM gibi mıknatıslı motorların dezavantajıdır. Ayrıca mıknatıs kullanan motorlarda, motorun performansını sınırlayan bazı durumlar vardır. Mıknatıslı bir motorun sıcaklığı, çalışma koşullarını aştığında demanyetizasyon etkisinden dolayı motorun performansı olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, yapılan tez çalışmasında mıknatıs içermeyen bir motor olan SynRM tasarımı gerçekleştirilmiştir.

### 3. SENKRON RELÜKTANS MOTOR

Senkron relüktans motor (SynRM), statorunda sargı bulunan rotorunda sargı ya da mıknatıs bulunmayan bir elektrik motorudur. Rotorunda sargının olmaması rotor bakır kayıplarının da olmamasını sağlamaktadır. SynRM 'ler bilezik ve fırça yapısına sahip olmadıkları için uzun süre bakım gerektirmeden çalışabilirler. SynRM 'ler basit, güvenilir ve düşük maliyetle imal edilebilir bir yapıya sahiptir.

SynRM'lerin statorlarında çok fazlı bir sargı grubu vardır. Bu sargılar stator üzerindeki oluklara yerleştirilmektedir. Sargılar iki farklı yapıda bulunabilir. Bunlar konsantrik sargı ve dağıtık sargıdır. Literatürde konsantrik ve dağıtık sargılar üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, dağıtık sargı yapısının konsantrik sargı yapısına göre daha düşük tork dalgalanması ürettiği görülmüştür (54). SynRM'lerin rotorunda diğer elektrik motorlarındaki gibi kısa devre çubukları, sargı veya mıknatıslar yoktur, bunların yerine demir bölütler ve akı bariyerleri vardır. Bu iki yapı sayesinde relüktans kuvveti oluşturulur ve rotorun dönmesi sağlanır.



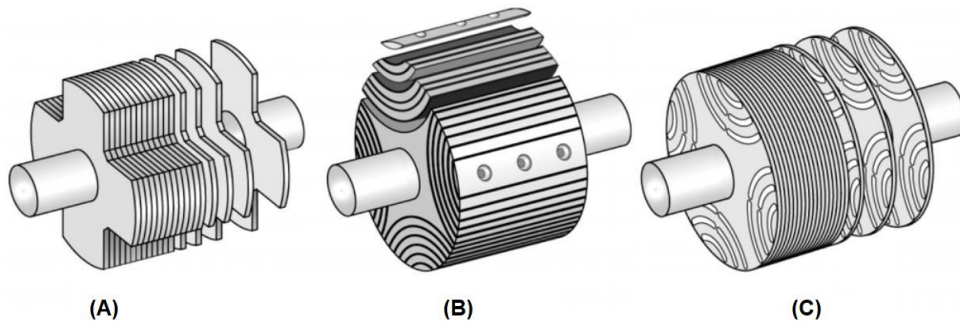
**Şekil 3.1.** SynRM'nin Stator ve Rotor Yapısı

SynRM'lerde Şekil 3.1'de görüldüğü gibi rotorda akı bariyerleri, demir bölütler, kaburga ve köprü yapıları bulunmaktadır. Akı bariyerleri yapısı rotordaki hava boşluklarıdır. Demir bölütler ve akı bariyerlerinin şekli relüktans kuvvetinin



arttıracak şekilde tasarlanır. Kaburgalar, akı bariyerinin uç kısmından demir bölüt ile birleştiği kısımdır. Bu yapı rotorun mekanik bütünlüğünü sağlamaktadır. Ayrıca manyetik doyuma ulaşması ile demir bölütleri manyetik olarak birbirinden ayırmayı sağlar. Kaburgaların boyutları belirlenirken 2 faktör dikkate alınır. Bunların ilki, rotorun dönmesinden kaynaklı mekanik zorlanmaya dayanacak kadar kalın olmalıdır. İkincisi, manyetik doyuma ulaşarak manyetik akıyı geçirmeyecek kadar ince olmalıdır. SynRM'nin rotorunda bulunan köprü yapısı rotorun dönme anında oluşan merkezkaç kuvvetinin etkisi ile demir bölütlerin eğrilip bükülmesini engellemek için kullanılmaktadır. Akı bariyeri üzerinde bulunan bu köprü yapıları eksen indüktanslarını etkilemekte ve motorun performansını olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden köprüler fiziki dayanımı sağlamak şartı ile olabildiğince ince seçilmez.

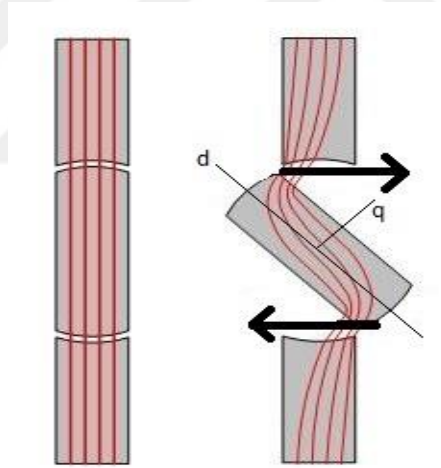
SynRM'nin rotor yapısı genel olarak Şekil 3.2'de görüldüğü gibi üç temel yapıda olmaktadır (55). Şekil 3.2A'da gösterilen yapı çıkık kutuplu rotor yapısıdır. Çıkık kutup yapısı rotorun eşit hava aralığı olmayacak şekilde bazı kısımlarının kesilmesiyle oluşur. Bu yapı diğer rotor tiplerinden daha zayıf özelliklere sahiptir. Yüksek tork dalgalanması büyük dezavantajdır. Şekil 3.2B'de gösterilen yapı eksenel laminasyonlu anizotropi rotor yapısıdır. Eksenel laminasyon yapısı metal laminasyon ve izolasyon malzemelerinin kutuptan merkeze doğru mil üzerine tutturularak oluşturulur. Bu yapı, imalat zorluğundan dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadır (56). Şekil 3.2C'de gösterilen yapı ise enine laminasyonlu anizotropi rotor yapısıdır. Enine laminasyon yapısı laminasyonların preslenmesi ile oluşturulur. Bu yapıdaki rotorun mekanik dayanımını iyileştirmek için hava bariyerlerine epoksi malzemesi dolduran çalışmalar da mevcuttur (20).



**Şekil 3.2.** SynRM'nin Rotor Yapıları. (A) Çıkık Kutuplu Rotor. (B) Eksenel Laminasyonlu Anizotropi Rotor. (C) Enine Laminasyonlu Anizotropi Rotor.

### 3.1 SynRM'nin Çalışma Prensibi

SynRM'nin statorundaki sargılardan geçen çok fazlı alternatif akım sayesinde bir döner alan oluşmaktadır. Bu döner alanın hızına “senkron hız” adı verilmektedir ve statordan akan akımın frekansına bağlıdır. SynRM de senkron bir makine olduğundan SynRM'nin rotoru, statorun oluşturduğu bu döner alanı senkron bir hız ile takip edecektir. SynRM'lerde rotorun dönmesini relüktans tork sağlar. Relüktans tork, her yönde aynı manyetik özellik göstermeyen (anizotropi) bir ferromanyetik malzemenin manyetize olan yolu ile haricen uygulanan manyetik alanın aynı hizaya gelmeye çalışması ile oluşur (57). Şekil 3.3'de gösterildiği gibi rotorun anizotropi yapısından dolayı, manyetik akı çizgileri en küçük relüktans olan bölgeden geçmek isteyeceklerdir. Böylece hava boşluğu yerine ferromanyetik malzeme üzerinden yolunu tamamlayacaktır. Bu da relüktans torkun oluşumunu sağlamaktadır (58).



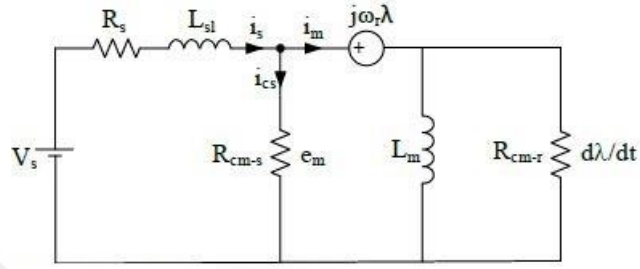
**Şekil 3.3.** Relüktans Torkun Oluşma Prensibi

Relüktans torkun büyüklüğü rotorun çıkıklık oranına bağlıdır. Bu oran da d-ekseni ile q-ekseni indüktansı arasındaki farka bağlıdır. SynRM'nin yüksek tork üretebilmesi için d-ekseni indüktansının en yüksek, q-ekseni indüktansının ise olabildiğince küçük olması istenir. Akı bariyer sayısı, akı bariyer geometrisi, demir bölüt geometrisi vb. birçok parametre bu indüktans farklarını etkilemektedir. Tasarımsal olarak eksen indüktanslarını değiştirmek için de o yol üzerindeki relüktansın düzenlenmesi gerekir. SynRM'nin rotorundaki akı bariyerleri q-

eksenine dik olarak konumlandırılır. Böylece q-ekseni doğrultusundaki relüktans artmış olacaktır.

### 3.2 SynRM'nin Matematiksel Modeli ve Eşdeğer Devresi

SynRM'nin karakteristiğini ifade eden denklemler ve eşdeğer devresi aşağıda verilmiştir. SynRM'nin eşdeğer devresi Şekil 3.4'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.4. SynRM'nin Eşdeğer Devresi

SynRM'nin eşdeğer devresinde görülen  $V_s$ : Stator gerilimini,  $i_s$ : Stator akımını,  $R_s$ : Sargı direncini,  $L_{sl}$ : Toplam sargı sızıntı indüktansını,  $e_m$ : Hava boşluğu elektromotor gerilimini,  $i_{cs}$ : Stator demir akımını,  $R_{cm-s}$ : Stator demir direncini,  $\omega_r$ : Açısal hızı,  $\lambda$ : Hava aralığı bağlantı akısını,  $i_m$ : Mıknatıslanma akımını,  $R_{cm-r}$ : Rotor demir direncini ve  $L_m$ : Mıknatıslanma indüktansını ifade etmektedir (59). Şekil 3.4'e göre SynRM'nin denklemleri (3.1-3.3)'teki gibi yazılabilir.

$$V_s = R_s i_s + j\omega_r L_{sl} i_s + e_m \quad (3.1)$$

$$e_m = \frac{d\lambda}{dt} + j\omega_r \lambda \quad (3.2)$$

$$i_s = i_{cs} + i_m \quad (3.3)$$

Sargı sızıntı indüktansı ve mıknatıslanma indüktansı toplanıp stator indüktansı ( $L_s$ ) olarak denklem 3.4'teki gibi yazılabilir.

$$L_s = L_{sl} + L_m \quad (3.4)$$

Mıknatıslanma indüktansında ( $L_m$ ) doyma söz konusudur fakat sargı sızıntı indüktansı ( $L_{s1}$ ) doymadan bağımsızdır. SynRM'nin statorundaki sargılardan kaynaklı akı harmonikleri, stator sızıntı indüktansına ek bir terim olarak eklenir. Buna göre Denklem (3.1), Denklem (3.5)'teki gibi yazılabilir.

$$V_s = R_s i_s + j\omega_r \lambda + j\omega_r L_s i_m \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) d-ekseni ve q-eksenine göre yazılırsa Denklem (3.6-3.8) elde edilmektedir. Ayrıca Denklem (3.9)'da hava aralığı bağlantı akısı ( $\lambda$ ) ifade edilmektedir.

$$V_s = R_s (i_d + ji_q) + j\omega_r (\lambda_d + j\lambda_q) + j\omega_r L_s i_m \quad (3.6)$$

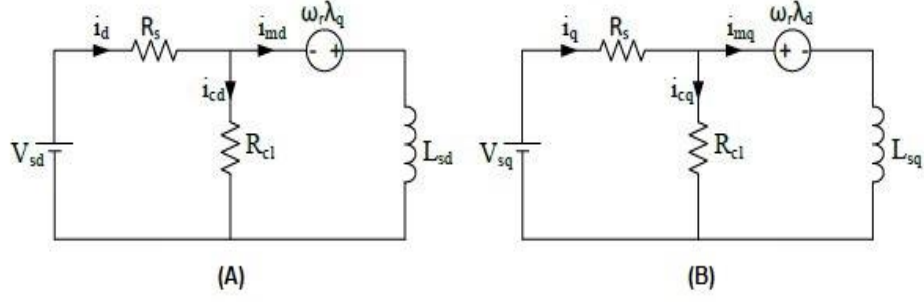
$$V_{sd} = R_s i_d - \omega_r \lambda_q + j\omega_r L_s i_{md} \quad (3.7)$$

$$V_{sq} = R_s i_q + \omega_r \lambda_d + j\omega_r L_s i_{mq} \quad (3.8)$$

$$\lambda = L_{sd} i_{md} + jL_{sq} i_{mq} \quad (3.9)$$

Denklem (3.6-3.9)'da görülen  $V_{sd}$ : d-ekseni stator gerilimini,  $V_{sq}$ : q-ekseni stator gerilimini,  $i_d$ : d-ekseni stator akımını,  $i_q$ : q-ekseni stator akımını,  $i_{md}$ : d-ekseni mıknatıslanma akımını,  $i_{mq}$ : q-ekseni mıknatıslanma akımını,  $\lambda_d$ : d-ekseni hava aralığı bağlantı akısını,  $\lambda_q$ : q-ekseni hava aralığı bağlantı akısını,  $L_{sd}$ : d-ekseni stator indüktansını,  $L_{sq}$ : q-ekseni stator indüktansını ifade etmektedir (60).

Şekil 3.4'teki eşdeğer devre, d-ekseni ve q-eksenine göre düzenlenirse Şekil 3.5'teki eşdeğer devreler oluşmaktadır.



**Şekil 3.5.** SynRM'nin d-q Eksenlerine Göre Eşdeğer Devresi. (A) d-ekseni Eşdeğer Devresi. (B) q-ekseni Eşdeğer Devresi.

SynRM'nin tork ifadesi Denklem (3.10-3.17)'de verilmiştir. Denklem (3.18)'de ortak indüktansın ( $M$ ) ifadesi verilmiştir. Ayrıca  $p$ , kutup çiftini ifade etmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} p |\lambda| |i_m| \sin(\beta) \quad (3.10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_{mq} - \lambda_q i_{md}) \quad (3.11)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_{sd} i_{md} i_{mq} - L_{sq} i_{mq} i_{md}) \quad (3.12)$$

$$i_{md} = i_m \cos(\theta), i_{mq} = i_m \sin(\theta) \quad (3.13)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_{sd} i_m \cos(\theta) i_m \sin(\theta) - L_{sq} i_m \sin(\theta) i_m \cos(\theta)) \quad (3.14)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_{sd} - L_{sq}) i_m^2 \frac{\sin(2\theta)}{2} \quad (3.15)$$

$$T_e = \frac{3}{4} p \left( \frac{L_{sd} - L_{sq}}{L_{sd} L_{sq}} \right) \lambda^2 \sin(2\theta) \quad (3.16)$$

$$T_e = T_L + j \frac{d\omega}{dt} + B s. \omega \quad (3.17)$$

$$M = \sqrt{L_{sd} L_{sq}} \quad (3.18)$$

Denklem (3.17)'deki  $T_L$ : yük torku,  $j$ : ataleti,  $\omega$ : açısal hızı ve  $B_s$ : sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Mıknatıslanma indüktansının etkisi Denklem (3.16)'da görülmektedir. Mıknatıslanma indüktansı d-ekseni ve q-eksenindeki akı yolu üzerindeki yüksek ferromanyetik malzemeden dolayı manyetik doymadan etkilenir. Akı bariyerleri sayesinde q-ekseni akısında doyum etkisi d-eksenine göre daha düşüktür.

SynRM'lerde rotorun konumuna bağlı olarak oluk etkisi oluşur. Stator dişleri ile rotor segmentleri aynı hizada olduğunda, akı yolundaki toplam relüktans en küçüktür ve d-eksen indüktansı ( $L_{sd}$ ) en büyük değeri alır. Stator dişleri ile değil de aradaki boşluklar ile rotor segmentleri hizalandığı durumda ise akı yolundaki toplam relüktans en büyüktür ve d-eksen indüktansı ( $L_{sd}$ ) en küçük değeri alır. Bu iki durum haricinde ise d-ekseni ile q-ekseni indüktanslarına bağlı bir ortak indüktans ( $M$ ) oluşur. Rotorun konumundaki değişime göre değişen indüktans değerleri tork dalgalanmasına neden olur (60).

İstenilen özellikleri karşılayacak bir motor tasarımı yapmak için bazı analiz yöntemleri ve algoritmalar vardır. Bu çalışmada SynRM'nin optimizasyon ve tasarımında bu teknik ve yöntemlerden bazıları kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler Bölüm 4'te gösterilmiştir.

## 4. TASARIM, ANALİZ VE OPTİMİZASYON İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER

Çalışmada tasarım, analiz ve optimizasyon yapılırken bazı yöntem ve tekniklerden faydalanılmıştır. Örneğin, SynRM'nin tasarım, analiz ve simülasyonlarında sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. Stator ve rotor parametre optimizasyonlarında genetik algoritma ve stator burma açısının SynRM'nin performansına olan etkileri incelenirken de duyarlılık analizi kullanılmıştır. Bu yöntem ve teknikler aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

### 4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), Courant tarafından 1940'lı yıllarda mekanik problemleri çözmek amacıyla tasarlanmış bir sayısal analiz yöntemidir (61). Bu yöntemin temelinde bir modelin kurulması, modelin birçok küçük parçalara bölünmesi ve her bir parçanın çözülmesi vardır. Çalışma alanımız elektromanyetizma olduğundan dolayı SEY'de Maxwell denklemlerinin çözümü büyük öneme sahiptir.

#### 4.1.1 Maxwell Denklemleri

James C. Maxwell tarafından tanımlanmış makroskobik boyutta elektromanyetizmayı açıklayan bir denklemler grubudur. Maxwell Denklemleri sayesinde elektromanyetizma, gerçekteki ile çok benzer bir şekilde modellenmiştir. Temel Maxwell Denklemleri Tablo 4.1'de verilmiştir (62).

**Tablo 4.1.** Maxwell Denklemleri. (A) Gauss Yasası. (B) Gauss Manyetizma Yasası. (C) Faradayın İndüksiyon Yasası. (D) Ampère Yasası.

|    | İntegral İfadesi                         | Türev İfadesi                              |
|----|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| A) | $\int E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0}$ | $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ |
| B) | $\int B \cdot dA = 0$                    | $\nabla \cdot B = 0$                       |

|    |                                                                |                                                                          |
|----|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| C) | $\int E \cdot dS = -\frac{d\Phi_m}{dt}$                        | $\nabla \times E = -\frac{dB}{dt}$                                       |
| D) | $\int B \cdot dS = \mu_0 I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_m}{dt}$ | $\nabla \times B = \mu_0 \left( J + \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} \right)$ |

Tablo 4.1’de görülen E: elektrik alan şiddetini ( $V/m$ ), B: manyetik akı yoğunluğunu ( $T$ ),  $\rho$ : serbest yük yoğunluğunu, J: akım yoğunluğunu,  $\varphi_B$ : manyetik akıyı,  $\varepsilon_0$ : dielektrik sabiti ( $F/m$ ),  $\mu_0$ : manyetik geçirgenliği ( $H/m$ ) ifade eder. Maxwell Denklemlerinden (A), Gauss yasası olarak bilinir. Bu yasa elektrik yükleriyle elektrik alanını ilişkilendiren bir matematiksel yasadır. Denklemlerden (B), manyetik alan çizgilerinin noktasal olmadığını ve daima bir kapalı halka şeklinde olduğunu ifade eder. Denklemlerden (C), Faradayın İndüksiyon Yasasıdır. Bu yasa manyetik kuvvetin artma veya azalmasının, manyetizma tarafından üretilen elektrik ile doğru orantılı olduğunu ifade eder. Denklemlerden (D) ise Ampère Yasasıdır. Bu yasa da statik elektrik alanı içerisindeki kapalı bir döngü etrafında olan manyetik alan çizgilerinin integrali, döngüdeki elektrik akımı ile orantılı olduğunu ifade eder. Basit geometrilere manyetik alan bu denklem ile hesaplanabilir.

#### 4.1.2 Sınır Koşullarının Belirlenmesi

SEY’de sistemin analizini yapabilmek için sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. En çok karşılaşılan sınır koşulları Dirichlet ve Neumann’dır. Dirichlet sınır koşulu, modelin tanımlandığı uzayın sınır değişkenini belirler. Neumann sınır koşulu ise belirlenen değişkenin türevinin sıfır olduğu sınırları belirler. Eğer model periyodik bir tekrar eden yapıya sahipse, analizin süresini kısaltmak ve çözülmesi gereken denklem sayısını azaltmak için en küçük tekrar eden parça analiz edilir ve tüm modele göre hesaplanır.

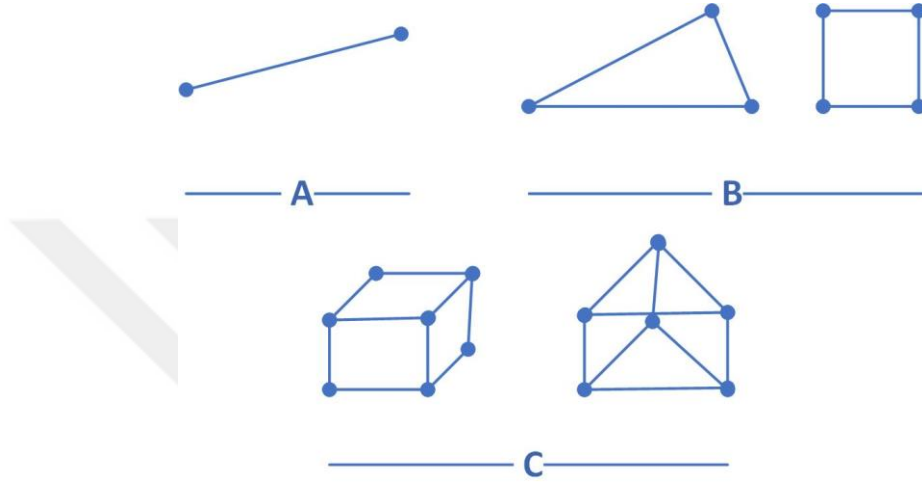
#### 4.1.3 Modelin Ağ Yapısı

SEY’de analizin yapılabilmesi için model birçok küçük parçalara bölünmektedir. Bu parçalara ayırma işlemine ağ (mesh), her bir parçaya eleman (element) denilmektedir. Ağ işleminde en optimum sayıyı seçmek önemlidir. Ağ yapısının çok sayıda parçalardan oluşması analizin daha doğru sonuç vermesini



sağlayacaktır fakat buna ek olarak zaman ve çözümün yapıldığı bilgisayarın daha çok ram ve depolama birimini kullanması gibi olumsuz etkileri olacaktır.

SEY’de ağ yapısının oluşturulmasında çeşitli eleman geometrileri kullanılabilir. Kullanılacak geometrinin seçiminde modelin boyut sayısı önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4.1’de ağ yapısında kullanılan elemanların geometrileri gösterilmiştir (57).



**Şekil 4.1.** Ağ İşleminde Kullanılan Eleman Geometrileri. (A) Bir Boyutlu Eleman Geometrisi. (B) İki Boyutlu Eleman Geometrisi. (C) Üç Boyutlu Eleman Geometrisi.

SEY’de kurulan ağ yapısının yoğunluğu bölgesel olarak değişiklik gösterebilir. Sistem parametrelerinin sık değiştiği alanlarda daha yoğun bir ağ yapısının kullanılması daha doğru analiz sonucu sağlarken, parametrelerin sık değişmediği analiz sonucunun çok etkilenmediği bir bölgede daha az yoğun bir ağ yapısını kullanmak zaman ve iş yükünü azaltacaktır.

## 4.2 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), genetik şifre mantığını kullanarak en iyi çözüme yakın bir çözüm bulmayı hedefleyen bir yapay zeka algoritmasıdır (63). GA yöntemi, 1965’te John Holland tarafından tasarlanmıştır. GA ile canlı mekanizmalardaki, genetik olarak üstün olan bir bireyden, yüksek ihtimal genetik olarak üstün bir yavru meydana gelmesi prensibinden yola çıkılarak mühendislik

optimizasyon problemlerinde kullanılacak bir yöntem geliştirilmiştir. GA'nın çalışma mantığından önce bazı kavramların basitçe ne olduğunu açıklamak gerekebilir. Bunlar; Kromozom: Problem çözümünde kullanılacak tüm değişkenlerin tanımlı olduğu diziyi, Gen: Kromozom dizisinin içerisindeki en küçük anlamlı değeri, Popülasyon: Kromozomların oluşturduğu kümeyi, Aile: Yeni neslin oluşturulmasında kullanılan kromozom çiftlerini, Çaprazlama: Yeni bireylerin oluşturulma işlemini, Mutasyon: Kromozom içerisindeki genlerden bazılarının değerinin değiştirilmesini ve Uygunluk Fonksiyonu: En uygun çözümün bulunmasında kullanılan fonksiyonu ifade eder (64). En iyi sonucu elde etmede çok sayıda değişkenin kullanılabilmesi ve çözümün hızlı olması gibi avantajları nedeniyle GA çalışmanın birinci aşamasında stator ve rotor parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmıştır. GA'nın akış diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

GA'nın çalışma prensibi sırasıyla şu şekilde sıralanmıştır;

1. Probleme ait olan değişkenler sabit bir kromozom üzerinde gösterilir, popülasyon büyüklüğü seçilir, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları seçilir.
2. Her bir bireyin performans ölçütünü gösteren bir uygunluk fonksiyonu belirlenir.
3. Rastgele bir biçimde başlangıç popülasyonu oluşturulur.
4. Popülasyon içerisindeki her bir birey için uygunluk değerleri hesaplanır.
5. Uygunluk değerine göre, çaprazlama işlemi için en uygun aileler seçilir.
6. Çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanarak yavru bireyler oluşturulur.
7. Yeni bir nesil üretmek için popülasyon içerisindeki eski bireyler atılır, yeni bireyler yerleştirilir.
8. 4.adım'dan itibaren işlemler istenen sonuç elde edilene kadar ya da belirlenen döngü sayısına kadar tekrar edilir.



**Şekil 4.2.** GA'nın Akış Diyagramı

GA, optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir yöntemdir. GA'nın avantajlarından bazıları aşağıda verilmiştir (65).

- GA'da geçişler olasılıklı olduğu için geniş bir arama alanında çalışır böylece global optimum çözümü elde etme şansı fazladır.
- Optimum çözüme ulaşmada çözüm alanı içerisinde çalışmasından dolayı, bölgesel optimum çözüme takılı kalma problemi en az seviyede olur.

GA'nın avantajlarının yanında doğası gereği bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Her bir adımda optimum çözüme yakınsayacağı garanti değildir.
- Optimum çözümü elde etmede daha fazla döngüye ve süreye ihtiyaç duyar.
- Uygunluk Fonksiyonu gerektiği gibi tanımlanamamışsa, optimum çözüm bulunamayabilir.
- Pek çok tanımlanması gereken parametresi vardır, bunların tanımlanması özenle yapılmalıdır.

### 4.3 Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, giriş parametrelerinin belirli sınırlar içerisinde belirli oranda değiştirilerek, çıkış değerinin nasıl değiştiğini gözlemlememizi sağlayan bir analiz yöntemidir (66). Duyarlılık analizinin adımları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2.** Duyarlılık Analizi Tablosu

| <b>Durumlar</b><br><b>Parametreler</b> | $D_1$    | $D_2$    | . | . | $D_k$    |
|----------------------------------------|----------|----------|---|---|----------|
| $G_i$                                  | $X_{i1}$ | $X_{i2}$ | . | . | $X_{ik}$ |
| .                                      | .        | .        | . | . | .        |
| .                                      | .        | .        | . | . | .        |
| $\zeta_j$                              | $X_{j1}$ | $X_{j2}$ | . | . | $X_{jk}$ |
| .                                      | .        | .        | . | . | .        |
| .                                      | .        | .        | . | . | .        |

Tablo 4.2’de;

- $i, j = 1, 2, 3, \dots, k$  tam sayıları,
- $D_1, D_2, \dots, D_k$ : Analiz edilen durumları,
- $G_i$ : Giriş parametrelerini,
- $\zeta_j$ : Çıkış parametrelerini,
- $X_k$ : Parametrelerin değerlerini temsil etmektedir.

Burada birden çok giriş parametresi varsa her biri kontrollü bir şekilde değiştirilip çıkış parametrelerindeki değişim gözlenmektedir. En iyi çıkış değerleri üretilen durumdaki parametreler tasarım parametreleri olarak kullanılır. Örneğin; bir motorun ürettiği tork değerinin rotor uzunluğu ve rotor çapına göre değişimi analiz edilmek isteniyor olsun. Giriş parametreleri olan rotor uzunluğu ve rotor çapının her bir farklı değeri için bir durum oluşturulur. Bu durumlar çıkış değeri olan üretilen torka göre değerlendirilir. En uygun tork değerinin elde edildiği rotor uzunluğu ve rotor çapı tespit edilir. Tasarlanacak motorda bu tespit edilen değerler kullanılır.

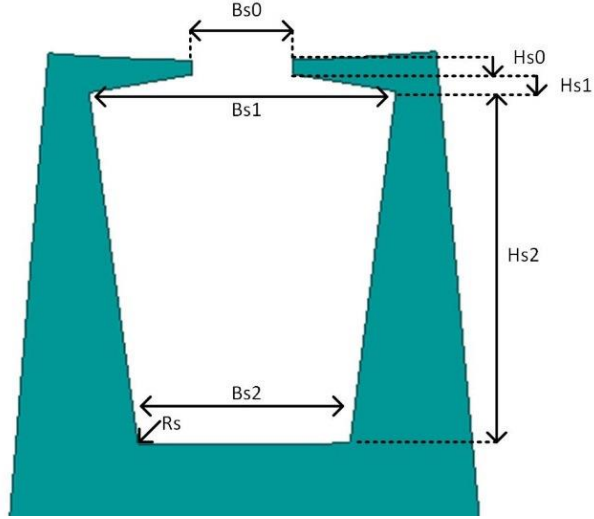
## 5. SYNRM'NİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışmasında yeni nesil elektrikli araçlar için yüksek güçlü, yüksek hızlı ve verimli bir SynRM tasarımı hedeflenmiştir. Bu hedeflenen motorun özellikleri için EA'lara göre tasarlanmış bir elektrik motorunun özellikleri referans alınmıştır (28). Hedeflenen SynRM'nin karşılaması istenen özellikleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** Hedeflenen SynRM'nin Özellikleri

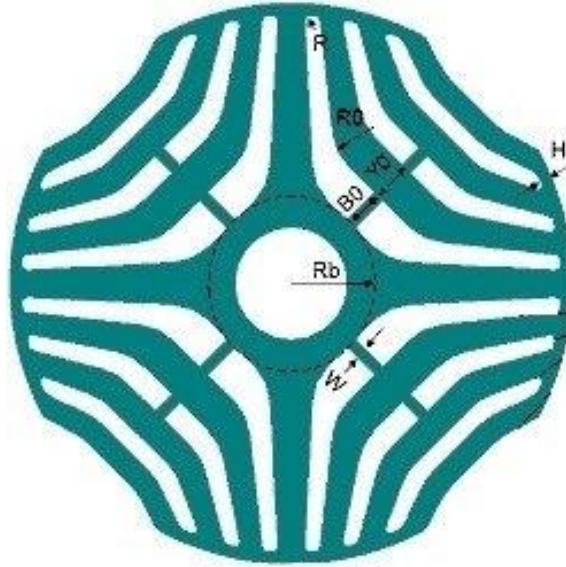
| Parametreler                       | Değerler |
|------------------------------------|----------|
| Faz sayısı                         | 3        |
| Kutup sayısı                       | 4        |
| Faz gerilimi (V)                   | 650      |
| En fazla faz akımı (A)             | <500     |
| En fazla güç (kW)                  | >250     |
| Tork (Nm)                          | >380     |
| Tork dalgalanması (%)              | <15      |
| En yüksek hız (d/d)                | 10000    |
| En yüksek tork (Nm) @En yüksek hız | >100     |
| Verim (%)                          | >90      |
| Frekans (Hz)                       | 50       |

SynRM'nin sunduğu özellikler geometrik parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu parametrelerdeki herhangi bir değişiklik, SynRM'nin tork, güç, verim ve hız gibi özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden iyi bir tasarım için parametrelerin doğru değerlerde seçilmesi önemlidir. SynRM de diğerleri gibi stator ve rotora sahip bir elektrik makinesidir. Statorunda olukların dış genişlikleri, olukların alt ve üst genişlikleri ve olukların yükseklikleri gibi motorun performansını etkileyen önemli parametreleri vardır. Rotorunda ise akı bariyerleri genişliği, demir bölütlerin genişliği, kaburga genişliği ve köprü genişliği gibi önemli parametreler vardır. Bu çalışmada tüm bu parametrelerin SynRM'nin performansına olan etkileri incelenmiştir. SynRM'nin stator parametreleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.1.** SynRM'nin Stator Oluk Parametreleri

Şekil 5.1'deki  $Bs0$ : Stator oluk diş arası genişliğini,  $Bs1$ : Stator oluk üst genişliğini,  $Bs2$ : stator oluk alt genişliğini,  $Rs$ : Stator oluk tabanı girinti miktarını,  $Hs0$ : Stator oluk diş kalınlığını,  $Hs1$ : Diş ile sargı alanı arası mesafeyi ve  $Hs2$  ise stator oluk yüksekliğini ifade etmektedir. SynRM'nin rotor parametreleri de Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.2.** SynRM'nin Rotor Parametreleri

Şekil 5.2'deki Rb: Akı bariyerinin başlama çapını, B0: Akı bariyeri hava aralığını, Y0: Demir bölüt genişliğini, H: Akı bariyeri ile rotor dış çapı arasındaki genişliğini, R: Akı bariyeri ucunun girinti miktarını, W: Köprü genişliğini ifade etmektedir.

Bu çalışmada SynRM'nin tasarımını gerçekleştirmek için Ansys Maxwell paket programı tercih edilmiştir. Tasarımın yapılabilmesi için Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilen stator ve rotor parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunun için literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiş ve başlangıç parametreleri bu şekilde belirlenmiştir. Başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin hedeflenen özellikleri karşılayamayacağı tahmin edilmektedir. SynRM'nin hedeflenen özellikleri karşılaması için stator ve rotor parametrelerine sırasıyla optimizasyon yapılması planlanmıştır. Bölüm 5 'te, yapılan optimizasyonlar ve tasarım aşamaları sırasıyla verilmiştir. Birinci kısımda başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin tasarım ve analiz sonuçları gösterilmiştir. İkinci kısımda SynRM'nin performansını iyileştirmek üzere, stator parametrelerinde optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonrasında yeni tasarlanan SynRM'nin akım, tork ve tork dalgalanması analiz edilmiştir ve analiz sonuçları incelenmiştir. Üçüncü kısımda SynRM'nin rotor parametrelerinde optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bir önceki kısımdaki optimizasyon ile elde edilen stator parametreleri ve yeni optimizasyon sonucu elde edilen rotor parametreleri ile tasarlanan SynRM incelenmiştir. Dördüncü kısımda hem stator hem de rotor parametreleri için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon ile bir önceki kısımdan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir fakat hedeflenen kriterler karşılanamamıştır. Beşinci kısımda ise SynRM'nin statoruna burma açısı eklenmiştir. Burma açısındaki değişiminin, SynRM'nin performansına olan etkileri incelenmiştir. En yüksek performans değeri sağlayan burma açısı belirlenmiştir. Belirlenen burma açısı ve optimizasyon sonucu elde edilen parametreler ile tasarlanan SynRM, hedeflenen kriterleri sağladığı görülmüştür. Yapılan tasarım, optimizasyon ve analizler aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

### 5.1 Başlangıç Parametreleri Kullanılarak Gerçekleştirilen Tasarım

Bu kısımda, SynRM'nin tasarımı için stator ve rotor parametrelerine başlangıç değerleri atanmıştır.

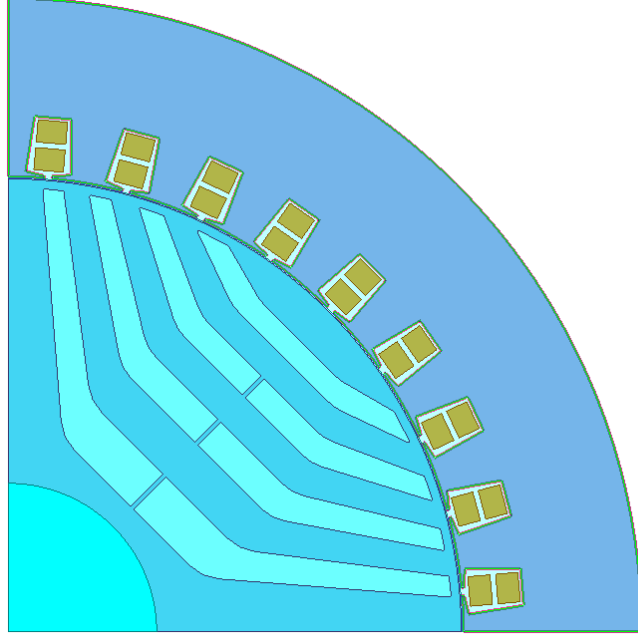
SynRM'nin statorunun ve rotorunun başlangıç parametreleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.2.** SynRM'nin Başlangıç Parametre Değerleri

| Parametreler  | Değerler |
|---------------|----------|
| <b>Stator</b> |          |
| Bs0 (mm)      | 2        |
| Bs1 (mm)      | 12       |
| Bs2 (mm)      | 10       |
| Hs0 (mm)      | 0,6      |
| Hs1 (mm)      | 0,7      |
| Hs2 (mm)      | 15       |
| Rs (mm)       | 0,1      |
| Dış çap (mm)  | 341,2    |
| İç çap (mm)   | 245,2    |
| Uzunluk (mm)  | 172      |
| <b>Rotor</b>  |          |
| W (mm)        | 1,01     |
| R (mm)        | 0,44     |
| H (mm)        | 2,33     |
| Rb (mm)       | 47,14    |
| B0 (mm)       | 12,45    |
| Y0 (mm)       | 11,99    |
| R0 (mm)       | 12,64    |
| Dış çap (mm)  | 244      |
| İç çap (mm)   | 80       |
| Uzunluk (mm)  | 172      |



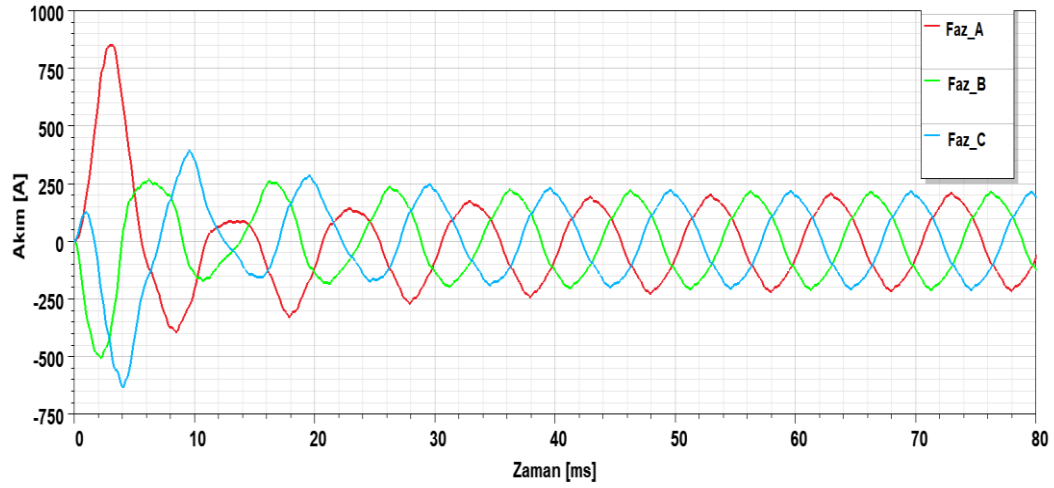
Başlangıç değerleri kullanılarak oluşturulan SynRM'nin stator ve rotor yapısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



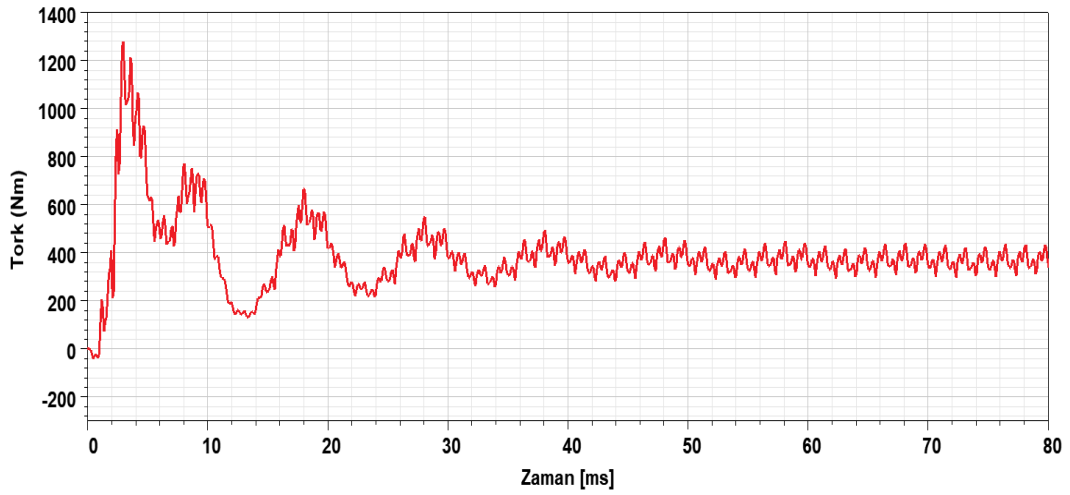
**Şekil 5.3.** Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Yapısı

Başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin tork ve akım değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen tork bilgisinden de tork dalgalanması hesaplanmaktadır. Tork dalgalanması ( $T_{dal}$ ) Denklem (5.1)'de gösterilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin akım ve tork grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde SynRM'nin faz akımlarının tepe değeri 209,13 A ve çekilen akımın rms değeri 141,83 A olduğu görülmüştür. Bu durum hedeflenen kriterlere uymaktadır. Şekil 5.5 incelendiğinde ise üretilen torkun ortalama 367,69 Nm ve tork dalgalanmasının ise %39,84 olduğu görülmüştür.

$$T_{dal} = \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{ort}} \times 100 \quad (5.1)$$



**Şekil 5.4.** Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği



**Şekil 5.5.** Başlangıç Değerleri Kullanılarak Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, henüz herhangi bir parametre optimizasyonu yapılmadığı için tork dalgalanması çok yüksektir. Tork dalgalanmasını azaltmak için SynRM'nin parametrelerine optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada optimizasyon için Genetik Algoritma (GA) tercih edilmiştir. GA için detaylı anlatım 4.2'nci bölümde sunulmuştur.

Başlangıç parametreleri ile tasarlanan SynRM'nin tork dalgalanması yüksek olduğu için GA'nın uygunluk fonksiyonu belirlenirken bu durum göz önünde

bulundurulmuştur. Bunun için GA’da kullanılan uygunluk fonksiyonu Denklem (5.3) ve (5.4)’ deki gibi seçilmiştir.

$$\text{Uygunluk fonksiyonu [1]} = \text{ortalama}(T_e) \quad (5.3)$$

$$\text{Uygunluk fonksiyonu [2]} = \frac{T_{\text{maks}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{ort}}} \times 100 \quad (5.4)$$

GA’da uygunluk fonksiyonu iki durum için tanımlanmıştır. Bunlardan biri ortalama torkun 380 Nm’den daha büyük olması, diğeri ise tork dalgalanmasının %15’ten daha küçük olmasıdır. Optimizasyon için uygunluk fonksiyonu belirlendikten sonra stator, rotor ve hem stator hem de rotor parametrelerinde sırasıyla optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

## 5.2 GA ile SynRM’nin Stator Parametreleri Optimizasyonu

Tasarlanan SynRM’nin hedeflenen özellikleri karşılayabilmesi için yüksek tork dalgalanmasının düşürülmesi gerekmektedir. Bu probleme bir çözüm bulmak için SynRM’nin stator parametrelerine GA kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen parametreler ve optimizasyonun hangi sınır değerleri arasında yapıldığı Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

**Tablo 5.3.** SynRM’nin Optimizasyonunda Kullanılan Stator Parametreleri ve Sınır Değerleri

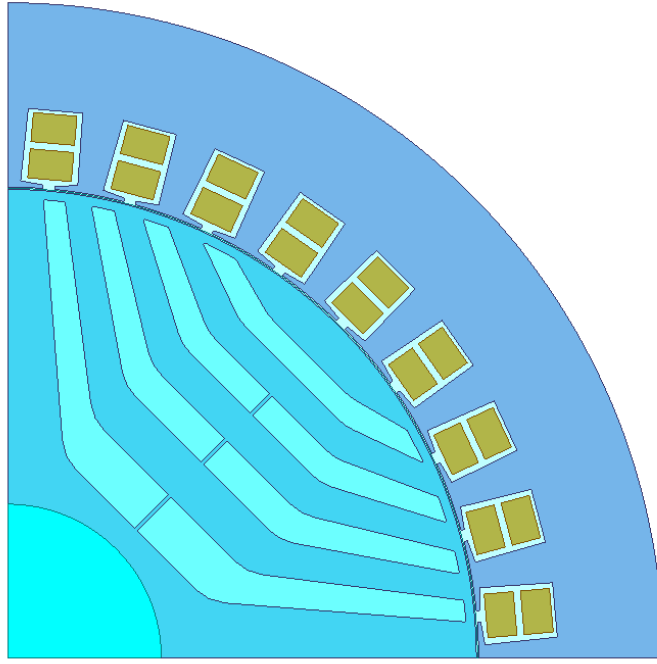
| Parametreler | Alt ve üst sınırlar |
|--------------|---------------------|
| Bs0 (mm)     | 1,8 – 5             |
| Bs1 (mm)     | 8 – 16              |
| Bs2 (mm)     | 8 – 16              |
| Hs0 (mm)     | 0,25 – 1            |
| Hs1 (mm)     | 0,3 – 1             |
| Hs2 (mm)     | 12 – 24             |
| Rs (mm)      | 0 – 1               |

Optimizasyonda kullanılan parametrelerin sınırları, stator oluk sayısını değiştirmeden fiziksel olarak mümkün olan en alt ve en üst değerler seçilmiştir. SynRM'nin rotor parametreleri için herhangi bir optimizasyon gerçekleştirilmeden başlangıç değerleri kullanılmıştır. Böylece sadece stator parametrelerinin optimizasyonunun SynRM'nin çıkış değerlerine etkisi incelenmiştir. Optimizasyon ile elde edilen yeni stator parametreleri ve değişim miktarı Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.4.** SynRM'nin Stator Optimizasyon Sonuçları

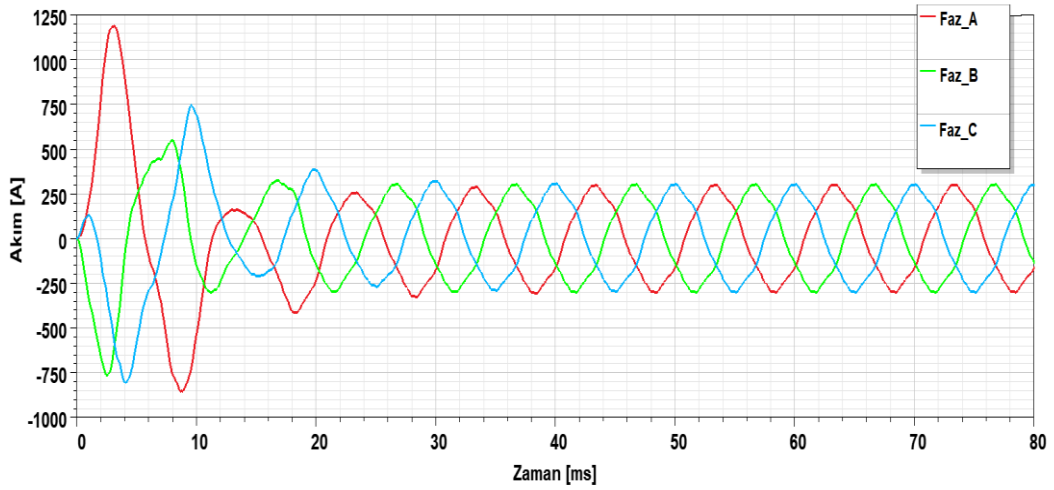
| Parametreler | Değişim miktarı | Yeni değerler |
|--------------|-----------------|---------------|
| Bs0 (mm)     | +1,084          | 3,084         |
| Bs1 (mm)     | +2,930          | 14,930        |
| Bs2 (mm)     | +4,221          | 14,221        |
| Hs0 (mm)     | +0,296          | 0,896         |
| Hs1 (mm)     | -0,121          | 0,579         |
| Hs2 (mm)     | +3,926          | 18,926        |
| Rs (mm)      | -0,091          | 0,009         |

Yapılan optimizasyon sayesinde elde edilen yeni stator parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin yapısı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Yeni değerler ile SynRM'nin stator oluklarının dış genişliğine oranı arttığı görülmektedir. Böylece daha geniş bir stator oluğu elde edilmiştir.

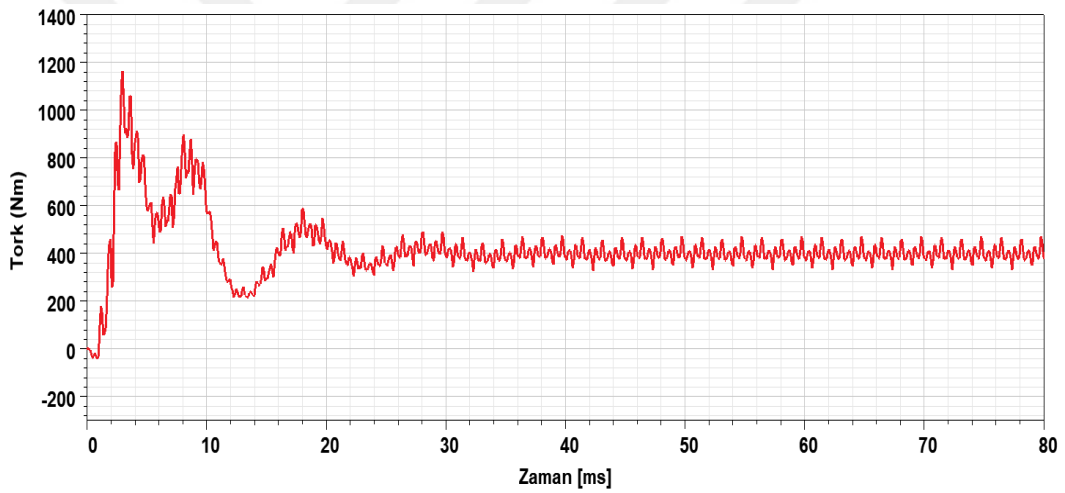


**Şekil 5.6.** Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı

Optimizasyon ile SynRM'nin stator parametrelerindeki değişim, çıkış değerlerini değiştirmiştir. Yeni SynRM'nin çıkış torku 367,69 Nm'den 399,57 Nm'ye yükselmiştir. Tork dalgalanması ise %39,84'ten %35,67' ye düşürülmüştür. SynRM'nin akımları incelendiğinde faz akımlarının tepe değeri 300,15 A ve akımların rms değerinin 204,23 A olduğu görülmüştür. SynRM'nin stator parametreleri için optimizasyon gerçekleştirildiğinde daha geniş bir stator oluğu elde edilmiştir. Daha geniş tasarlanan oluklar ise daha fazla miktarda sargı alanına imkân sağlamaktadır. Böylece sargılardan akan akım miktarı arttığı için SynRM'nin çıkış torku da artmıştır. SynRM'nin akım grafiği ve tork grafiği Şekil 5.7'de ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.7.** Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği



**Şekil 5.8.** Stator Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği

SynRM'nin stator parametreleri için optimizasyon gerçekleştirildiğinde Tablo 5.1'de belirtilen ortalama tork değerine ulaşılmıştır. SynRM'nin tork dalgalanması incelendiğinde, optimizasyon ile tork dalgalanmasında iyileşme sağlanmıştır fakat hala hedeflenen değere ulaşamamıştır. Daha iyi bir tork dalgalanması elde etmek için SynRM'nin rotor parametrelerinde de optimizasyon yapılmıştır.

### 5.3 GA ile SynRM'nin Rotor Parametreleri Optimizasyonu

SynRM'nin rotorunda herhangi bir sargı ya da mıknatıs bulunmamaktadır. Rotorun anizotropi yapısı sayesinde relüktans kuvveti oluşmaktadır. Bu da motorun tork üretmesini sağlamaktadır. Bundan dolayı SynRM'nin rotor yapısı çok önemlidir. Çalışmanın bu kısmında SynRM'nin rotor parametrelerinde optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonun gerçekleştirildiği rotor parametreleri ve sınır değerleri Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.5.** SynRM'nin Optimizasyonunda Kullanılan Rotor Parametreleri ve Sınır Değerleri

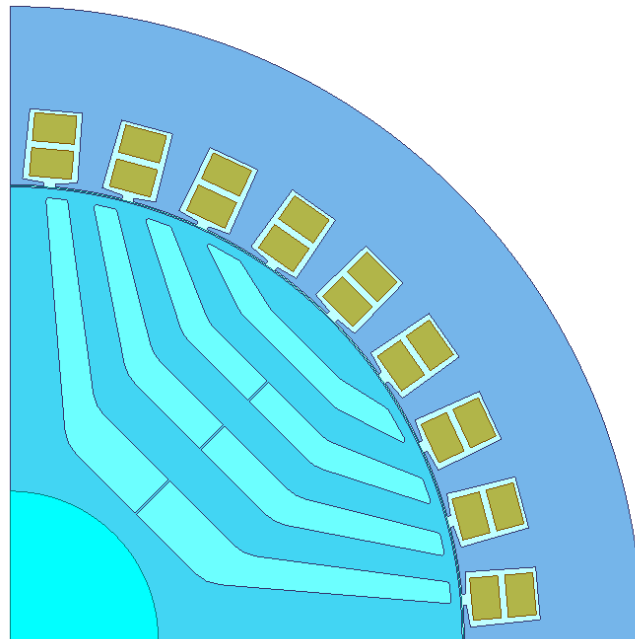
| Parametreler | Alt ve üst sınırlar |
|--------------|---------------------|
| W (mm)       | 0,5 – 1,5           |
| R (mm)       | 0,25 – 1            |
| H (mm)       | 0,5 – 3             |
| Rb (mm)      | 45 – 50             |
| B0 (mm)      | 10 – 13             |
| Y0 (mm)      | 10 – 13             |
| R0 (mm)      | 8 – 14              |

Optimizasyonun gerçekleştirildiği rotor parametrelerinin alt ve üst sınırları, akı bariyerlerinin sayısını değiştirmeden fiziksel olarak mümkün olan en küçük ve en büyük değerler olacak şekilde seçilmiştir. SynRM'nin stator parametreleri için bir önceki kısımdaki optimizasyon sonucu elde edilen parametreler kullanılmıştır. Böylece bu optimizasyonda sadece rotor parametrelerinin SynRM'nin çıkış değerlerine etkisi incelenmiştir. Optimizasyon ile elde edilen yeni rotor parametreleri ve değişim miktarı Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 5.6.** SynRM'nin Rotor Optimizasyon Sonuçları

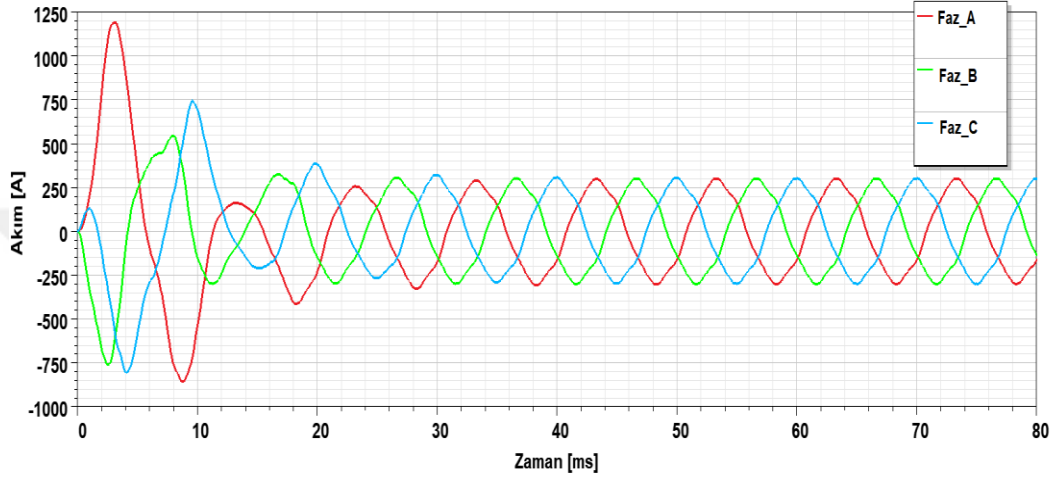
| Parametreler | Değişim miktarı | Yeni değerler |
|--------------|-----------------|---------------|
| W (mm)       | -0,451          | 0,559         |
| R (mm)       | +0,379          | 0,821         |
| H (mm)       | +0,166          | 2,498         |
| Rb (mm)      | +0,819          | 47,964        |
| B0 (mm)      | +0,248          | 12,705        |
| Y0 (mm)      | -0,022          | 11,973        |
| R0 (mm)      | -1,812          | 10,830        |

Yapılan optimizasyon sayesinde elde edilen yeni rotor parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin yapısı Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Yeni SynRM'nin rotorunda optimizasyon sayesinde bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Optimizasyon ile yeni rotorun köprü genişliği (W) azalmış ve akı bariyeri hava aralığı (B0) artmıştır. Bu durum rotor yapısını, relüktans kuvveti arttıracak şekilde geliştirmiştir. Ayrıca diğer parametrelerdeki değişimler de tork dalgalanmasını azaltmıştır.

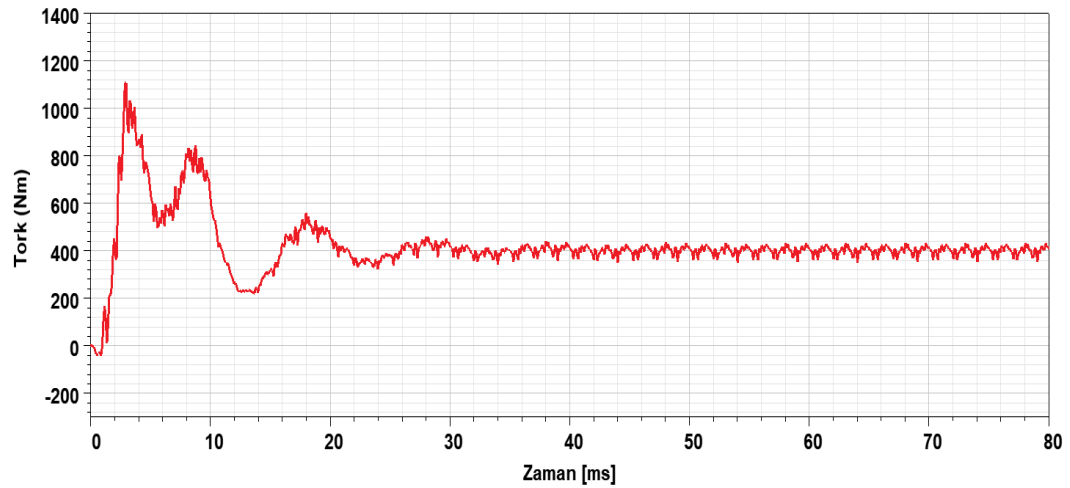
**Şekil 5.9.** Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı



SynRM'nin rotor parametrelerinin optimizasyonu ile çıkış değerleri değişmiştir. Yeni SynRM'nin çıkış torku 400,96 Nm olarak ölçülmüştür. Tork dalgalanması %35,67'den %20,88'e düşürülmüştür. SynRM'nin akımları incelendiğinde, faz akımlarının tepe değeri 300,02 A ve akımların rms değeri ise 204,63 A olduğu görülmüştür. Elde edilen akım ve tork grafikleri Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de verilmiştir.



**Şekil 5.10.** Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği



**Şekil 5.11.** Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği

SynRM'nin rotor parametrelerinin optimizasyonu sayesinde daha düşük bir tork dalgalanması elde edilmiştir. Elde edilen tork dalgalanma oranı hedeflenen kriterle kıyaslandığında henüz yeterli seviyede olmadığı anlaşılmaktadır. Bu yüzden, daha düşük bir tork dalgalanması elde etmek için SynRM'nin hem stator hem de rotor parametrelerine optimizasyon yapılmıştır.

#### 5.4 GA ile SynRM'nin Stator ve Rotor Parametrelerinin Optimizasyonu

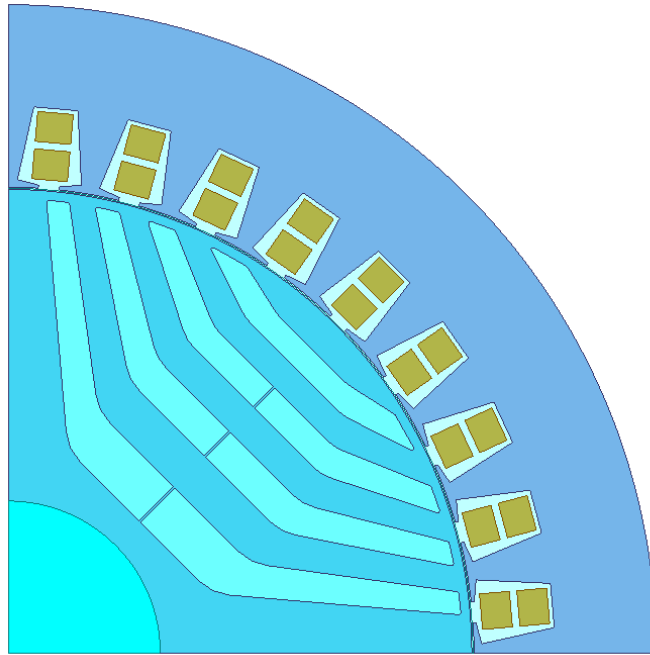
SynRM'nin stator ve rotor parametreleri için sırasıyla optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Her aşamada daha iyi bir çıkış değeri elde edilmiştir fakat hedeflenen tork dalgalanmasına ulaşamamıştır. Tork dalgalanması SynRM için en büyük dezavantajlardan birisidir. Bunun için tork dalgalanmasını azaltmak amacıyla SynRM'nin hem stator hem de rotor parametrelerine birlikte optimizasyon yapılmıştır. Daha önceki optimizasyonlarda kullanılan parametre sınırları yine aynı şekilde tanımlanmıştır. Yeni optimizasyon ile stator ve rotor parametrelerinin değişim miktarları ve yeni değerleri Tablo 5.7 gösterilmiştir.

**Tablo 5.7.** SynRM'nin Stator ve Rotor Optimizasyon Sonuçları

| Parametreler  | Değişim Miktarı | Yeni değerler |
|---------------|-----------------|---------------|
| <b>Stator</b> |                 |               |
| Bs0 (mm)      | +2,491          | 5,575         |
| Bs1 (mm)      | +1,273          | 16,203        |
| Bs2 (mm)      | -2,486          | 11,735        |
| Hs0 (mm)      | -0,104          | 0,792         |
| Hs1 (mm)      | +0,391          | 0,970         |
| Hs2 (mm)      | +0,277          | 19,203        |
| Rs (mm)       | +0,209          | 0,218         |
| <b>Rotor</b>  |                 |               |
| W (mm)        | +0,089          | 0,648         |

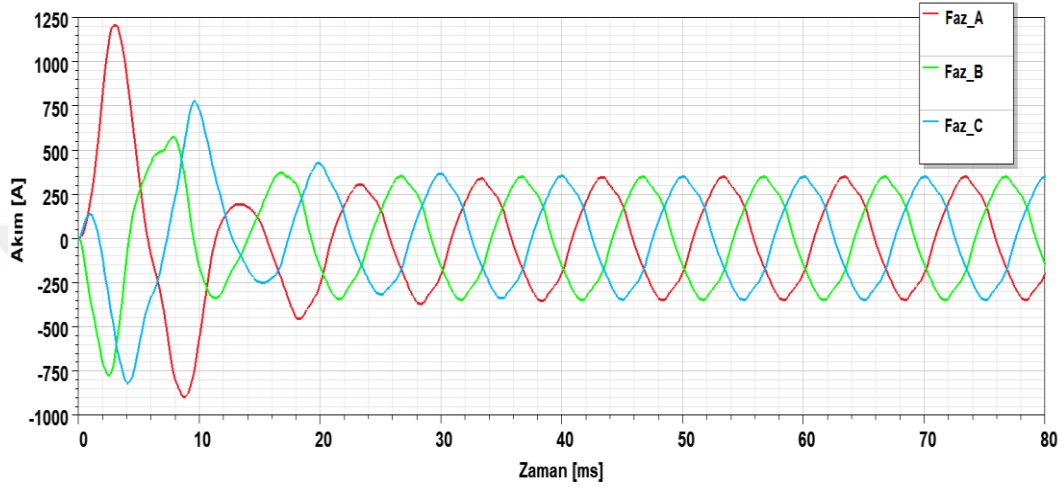
|         |        |        |
|---------|--------|--------|
| R (mm)  | -0,156 | 0,665  |
| H (mm)  | -0,123 | 2,375  |
| Rb (mm) | +0,967 | 48,931 |
| B0 (mm) | +0,152 | 12,857 |
| Y0 (mm) | -0,561 | 11,412 |
| R0 (mm) | +1,990 | 12,820 |

Yapılan optimizasyon sayesinde elde edilen yeni stator ve rotor parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin yapısı Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Yeni stator parametreleri ile daha geniş stator oluğu elde edilmiştir. Bu sayede yeni SynRM'nin sargılarından daha yüksek akım akabilmektedir. Bu da daha yüksek çıkış torku elde etmeyi sağlamaktadır. Yeni rotor parametreleri de SynRM'nin daha iyi çıkış değerleri elde etmesini sağlamıştır.

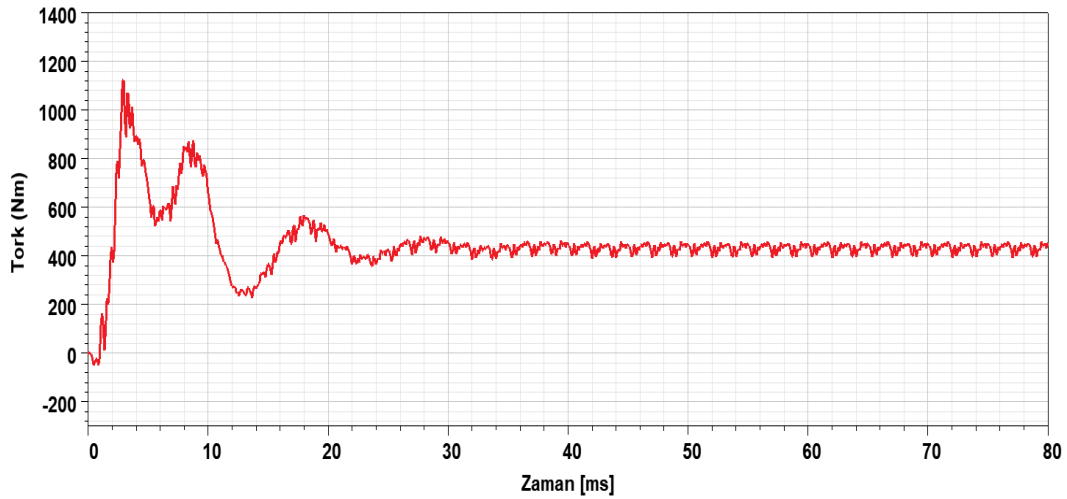


**Şekil 5.12.** Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Yapısı

Gerçekleştirilen optimizasyon sayesinde tasarlanan SynRM'nin tork değerleri iyileştirilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen parametreler sayesinde yeni SynRM'nin çıkış torku 400,96 Nm'den 432,13 Nm'ye yükseltilmiştir. Tork dalgalanması ise %20,88'den %16,30'a düşürülmüştür. Yeni SynRM'nin faz akımlarının tepe değeri 347,79 A ve akımların rms değeri ise 238,76 A'dır. Elde edilen akım ve tork grafikleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de verilmiştir.

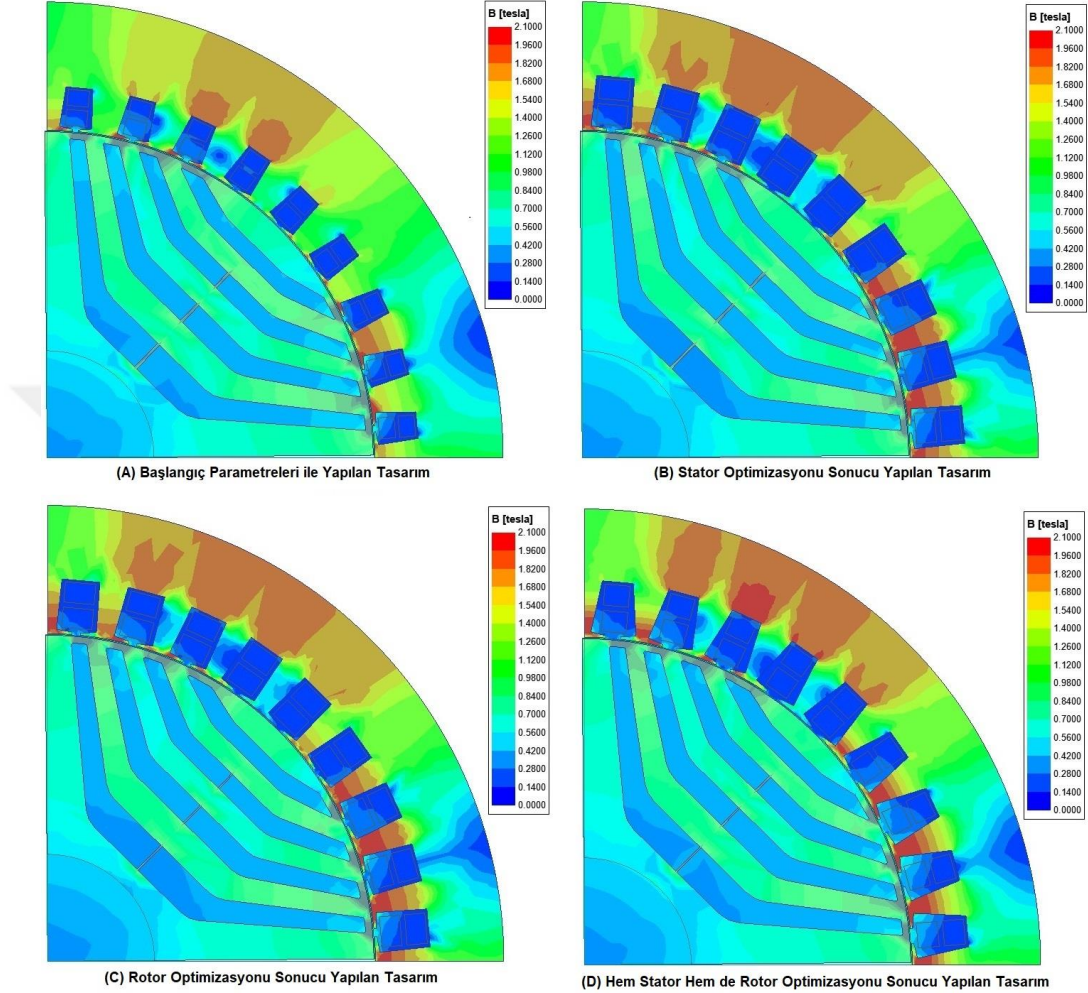


**Şekil 5.13.** Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği



**Şekil 5.14.** Stator ve Rotor Optimizasyonu Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği

Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sürecinde tasarlanan SynRM'nin manyetik akı dağılımının değişimi Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Optimizasyon sürecinde manyetik akı yoğunluğu artış göstermiştir.



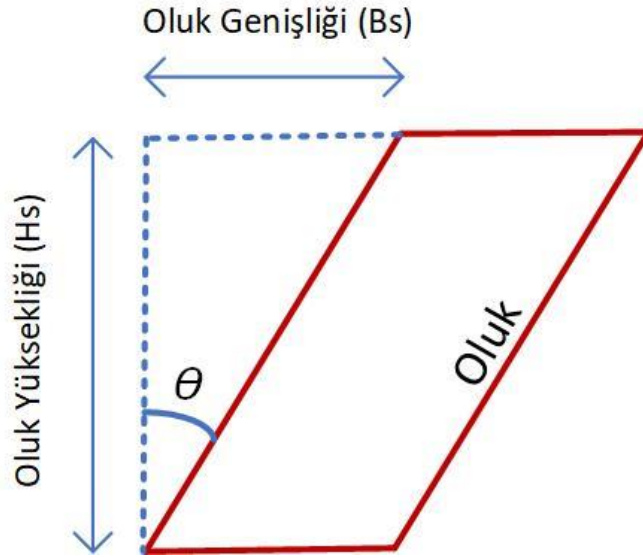
**Şekil 5.15.** GA Optimizasyonu Boyunca Tasarlanan SynRM'nin Manyetik Akı Dağılımı

SynRM'nin stator ve rotor parametrelerinin optimizasyonu tork dalgalanmasını düşürmüştür fakat elde edilen tork dalgalanması hedeflenen değerden daha yüksektir. Bir sonraki adımda tork dalgalanmasını iyileştirmek için SynRM'nin statoruna burma açısı eklenmiştir.

## 5.5 Duyarlılık Analizi ile SynRM'nin Optimizasyonu

Duyarlılık analizi, girdi parametrelerinin belirli sınırlar içinde değiştirilerek çıktı ifadesinin gözleendiği bir analiz yöntemidir. Duyarlılık analizi ile ilgili detaylı bilgi 4.3'üncü bölümde sunulmuştur. Tasarlanan SynRM'nin tork dalgalanmasını düşürmek için burma tekniği kullanılmıştır. Literatürde, elektrik makinesi tasarımı konusunda burma tekniği kullanıldığı pek çok çalışmalar vardır. Bu çalışmalardan bazılarında burma tekniği rotora uygulanmış (18), (67), bazılarında ise stator üzerine uygulanmıştır (68).

Çalışmanın bu kısmında SynRM'nin tork dalgalanmasını azaltmak için statoruna burma tekniği uygulanmıştır. SynRM'nin statorunun burma konsepti Şekil 5.16' de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. SynRM'nin Stator Burma Konsepti

Şekil 5.16'de gösterilen  $\theta$ ,  $B_s$  ve  $H_s$  sırasıyla statorun burulma açısını, oluk genişliğini ve oluk yüksekliğini ifade etmektedir. Burma açısı Denklem (5.5) ve (5.6) yardımıyla bulunur.

$$\tan(\theta) = \frac{B_s}{H_s} \quad (5.5)$$

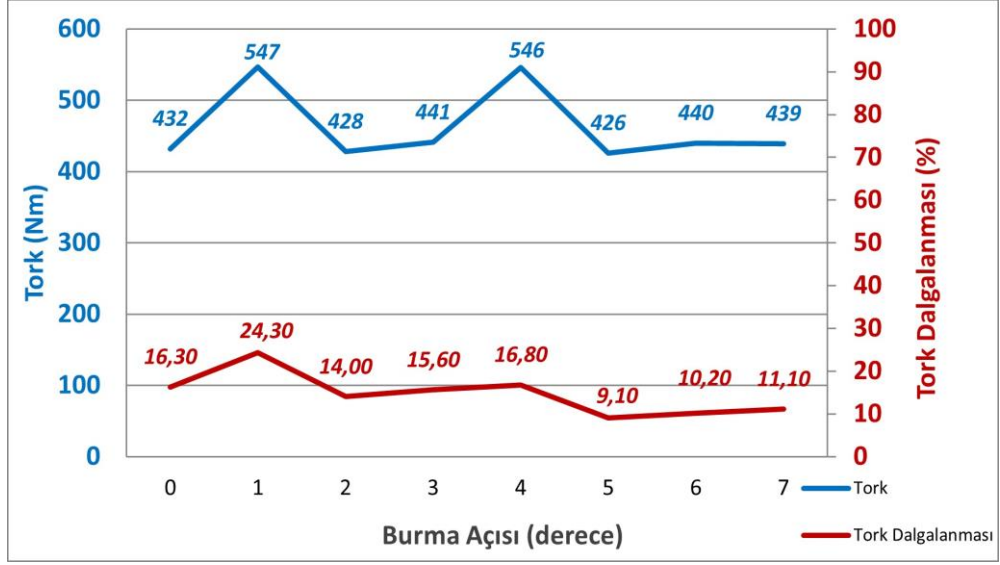
$$\theta_{burma} = \tan^{-1} \frac{B_s}{H_s} \quad (5.6)$$

SynRM'nin tork dalgalanmasını azaltmak için duyarlılık analizinde burma açısı dışında tüm giriş parametreleri sabit alınmıştır. Stator için burma açısı 1°'lik artışlarla 0'dan 7°'ye kadar değiştirilmiştir. Burma açısının değişimine göre SynRM'nin çıkış torku ve tork dalgalanması gözlemlenmiştir. En düşük tork dalgalanması, SynRM'nin stator burma açısının 5° olduğu tasarımda elde edilmiştir. Daha önceki optimizasyonlar ile tork dalgalanması %16,30'a kadar azaltılabilmisti. SynRM'nin statoruna 5° 'lik bir burma açısı eklendiğinde elde edilen tork dalgalanması %9,1'e kadar azaltılmıştır. Duyarlılık analizinin sonuçları Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.8.** Burma Açısına Göre Tork ve Tork Dalgalanması Değerleri

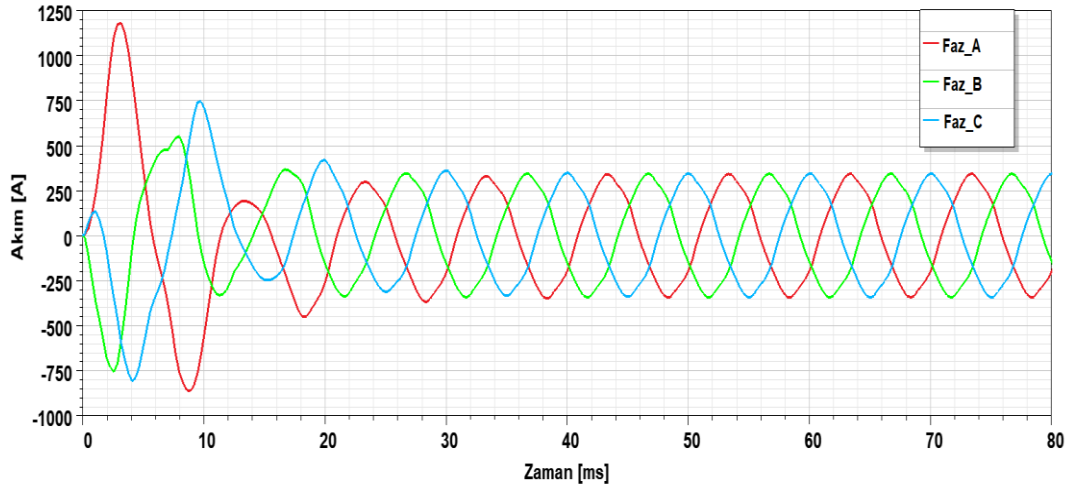
| Burma Açısı (°) | Tork (Nm) | Tork Dalgalanması (%) |
|-----------------|-----------|-----------------------|
| 0               | 432       | 16,2                  |
| 1               | 547       | 24,3                  |
| 2               | 428       | 14,0                  |
| 3               | 441       | 15,6                  |
| 4               | 546       | 16,8                  |
| 5               | 426       | 9,1                   |
| 6               | 440       | 10,2                  |
| 7               | 439       | 11,1                  |

Tablo 5.8 incelendiğinde burma açısının 2, 5, 6 ve 7° olduğu tasarımlarda tork dalgalanması %15'in altında ve çıkış torku da 380 Nm'nin üzerinde elde edilmiştir. Bu değerler hedeflenen tork ve tork dalgalanması kriterlerini sağlamaktadır. SynRM'nin stator burma açısına göre çıkış torku ve tork dalgalanmasını gösteren grafik Şekil 5.17'da gösterilmiştir.



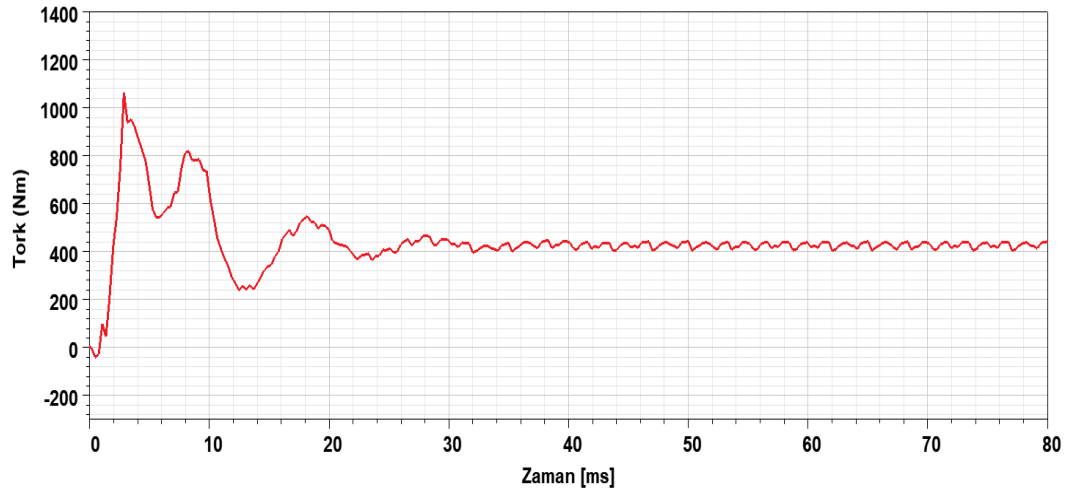
**Şekil 5.17.** Stator Burma Açısının Değişimine Göre SynRM'nin Tork ve Tork Dalgalanması Grafiği

Yapılan duyarlılık analizinin sonuçlarına göre en iyi tork dalgalanması, burma açısının  $5^\circ$  olduğu tasarımda elde edilmiştir. Bu parametre ile tasarlanan SynRM'nin çıkış torku 426 Nm ve tork dalgalanması ise %9,1 olarak ölçülmüştür. SynRM'nin faz akımlarının tepe değeri 340,93 A ve akımların rms değeri ise 236,3 A ölçülmüştür. Tasarlanan SynRM'nin akım ve tork grafikleri sırasıyla Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.18.** Duyarlılık Analizi Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Akım Grafiği





**Şekil 5.19.** Duyarlılık Analizi Sonrası Tasarlanan SynRM'nin Tork Grafiği

Optimizasyonlar ve duyarlılık analizi sayesinde, SynRM'nin en iyi stator ve rotor parametreleri belirlenmiş oldu. Bu parametrelerle tasarlanan SynRM hedeflenen özellikleri karşılamaktadır. Bu parametrelerin, optimizasyon ve duyarlılık analizi işlemleri sırasında nasıl değiştikleri ve SynRM'nin tork, tork dalgalanması ve faz akımları gibi çıkış değerlerini nasıl etkilediği Tablo 5.9' da gösterilmiştir.

**Tablo 5.9.** SynRM'nin Optimizasyon ve Duyarlılık Analizi Boyunca Parametre Değişimi

| Parametreler           | Başlangıç Değerleri | Stator Optimizasyonu | Rotor Optimizasyonu | Hem Stator Hem de Rotor Optimizasyonu | Duyarlılık Analizi |
|------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------|
| <b>Stator</b>          |                     |                      |                     |                                       |                    |
| <b>Bs0 (mm)</b>        | 2                   | 3,084                | 3,084               | 5,575                                 | 5,575              |
| <b>Bs1 (mm)</b>        | 12                  | 14,930               | 14,930              | 16,203                                | 16,203             |
| <b>Bs2 (mm)</b>        | 10                  | 14,221               | 14,221              | 11,735                                | 11,735             |
| <b>Hs0 (mm)</b>        | 0,6                 | 0,896                | 0,896               | 0,792                                 | 0,792              |
| <b>Hs1 (mm)</b>        | 0,7                 | 0,579                | 0,579               | 0,970                                 | 0,970              |
| <b>Hs2 (mm)</b>        | 15                  | 18,926               | 18,926              | 19,203                                | 19,203             |
| <b>Rs (mm)</b>         | 0,1                 | 0,009                | 0,009               | 0,218                                 | 0,218              |
| <b>Burma Açısı (°)</b> | 0                   | 0                    | 0                   | 0                                     | 5                  |
| <b>Rotor</b>           |                     |                      |                     |                                       |                    |
| <b>W (mm)</b>          | 1,01                | 1,01                 | 0,559               | 0,648                                 | 0,648              |
| <b>R (mm)</b>          | 0,44                | 0,44                 | 0,821               | 0,665                                 | 0,665              |
| <b>H (mm)</b>          | 2,33                | 2,33                 | 2,498               | 2,375                                 | 2,375              |
| <b>Rb (mm)</b>         | 47,14               | 47,14                | 47,964              | 48,931                                | 48,931             |
| <b>B0 (mm)</b>         | 12,45               | 12,45                | 12,705              | 12,857                                | 12,857             |

|                                 |        |        |        |        |        |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Y0 (mm)</b>                  | 11,99  | 11,99  | 11,973 | 11,412 | 11,412 |
| <b>R0 (mm)</b>                  | 12,64  | 12,64  | 10,830 | 12,820 | 12,820 |
| <b>Sonuçlar</b>                 |        |        |        |        |        |
| <b>Tork (Nm)</b>                | 367,69 | 399,57 | 400,96 | 432,13 | 426    |
| <b><math>T_{dal}</math> (%)</b> | 39,84  | 35,67  | 20,88  | 16,30  | 9,1    |
| <b>Faz Akımları (A) (rms)</b>   | 141,83 | 204,23 | 204,63 | 238,76 | 236,3  |

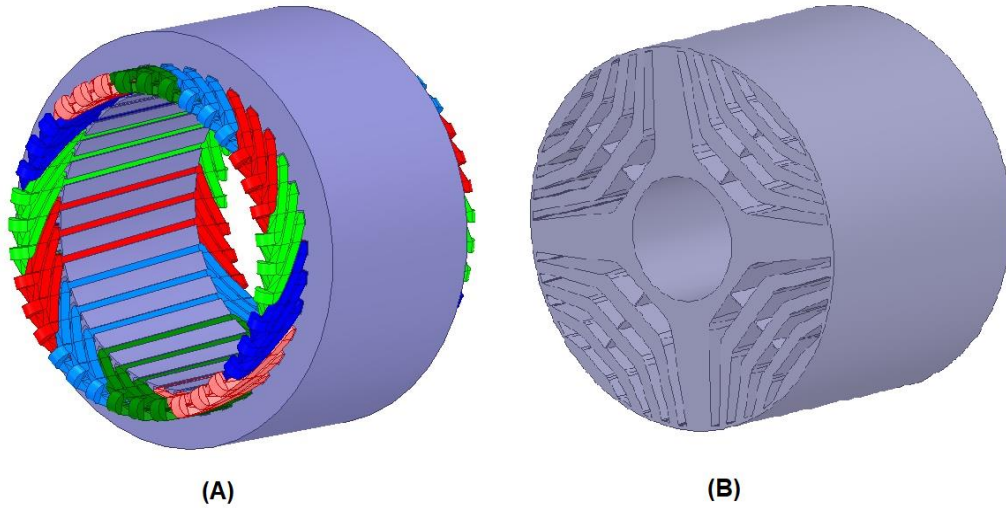
## 5.6 SynRM'nin Elde Edilen En İyi Parametrelerle Tasarımı

Bir önceki bölümlerde genetik algoritma ve duyarlılık analizleri gerçekleştirilerek, Tablo 5.1'deki hedeflenen özelliklere sahip bir SynRM'nin stator ve rotor parametreleri elde edilmişti. Bu bölümde elde edilen parametreler ile SynRM'nin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin parametreleri Tablo 5.10'da gösterildiği gibidir.

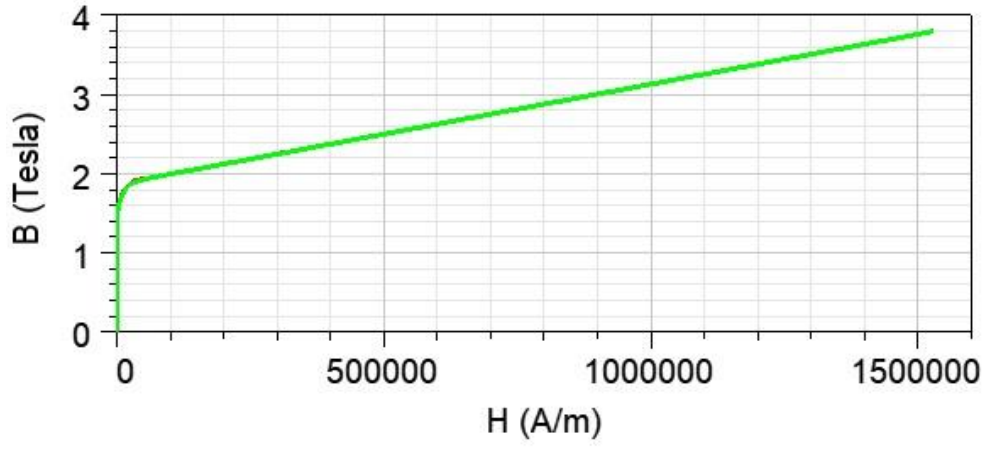
**Tablo 5.10.** Tasarlanan SynRM'nin Stator ve Rotor Parametreleri

| <b>Stator</b>       |                 | <b>Rotor</b>        |                 |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| <b>Parametreler</b> | <b>Değerler</b> | <b>Parametreler</b> | <b>Değerler</b> |
| Bs0 (mm)            | 5,575           | W (mm)              | 0,648           |
| Bs1 (mm)            | 16,203          | R (mm)              | 0,665           |
| Bs2 (mm)            | 11,735          | H (mm)              | 2,375           |
| Hs0 (mm)            | 0,792           | Rb (mm)             | 48,931          |
| Hs1 (mm)            | 0,970           | B0 (mm)             | 12,857          |
| Hs2 (mm)            | 19,203          | Y0 (mm)             | 11,412          |
| Rs (mm)             | 0,218           | R0 (mm)             | 12,820          |
| Burma Açısı (°)     | 5               | Burma Açısı (°)     | 0               |
| Dış çap (mm)        | 341,2           | Dış çap (mm)        | 244             |
| İç çap (mm)         | 245,2           | İç çap (mm)         | 80              |
| Uzunluk (mm)        | 172             | Uzunluk (mm)        | 172             |

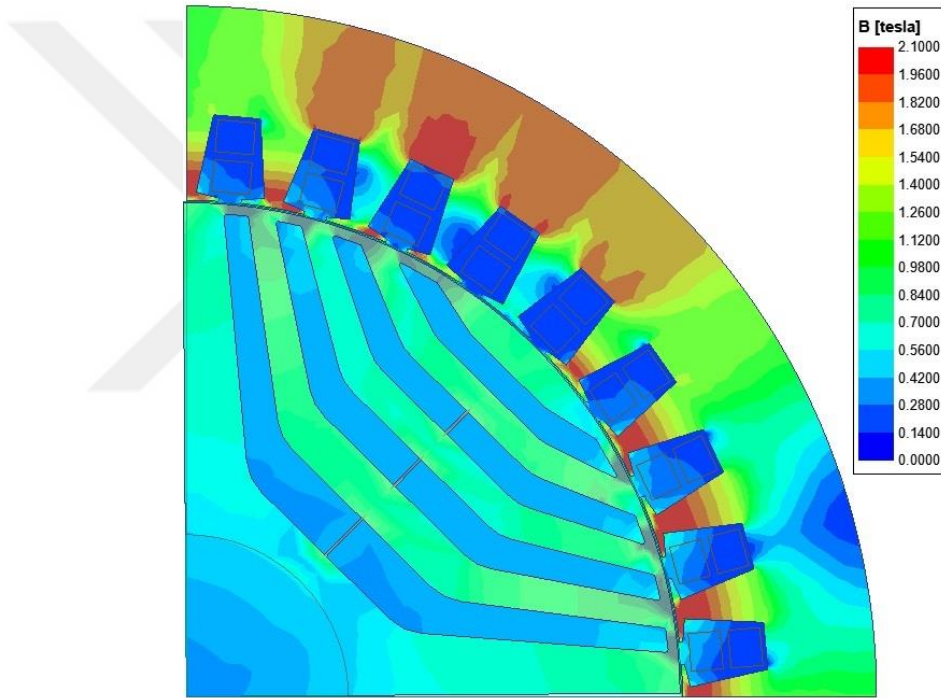
Tablo 5.10’da gösterilen parametreler ile tasarlanan SynRM’nin ağırlığı Ansys Maxwell yardımıyla hesap edilmiştir. Tasarlanan SynRM’nin stator ağırlığının 53,5 kg, rotor ağırlığının 32,3 kg ve toplam ağırlığının 85,8 kg olduğu görülmüştür. Böylece güç yoğunluğu  $3,32 (kW.kg^{-1})$  ve tork yoğunluğu  $5,47 (Nm.kg^{-1})$ ’dir. SynRM’nin 3D görünümü Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Tasarlanan SynRM’nin statoru 3-fazlı, 4-kutuplu, 36 oluklu ve çift katmanlı dağıtık sargı yapısına sahiptir. SynRM’nin rotoru da 4-kutuplu, 4-akı bariyerli bir yapıya sahiptir. Bariyer yapısı hiperbolik-polyline’dır. SynRM’nin hem stator hem de rotor tasarımında M19-24G tipi çelik malzeme tercih edilmiştir. Tasarımda tercih edilen M19-24G malzemenin B-H eğrisi Şekil 5.21’de verildiği gibidir. Tasarlanan SynRM’nin manyetik akı dağılımı ise Şekil 5.22’te gösterilmiştir. Şekil 5.21 incelendiğinde kullanılan çelik malzemenin 2 T’den sonra doyum bölgesine geçtiği görülmektedir. Tasarlanan SynRM’nin akı dağılımı incelendiğinde stator dış kısmında büküm noktası ile doyum bölgesi arasında olduğu görülmektedir. Manyetik akının artması doyuma sebep olacağı için daha fazla manyetik akının artması tasarlanan SynRM’nin performansını olumsuz etkileyecektir.



**Şekil 5.20.** Tasarlanan SynRM’nin 3D Görünümü. (A) Stator Yapısı. (B) Rotor Yapısı.

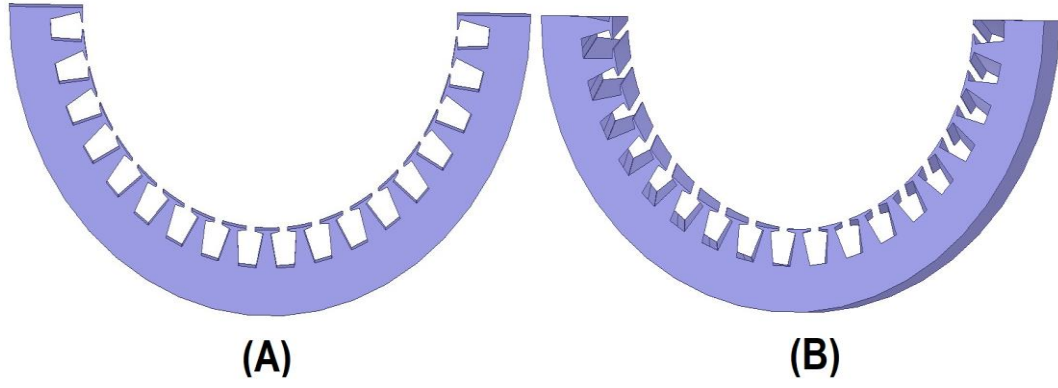


Şekil 5.21. M19-24G Tipi Çelik Malzemenin B-H Eğrisi



Şekil 5.22. Tasarlanan SynRM'nin Manyetik Akı Dağılımı

SynRM'nin tasarımıda statoru için burma tekniği kullanılmıştır. Bu teknik ile daha düşük tork dalgalanması elde edilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin stator burma konsepti Şekil 5.23'de gösterildiği gibidir.



**Şekil 5.23.** SynRM'nin Stator Burma Konsepti. (A) Burma Açısı 0°. (B) Burma Açısı 5°.

Tasarlanan SynRM'nin çıkış torku, tork dalgalanması ve faz akımlarının değişimleri optimizasyon boyunca incelenmiştir. Optimizasyonlar ile SynRM'nin en büyük dezavantajlarından biri olan tork dalgalanması %39,84'ten %9,1'e kadar azaltılmıştır. SynRM'nin çıkış torku 426 Nm ve faz akımlarının rms değeri 236,3 A olduğu görülmüştür. Tasarlanan SynRM'nin daha detaylı performans analizleri bölüm 6'da sunulmuştur.

## 6. TASARLANAN SYNRM'İN PERFORMANS ANALİZLERİ

SynRM, yüksek verimlilik, basitlik, düşük maliyet ve düşük atalet momenti gibi avantajlara sahiptir. Ancak, yüksek tork dalgalanması dezavantajına sahiptir (69). Stator ve rotor parametrelerinin optimizasyonu ve stator burma tekniğinin kullanılmasıyla tork dalgalanması önemli ölçüde azaltılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen parametrelerle tasarlanan SynRM'nin geçerliliğini ve kabiliyetini göstermek için farklı çalışma koşullarında performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

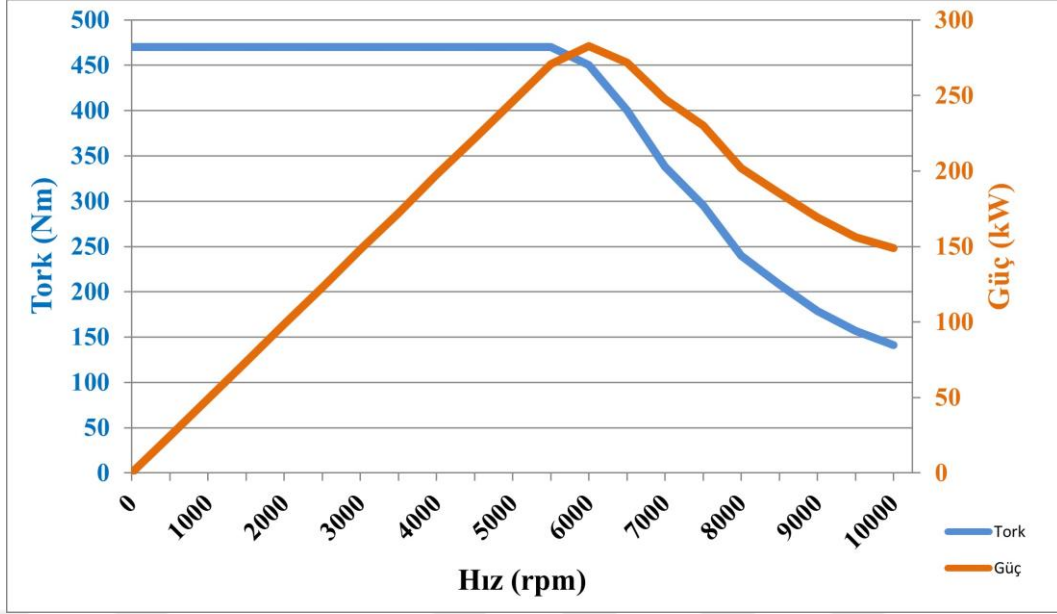
Hedeflenen SynRM için optimizasyonlar ve duyarlılık analizi kullanılarak tork ve tork dalgalanması iyileştirilmiştir. Bu süreç içerisinde SynRM'nin ölçülen performansı tam kapasite çalışma şartlarında elde edilen değerler değildir. SynRM'nin geniş çalışma şartlarındaki performans analizleri için Ansys Maxwell programı içerisinde bir eklenti yazılımı olan Machine Toolkit kullanılmıştır.

Machine Toolkit, tasarlanan SynRM'nin belirlenen şartlarda nasıl bir çalışma şekli sunduğunu gösteren bir simülasyon programıdır. SynRM'nin performans analizi için Machine Toolkit eklentisinde kullanılan parametre değerleri Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 6.1.** Machine Toolkit'te Kullanılan Parametreler

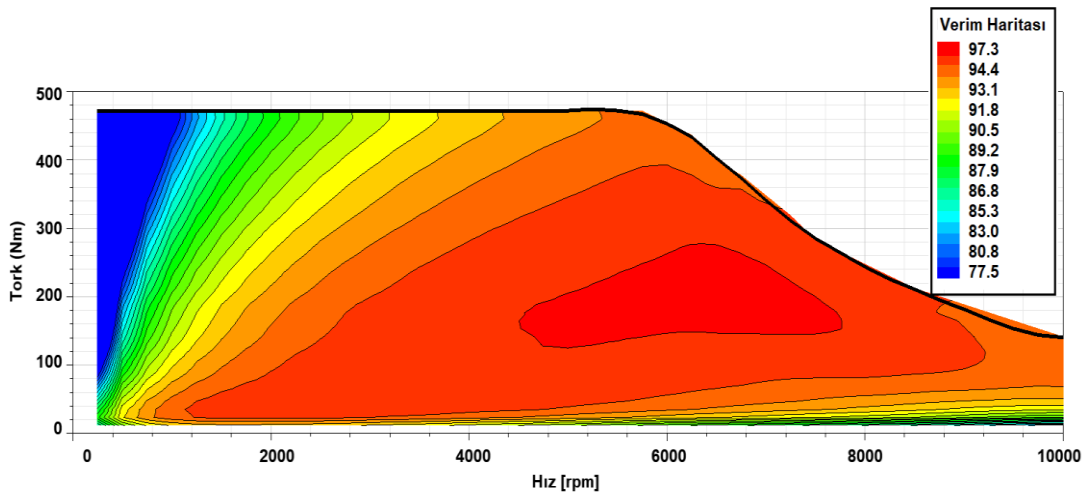
| Parametreler                   | Değerler                          |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Simüle Edilen Makine Tipi      | Senkron Relüktans Motor           |
| Kutup sayısı                   | 4                                 |
| Kontrol Stratejisi             | Birim Amper Başına En Yüksek Tork |
| Gerilim (V) (rms)              | 650                               |
| Akım (A) (rms)                 | 440                               |
| Faz Direnci (ohm)              | 0,05                              |
| Faz Sargı Endüktansı (mH)      | 0,025                             |
| Bağlantı Tipi                  | Delta                             |
| Hedeflenen En Yüksek Hız (d/d) | 10000                             |
| Akımın Değişim Nokta Sayısı    | 8                                 |
| Hızın Değişim Nokta Sayısı     | 8                                 |

Machine Toolkit kullanılarak tasarlanan SynRM'nin performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece tork-hız-güç grafiği, verim haritası ve kayıplar haritası gibi SynRM'nin önemli özelliklerini gösteren sonuçlar elde edilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin tork-hız-güç grafiği incelendiğinde, 5500 d/d'ye kadar sabit 470 Nm tork üretebildiği görülmektedir. Ayrıca 6000 d/d'den 10000 d/d'ye kadar ki sabit tork bölgesi dışında da 141 ile 470 Nm arasında tork üretebilmektedir. Tasarlanan SynRM'nin geniş hız aralığında yüksek tork üretebildiği görülmektedir. SynRM'nin en yüksek güç değerinin 6000 d/d'de 285 kW olduğu görülmüştür. Tasarlanan SynRM literatürde sunulan çalışmalarla kıyaslandığında (19), (20), (21) ve (70) geniş bir hız aralığında yüksek tork ve yüksek gücü başarıyla ürettiği söylenebilir. SynRM'nin tork-hız-güç grafiği Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



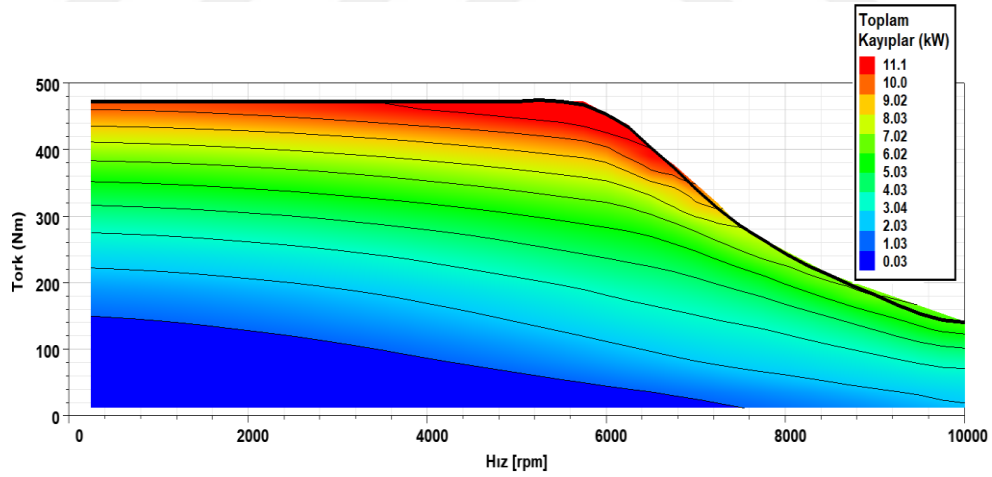
**Şekil 6.1.** Tasarlanan SynRM'nin Tork-Hız-Güç Grafiği

Verim haritası, bir elektrik motorunun tork ve hız eksenleri boyunca ne kadar verimle çalıştığını gösteren bir haritadır. Bir elektrik motorunun herhangi bir tork-hız kombinasyonunda maksimum verim sağlaması arzu edilir ancak motorun kayıpları tork-hız kombinasyonlarına göre değiştiği için motorun verimi de değişmektedir. Elde edilen verim haritası Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin en yüksek verimi %97,3'tür. Verim haritasından da anlaşılacağı üzere SynRM geniş bir hız aralığında yüksek verim sunmaktadır.



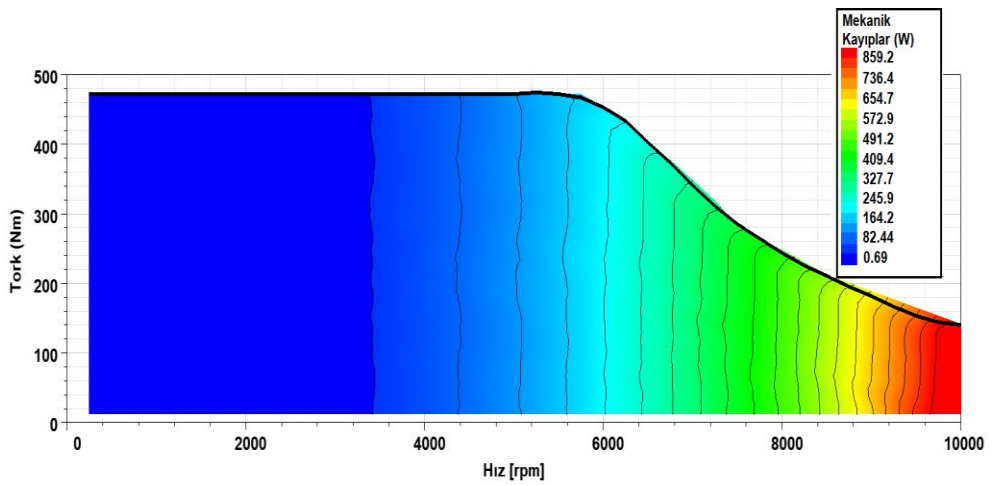
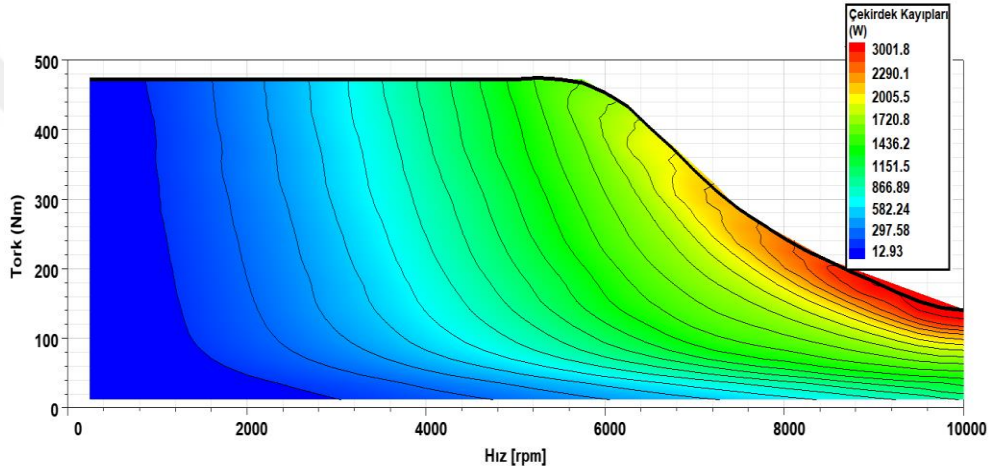
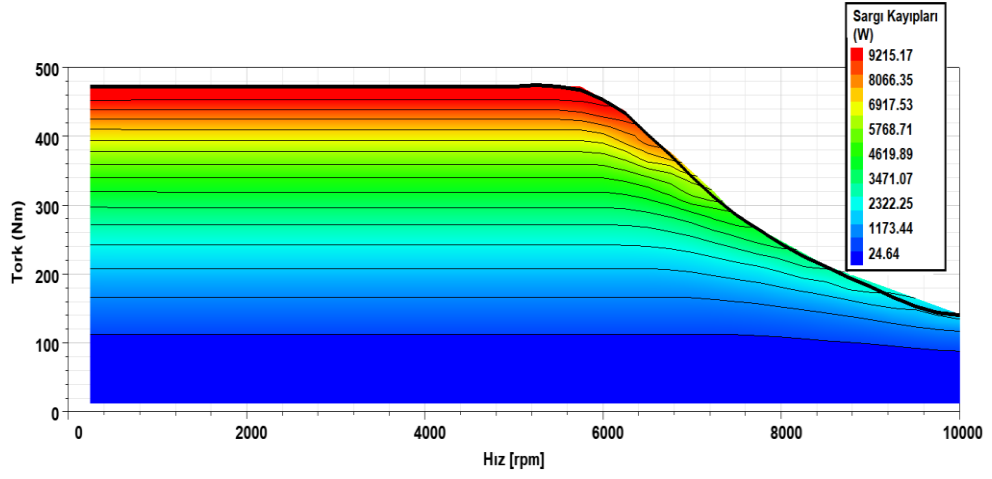
**Şekil 6.2.** Tasarlanan SynRM'nin Verim Haritası

SynRM'nin toplam kayıplar haritası, sargı kayıpları haritası, çekirdek kayıpları haritası ve mekanik kayıplar haritası sırasıyla Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Toplam kayıplar; Sargı kayıpları, çekirdek kayıpları ve mekanik kayıpların toplamıdır. Toplam kayıpların büyük bölümü sargı kayıplarından oluşmaktadır. Şekil 6.4'teki sargı kayıpları haritası incelendiğinde motorun yüksek tork bölgesinde, kayıpların daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, üretilen torkun çekilen akıma bağlı olmasıdır. Çekilen akım arttıkça üretilen tork ile birlikte sargı kayıpları da artmaktadır. Sargı kayıpları en yüksek 9,11 kW, en yüksek güç noktası olan 6000 d/d'de ise 8,78 kW olarak ölçülmüştür. Şekil 6.5'deki çekirdek kayıpları histerisiz kayıpları ve eddy kayıplarının toplamıdır. Kontrol stratejisine bağlı olarak, frekans artışı ile çekirdek kayıpları da yükselmektedir. Çünkü frekanstaki artış nüve içerisindeki moleküllerin daha hızlı yön değiştirmesine ve daha çok ısının meydana gelmesine sebep olur. Bu da çekirdek kayıplarını artırır. Şekil 6.6'daki mekanik kayıplar incelendiğinde, SynRM'nin hızı arttıkça mekanik kayıplarında arttığı görülmektedir. Bu kayıplar hız arttıkça sürtünme ve rüzgâr kayıplarının da artmasından kaynaklanmaktadır.

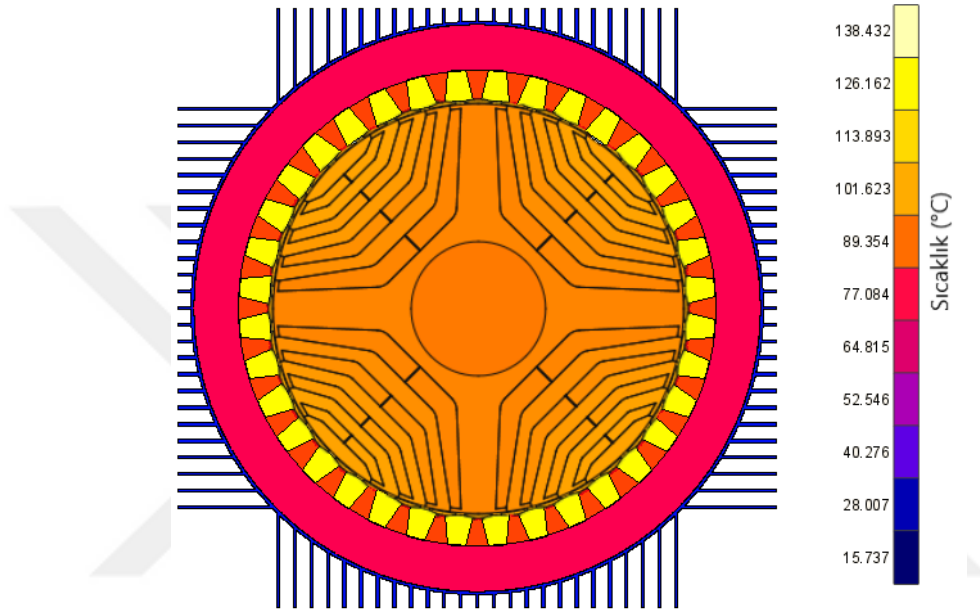


**Şekil 6.3.** Tasarlanan SynRM'nin Toplam Kayıplar haritası





Tasarlanan SynRM'nin termal analizi Şekil 6.7 de gösterilmiştir. Termal analiz, motorun en yüksek hız değerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek sıcaklık stator sargılarında  $134^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. SynRM'nin rotorunda mıknatıs olmadığı için sıcaklıktan kaynaklı demanyetize problemi de olmamaktadır. Bu da motorun daha geniş sıcaklık aralığında çalışmasına imkân sağlamaktadır.



**Şekil 6.7.** Tasarlanan SynRM'nin Termal Analizi

Analiz sonuçları, tasarlanan motorun hedeflenen tork, güç, akım, tork dalgalanması ve verim değerlerini karşıladığını açıkça göstermektedir. Yeni nesil elektrikli araçlarda kullanılan bazı elektrik motorlarının tork değerleri aşağıda verilmiştir. Halihazırda EA'lar için elektrik motoru üreten bazı firmalar vardır. Bu firmaların markaları ve ürettiği motorlardan bazıları şunlardır; Çin'de bir marka 315 Nm'lik bir motor, GM Bolt 360 Nm'lik bir motor, Bosch 310 Nm'lik bir motor ve Tesla 416 Nm'lik bir motor üretmektedir (70). Bu çalışmada tasarlanan SynRM ise 470 Nm'lik bir çıkış torku sağlamaktadır. Tasarlanan SynRM'nin, elektrikli araçlarda kullanılan çekiş motorlarının tork gereksinimlerini başarıyla karşıladığı görülmektedir.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yeni nesil elektrikli araçlarda kullanılacak bir SynRM'nin çift aşamalı optimizasyonu ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Nadir toprak elementlerinin sınırlı sayıda olması ve mıknatıs fiyatlarının artması gibi durumlardan dolayı elektrik motorlarında mıknatıs içermeyen ya da daha az miktarda mıknatıs içeren motorlara ilgi artmaktadır. Rotorunda mıknatıs olmayan SynRM'nin sıcaklığa bağlı demanyetize probleminin olmaması, düşük maliyeti, geniş hız aralığında yüksek verimle yüksek tork ve güç sağlaması gibi avantajlarından dolayı elektrikli araçlarda kullanılan mıknatıslı elektrik motorlarına alternatif olabileceği düşünülmektedir. SynRM'nin en büyük dezavantajı olan tork dalgalanmasının azaltılması, çekiş motoru olarak SynRM'nin tercih edilmesini sağlayacak büyük bir gelişim olacaktır. Bu amaçla optimizasyonlar gerçekleştirilerek SynRM'nin tork dalgalanması, çıkış torku ve verimi iyileştirilerek yüksek hızlı, yüksek güçlü ve yüksek tork üreten bir SynRM tasarlanmıştır. Tasarlanan SynRM'nin hedeflenen özellikleri, EA'lar için tasarlanan bir elektrik motorunun özelliklerine göre belirlenmiştir. SynRM'nin belirlenen özellikleri karşılaması için genetik algoritma ve duyarlılık analizinden oluşan çift aşamalı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada SynRM'nin tork ve tork dalgalanması gibi çıkış değerlerini iyileştirmek için stator ve rotor parametrelerine genetik algoritma kullanarak optimizasyon yapılmıştır. İkinci aşamada SynRM'nin statoruna burma tekniği uygulanmıştır. Duyarlılık analizi ile stator burma açısının SynRM'nin performansına etkileri incelenmiştir. Belirlenen en uygun burma açısı SynRM'nin tasarımında kullanılmıştır. Elde edilen en iyi parametrelerle tasarlanan SynRM'nin performansı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler ve simülasyonlar için Ansys Maxwell paket programı ve Ansys Maxwell Machine Toolkit eklenti yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimizasyonlar ile SynRM'nin performans değerlerinin büyük ölçüde iyileştirildiğini göstermiştir. Optimizasyonların yapıldığı çalışma koşulunda tork dalgalanması %39,84'ten %9,1'e, faz akımları 141,83 A'den 236,3 A'e ve tork 367,69 Nm'den 426 Nm'ye iyileştirilmiştir. Tasarlanan SynRM, diğer elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarıyla karşılaştırıldığında, geniş hız aralığında yüksek tork ve yüksek güç sağladığı görülmüştür. Simülasyon ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde tasarlanan SynRM 5500 d/d'ye kadar sabit 470 Nm tork üretebilmektedir. Sabit tork

bölgesi dışında 6000 d/d'den 10000 d/d'ye kadar da 141 ile 470 Nm arasında tork üretebilmektedir. SynRM sağladığı en yüksek güç 6000 d/d'de 285 kW olarak ölçülmüştür. Tasarlanan SynRM geniş bir çalışma bölgesinde en yüksek %97,3 gibi yüksek bir verim sunmaktadır.

Analiz ve simülasyon sonuçları, tasarlanan SynRM'nin hedeflenen tork, tork dalgalanması, güç, hız ve verim değerlerini başarıyla karşıladığını göstermiştir. Sonuçlar, tasarlanan SynRM'nin yeni nesil elektrikli araçların elektrik motoru olarak etkili ve başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.



## 8. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Chen, L., Hopkinson, D., Wang, J., Cockburn, A., Sparkes, M., O'Neill W. Reduced Dysprosium Permanent Magnets and Their Applications in Electric Vehicle Traction Motors. *IEEE Trans Magn.* 2015;51(11).
2. L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini AS and MC. Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access.* 2020;8:116900–13.
3. Bonthu SSR, Islam MZ, Arafat AKM, Choi S. Five-phase external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for in-wheel applications. 2017 IEEE Transp Electr Conf Expo, ITEC 2017. 2017 Jul 26;586–91.
4. Huynh TA, Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies.* 2018;11(6).
5. Park HJ, Lim MS. Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction. *IEEE Access.* 2019;7:46677–85.
6. Yueying Z, Chuantian Y, Yuan Y, Weiyan W, Chengwen Z. Design and optimisation of an In-wheel switched reluctance motor for electric vehicles. *IET Intell Transp Syst.* 2019 Jan 1;13(1):175–82.
7. Kumar R, Kumar P, Kumar B, Singh P, Kumar R, Kumar A. Design and Analysis of High performance of a BLDC Motor for Electric Vehicle. 2022 2nd Int Conf Emerg Front Electr Electron Technol ICEFEET 2022. 2022;
8. Priyanka CP, Jagadanand G. Design and Analysis of BLDC Motor for Electric Vehicle Application. *Adv Autom Signal Process Instrumentation, Control.* 2021;700:977–85.
9. Patil S V., Saxena R. “Design & Simulation of Brushless DC Motor Using ANSYS for EV Application.” 2022 IEEE Int Students’ Conf Electr Electron Comput Sci SCEECs 2022. 2022;
10. Zhou C, Huang X, Li Z, Cao W. Design Consideration of Fractional Slot Concentrated Winding Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV and HEV Applications. *IEEE Access.* 2021;9:64116–26.
11. Sheela A, Suresh M, Shankar VG, Panchal H, Priya V, Atshaya M, et al. FEA based analysis and design of PMSM for electric vehicle applications using magnet software. <https://doi.org/101080/0143075020201762736>. 2020;43(1):2742–7.
12. Dhulipati H, Ghosh E, Mukundan S, Korta P, Tjong J, Kar NC. Advanced Design Optimization Technique for Torque Profile Improvement in Six-Phase PMSM Using Supervised Machine Learning for Direct-Drive EV. *IEEE Trans Energy Convers [Internet].* 2019 Dec [cited 2022 Nov 29];34(4):2041–51. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8789459/>
13. Cebe IZ, Karvan Z, Yolveren O, Çimen O. Ortadoğu ve Kuzey Afrika Coğrafyasında Nadir Toprak Elementleri (NTE). *Ortadoğu Araştırma Merk [Internet].* 2020;135. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/344206765\\_Ortadogu\\_ve\\_Kuzey\\_Afrika\\_Cografyasinda\\_Nadir\\_Toprak\\_Elementleri\\_NTE](https://www.researchgate.net/publication/344206765_Ortadogu_ve_Kuzey_Afrika_Cografyasinda_Nadir_Toprak_Elementleri_NTE)
14. Widmer JD, Martin R, Kimiabeigi M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustain Mater Technol.* 2015 Apr 1;3:7–13.

15. Sanada M, Hiramoto K, Morimoto S, Takeda Y. Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor using Asymmetric Flux Barrier Arrangement. Conf Rec - IAS Annu Meet (IEEE Ind Appl Soc. 2003;1:250–5.
16. Bianchi N, Bolognani S, Bon D, Pré MD. Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance and PM-assisted synchronous reluctance motors. IEEE Trans Ind Appl. 2009;45(3):921–8.
17. Bomela XB, Kamper MJ. Effect of machine design on performance of reluctance synchronous machine. Conf Rec - IAS Annu Meet (IEEE Ind Appl Soc. 2000;1:515–22.
18. Armando E, Guglielmi P, Pastorelli M, Pellegrino G, Vagati A. Performance of IPM-PMASR motors with ferrite injection for home appliance washing machine. Conf Rec - IAS Annu Meet (IEEE Ind Appl Soc. 2008;
19. Taghavi S, Pillay P. A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2014 Jun 1;2(2):329–40.
20. Credo A, Villani M, Popescu M, Riviere N. Synchronous reluctance motors with asymmetric rotor shapes and epoxy resin for electric vehicles. 2019 IEEE Energy Convers Congr Expo ECCE 2019. 2019 Sep 1;4463–9.
21. Bozkurt A, Fevzi Baba A, Oner Y. Design of Outer-Rotor Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for Electric Vehicles. Energies [Internet]. 2021;14(13). Available from: <https://doi.org/10.3390/en14133739>
22. Panda S, Keshri RK. Design and Analysis of Synchronous Reluctance Motor for Light Electric Vehicle Application. Proc IECON 2018 - 44th Annu Conf IEEE Ind Electron Soc. 2018 Dec 26;2021–5.
23. Song I-S, No H-R, Kim C-M, Kim K-C. Study on the Torque Ripple Reduction Method of SynRM for Electric Vehicles. Int J Mech Eng. 2022;7(1):204–8.
24. Nattuthurai S, Neelamegham R. Design and Performance Evaluation of SynRM and Ferrite Sssisted-SynRM for EV Spplcation Using FEA. 2017 Int Conf Smart Technol Smart Nation. 2017;492–7.
25. Guan Y, Zhu ZQ, Afinowi IAA, Mipo JC, Farah P. Design of synchronous reluctance and permanent magnet synchronous reluctance machines for electric vehicle application. 2014 17th Int Conf Electr Mach Syst ICEMS 2014. 2014;1853–9.
26. Arkadan AA, Al Aawar N. Taguchi-EM-AI Design Optimization Environment for SynRM Drives in Traction Applications. 2020 Int Appl Comput Electromagn Soc Symp ACES-Monterey 2020. 2020 Jul 1;
27. Herrera D, Villegas J, Galvan E, Carrasco JM. Powertrain EV Synchronous Reluctance Motor Design with Redundant Topology with Novel Control. IET Electr Power Appl. 2019;13(11):1647–59.
28. Credo A, Villani M, Popescu M, Riviere N. Application of Epoxy Resin in Synchronous Reluctance Motors with Fluid-Shaped Barriers for E-Mobility. IEEE Trans Ind Appl. 2021;57(6):6440–52.
29. Sokolov E. Comparative study of electric car traction motors. 15th Int Conf Electr Mach Drives Power Syst. 2017;348–53.
30. Cecchini R, Pelosi G. From the Historian--Alessandro Volta and his battery. IEEE Antennas Propag Mag. 1992 Apr;34(2):30–7.
31. Guarnieri M. Looking back to electric cars. 3rd Reg IEEE Hist Electro - Technol Conf Orig Electrotechnol HISTELCON 2012 - Conf Proc. 2012;
32. Kurzweil P. Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery-The genesis of the first

- practical rechargeable battery. J Power Sources. 2010 Jul 15;195(14):4424–34.
33. Çarkıt S. Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Akı Anahtarlama Motor Tasarımı. Erciyes Üniversitesi; 2020.
  34. ÖZEK A. Elektrikli Bir Aracın Genel Performans Simülasyonu Ve Gerçeklenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi; 2020.
  35. Leitman S, Brant B. Build Your Own Electric Vehicle. Third Edit. McGraw-Hill/TAB Electronics; 1993. 310 p.
  36. Tuna M. Hibrit Elektrikli Araçlarda (HEA) Kullanılan Konvertörlerin Genelleştirilmiş Durum Uzun Ortalama (GSSA) Yöntemi ile Modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi; 2008.
  37. Momoh OD, Omoigui MO. An overview of hybrid electric vehicle technology; An overview of hybrid electric vehicle technology. 2009 IEEE Veh Power Propuls Conf. 2009;
  38. Høyer KG. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. Util Policy. 2008;16(2):63–71.
  39. Berdichevsky G, Kelty K, Straubel JB, Toomre E. The Tesla Roadster Battery System Tesla Motors, Inc. 2006;
  40. Kubiczek J, Hadasik B. Segmentation of Passenger Electric Cars Market in Poland. World Electr Veh J. 2021 Feb 10;12(1):23.
  41. Kumar A, Srivastava A. Performance Investigation of Various Fluxswitching Machines for Hybrid Electric Vehicles: A Review. Int J Adv Res Electr Electron Instrum Eng. 2016;5(12):9246–56.
  42. Kaymaz H, Demir MF. Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. Int Period Recent Technol Appl Eng. 2020;2(1):35–41.
  43. Yılmaz M. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. Renew Sustain Energy Rev. 2015 Dec 1;52:80–99.
  44. Finken T, Felden M, Hameyer K. Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles. Proc 2008 Int Conf Electr Mach ICEM'08. 2008;
  45. Pellegrino G, Vagati A, Boazzo B, Guglielmi P. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. IEEE Trans Ind Appl. 2012;48(6):2322–32.
  46. Kül S. Doğrudan Yol Vermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Tasarım Optimizasyonu. Selçuk Üniversitesi; 2015.
  47. Yılmaz M. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN ALGILAYICISIZ KONTROLÜNDE DALGACIK TEKNİĞİNİN UYGULANMASI. İstanbul Teknik Üniversitesi; 2005.
  48. Ogbuka C, Nwosu C, Agu M. Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets. Arch Electr Eng. 2016 Mar 1;65(Vol. 65, nr 1):105--116.
  49. Demir MT. ELEKTRİKLİ ARABALARDA KULLANILAN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜ. Yıldız Teknik Üniversitesi; 2022.
  50. Urcan MU. SENKRON RELÜKTANS MOTORLARDA KALICI MIKNATIS KULLANILARAK PERFORMANS ARTTIRILMASI. Manisa Celal Bayar Üniversitesi; 2022.

51. Geçer B. Anahtarlama Relüktans Motorlarda Kutup Sayısı Değişiminin Çalışma Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi; 2019.
52. Solak B. Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması. Yıldız Teknik Üniversitesi; 2021.
53. Jia S, Zhang P, Liang D, Dai M, Liu J. Design and Comparison of Three Different Types of IE4 Efficiency Machines. 2019 22nd Int Conf Electr Mach Syst ICEMS 2019. 2019 Aug 1;
54. Bonthu SSR, Choi S, Gorgani A, Jang K. Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor with External Rotor Architecture. Proc IEEE Int Electr Mach Drives Conf. 2015;
55. Yokoi M, Fukami T, Shima K, Hanaoka R, Takata S. Performance Evaluation of a Dual-Winding Reluctance Generator with a Multiple-Barrier Rotor. IEEJ Trans Ind Appl. 2008;128(1):64–70.
56. Pellegrino G, Jahns T, Bianchi N, Soong W, Cupertino F. The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors. 1st ed. Springer Cham; 2016. 136 p.
57. Tap A. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi; 2017.
58. What will happen to 3 phase salient type synchronous motor when excitation is lost suddenly? - Quora [Internet]. [cited 2022 Jun 24]. Available from: <https://www.quora.com/What-will-happen-to-3-phase-salient-type-synchronous-motor-when-excitation-is-lost-suddenly>
59. Kiriya H, Kawano S, Honda Y, Higaki T, Morimoto S, Takeda Y. High performance synchronous reluctance motor with multi-flux barrier for the appliance industry. Conf Rec - IAS Annu Meet (IEEE Ind Appl Soc. 1998;1:111–7.
60. Boztaş G. Düşük Gerilim ile Beslenen Senkron Relüktans Motor ve Sürücü Tasarımı. Fırat Üniversitesi; 2019.
61. Jin J-M. The Finite Element Method in Electromagnetics. 3.Edition. Wiley-IEEE Press; 2014. 876 p.
62. Uçar S. Maxwell'in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme. Felsefe Ark. 2019;(51):261–70.
63. Man KF, Tang KS, Kwong S. Genetic Algorithms. 1st ed. Springer London; 1999. 344 p.
64. Üstün O. Genetik Algoritmalar. In: Yapay Zeka - Zeki Sistemler. Bolu: BAİBÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü; 2012.
65. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing; 1989. 372 p.
66. OKŞAR M, YETİŞ H, GÖKTAŞ T, KAYGUSUZ A, MEŞE E. Dişlisiz Asansör Uygulamaları için Yüzey Montajlı Senkron Motorun Optimal Tasarımı. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Derg. 2020;34(2):335–44.
67. Lazari P, Wang J, Sen B. 3-D Effects of Rotor Step-Skews in Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machines. IEEE Trans Magn. 2015;51(11):1–4.
68. Vadde A, Sudha B. Influence of skewing design for reduction of force ripples in DSL-SynRM using 3D FEA. CES Trans Electr Mach Syst. 2019;3(4):397–402.
69. Li JC, Xin M, Fan ZN, Liu R. Design and Experimental Evaluation of a 12 kW Large Synchronous Reluctance Motor and Control System for Elevator Traction. IEEE Access. 2020;8:34256–64.



70. Mohammadi MH, Rahman T, Silva RCP, Wang B, Chang K, Lowther DA. Effect of Acoustic Noise on Optimal SynRM Design Regions. IEEE Trans Magn. 2018;54(3):1–4.

