



**SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORUN  
TASARIMI VE SARGI OPTİMİZASYONU**

**Öznur DAL**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**Danışman: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM**

**AĞUSTOS 2019**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN TASARIMI VE SARGI  
OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öznur DAL  
(161113106)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Programı: Elektrik Makineleri

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03/07/2019

Tezin Savunulduğu Tarih : 18/07/2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR (K.Ü.)

Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR (F.Ü.)

TEMMUZ-2019

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan KÜRÜM' e teşekkür ederim.

Değerli bilgi paylaşımlarını ve yardımlarını esirgemeyen, tez çalışmamda teknik destek ve gerekli izinleri sağlayan, ilgi ve bilgilerini paylaşmaktan kaçınmayan, tez çalışmamın temel yapıtaşını oluşmasında emeği olan çok değerli SEYMAKSAN MAKİNA ekibine şükranlarımı borç bilirim.

Bugüne kadarki eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen aileme, tez çalışmalarım süresince bana sabırla destek olan, mesleki tecrübelerini benimle paylaşan Sevgili eşim Kadir DAL' a teşekkür ederim.

Mekanik kısımdaki eksikliklerimi gideren ve ısı analiz konusunda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Sayın Hakan COŞANAY' a teşekkür ederim.

Daha önce bünyesinde çalışmış bulunduğum Bader Motor Teknolojileri Grubu Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Mohammad Zuhair Talas' a ve teknik çalışmaları birlikte yürüttüğümüz meslektaşım Sayın Hayatullah NORY' ye teşekkürlerimi sunarım.

**Öznur DAL**

**Elazığ-2019**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ .....                                                        | I               |
| İÇİNDEKİLER .....                                                  | II              |
| ÖZET .....                                                         | IV              |
| ABSTRACT .....                                                     | VI              |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                             | VIII            |
| TABLOLAR LİSTESİ .....                                             | XI              |
| SEMBOLLER LİSTESİ.....                                             | XII             |
| KISALTMALAR LİSTESİ.....                                           | XIV             |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                              | <b>1</b>        |
| 1.1. Genel Bakış .....                                             | 1               |
| 1.2. Elektrik Motorlarının Tarihçesi .....                         | 2               |
| 1.3. SMSM Tasarımı .....                                           | 3               |
| 1.3.1. Sürekli Mıknatıslar .....                                   | 5               |
| 1.4. Tezin Amacı .....                                             | 10              |
| 1.5. Tezin İçeriği .....                                           | 10              |
| <b>2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR .....</b>                | <b>12</b>       |
| 2.1. Giriş .....                                                   | 12              |
| 2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar .....                             | 12              |
| <b>3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN TASARIMI .....</b>        | <b>16</b>       |
| 3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Ön Tasarımı.....           | 21              |
| 3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tasarımı .....             | 21              |
| 3.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Geometrisi .....          | 22              |
| 3.4. SMSM' nin Tasarım Parametreleri ve Performans Hesapları ..... | 26              |
| 3.5. Manyetik Devre Parametrelerinin Hesabı .....                  | 27              |
| 3.6. Manyetik Relüktans .....                                      | 28              |
| 3.7. Rotor Kaçak Relüktansı .....                                  | 29              |
| 3.8. Hava Aralığı Relüktansı .....                                 | 29              |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.9. Hava Aralığı Alanı .....                                                  | 30        |
| 3.10. Stator Dişı ve Stator Arka Boyunduruk Direnci .....                      | 31        |
| 3.11. Elektriksel Eşdeğer Devre Modelinin Hesaplanması .....                   | 32        |
| 3.12. İletken Uzunluğu .....                                                   | 33        |
| 3.14. İndüktans Değerinin Hesaplanması .....                                   | 34        |
| 3.14.1. Oluk Sızıntı İndüktansının Hesaplanması .....                          | 34        |
| 3.14.2. Sargı Son İndüktansının Hesaplanması .....                             | 34        |
| 3.14.3. Mıknatıslanma İndüktansının Hesaplanması .....                         | 35        |
| 3.15. Elektromanyetik Moment Hesabı.....                                       | 35        |
| <b>4.OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI .....</b>                                      | <b>37</b> |
| 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu .....                                         | 38        |
| 4.1.2. Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                       | 41        |
| <b>5. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ .....</b>                                        | <b>45</b> |
| 5.1. Ansys Maxwell Analiz Sonuçları.....                                       | 45        |
| <b>6. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORUN ANSYS FLUENT İLE ISIL ANALİZİ .....</b> | <b>56</b> |
| 6.1. Ansys Fluent Isıl Analiz Sonuçları.....                                   | 65        |
| <b>7. SONUÇLAR .....</b>                                                       | <b>68</b> |
| <b>8.ÖNERİLER .....</b>                                                        | <b>70</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                         | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                          | <b>72</b> |

## ÖZET

SMSM yüksek verim, dayanıklılık ve dinamik cevaba, yüksek güç yoğunluğuna, kompakt boyuta sahip olması gibi teknik özelliklere sahip olduğu için endüstride, otomasyonda, robotikte ve servo uygulamalarda en çok tercih edilen AA (alternatif akım) motorlarından biridir. Diğer tür elektrik makinalarında olduğu gibi sürekli mıknatıslı senkron motorlarda da verimlilik artırma çalışmaları optimizasyon uygulamaları ile gerçekleştirilmektedir [1].

SMSM'nin tasarım optimizasyonunda parçacık sürü optimizasyon (PSO) tekniği gibi birçok yapay zeka tekniği kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak literatürde bulunan sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalara bakıldığında stator ve rotor için farklı durumların dikkate alındığı görülmüştür. Yapılan her bir tasarım iyileştirmesinin ardındaki temel sebepler; kayıpların ve ısınma probleminin minimum seviyeye indirilmesidir. Bu sebepler doğrultusunda yüzey mıknatıslı senkron motorların ön analitik tasarımı gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method-FEM) ile doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, ANSYS MAXWELL programı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra motorun sargı optimizasyonu için parçacık sürü optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Son olarak SMSM'nin ısınma durumunu gözlemlemek için ANSYS Fluent Programı yardımıyla ısı analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Ön analitik tasarım, sargı optimizasyonu tasarımı, sonlu elemanlar analizi ve ısı analizlerin sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasının sonucunda SMSM'nin tasarımı gerçekleştirilmiş, tasarımı tamamlanan SMSM sargısının iyileştirilmesi için parçacık sürü optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Ardından ısı analiz gerçekleştirilerek motor tasarım süreci tamamlanmıştır. Bu tez çalışmasında motor tasarımındaki performans ve verimlilik gibi önemli parametrelerin değişimi incelenmiş ve motor üretim aşaması için gerekli işlemlere ön hazırlık niteliği taşıyan bir çalışma yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor, Sargı Optimizasyonu, Parçacık sürü optimizasyonu, Motor Tasarımı ve Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Motor Isıl Analizi, ANSYS Maxwell, ANSYS Workbench, ANSYS Fluent.



## **ABSTRACT**

### **Design and Winding Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor**

Permanent magnet synchronous motors are one of the most preferred AC motors in industry, automation, robotics and servo applications as they have technical features such as high efficiency, durability, high dynamic response, high power density and compact size. As with other types of electrical machines, the efficiency increase studies are carried out with optimization applications in permanent magnet synchronous motors. In the design optimizations of permanent magnet synchronous motors, many artificial intelligence techniques such as particle swarm optimization technique are used.

In this study, firstly, design studies of permanent magnet synchronous motors in literature are examined in detail. According to the studies, it is seen that different situations are taken into consideration for stator and rotor. The main reasons behind each design improvement are; losses and heating problem is minimized. For these reasons, the preliminary analytical design of synchronous motors with surface magnets was carried out and the results were confirmed by Finite Element Method (FEM). Finite element analysis was performed with ANSYS MAXWELL program. Subsequently, the winding optimizations of the PMSM were improved by the particle swarm optimization technique. Finally, ANSYS Fluent Program was used for the control of the heating problems of the PMSM.

Preliminary analytical design, optimization design, finite element analysis and thermal analysis results were found to be consistent with each other. As a result of this thesis, the design of permanent magnet synchronous motor was realized, particle swarm optimization technique was used for the improvement of the permanent magnet synchronous motor. Then thermal analysis was carried out and motor design process was completed. In this thesis, the change of important parameters such as performance and efficiency in motor design is examined and a study which is a preliminary preparation for the processes required for motor production is made.

**Keywords,** Permanent Magnet Synchronous Motor, Winding Optimization, Particle Swarm Optimization, Motor Design and Optimization, Finite Element Method, Motor Thermal Analysis, ANSYS Maxwell, ANSYS Workbench, ANSYS Fluent.



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                     | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Şekil 1.1.</b> Mıknatısların kutup dizilimi.....                                                                                                 | 6               |
| <b>Şekil 1.2.</b> SMSM' lerin farklı rotor yapıları .....                                                                                           | 8               |
| <b>Şekil 1.3.</b> Motorda kullanılan NdfeB mıknatıs.....                                                                                            | 8               |
| <b>Şekil 1.4.</b> Motorun rotor yapısı.....                                                                                                         | 9               |
| <b>Şekil 1.5.</b> Sürekli Mıknatıs Malzemesine Ait B-H Eğrisi .....                                                                                 | 9               |
| <b>Şekil 2.1.</b> SMSM' lerin Elektromekanik Yapıya Dayalı Sınıflara Ayrılması .....                                                                | 12              |
| <b>Şekil 2.2.</b> SMSM' lerin Geometrik Yapıya Dayalı Sınıflara Ayrılması.....                                                                      | 13              |
| <b>Şekil 2.3.</b> 24 Oluk-22 Kutup, Yüzey Mıknatıslı; 12 Oluk-14 Kutup, Radyal Gömülü Mıknatıs; 12 Oluk-10 Kutup V-Pozisyonlu Gömülü Mıknatıs ..... | 14              |
| <b>Şekil 2.4.</b> SMSM 'lerde Kullanılan Farklı Stator Yapılarına Ait Örnekler .....                                                                | 14              |
| <b>Şekil 3.1.</b> Çekirdeğin manyetik eşdeğer benzetim devreleri .....                                                                              | 16              |
| <b>Şekil 3.2.</b> Hava Aralığı Yok İken Manyetik Yapı .....                                                                                         | 17              |
| <b>Şekil 3.3.</b> Nüvenin Hava Aralığı Mevcut İken Manyetik Yapı .....                                                                              | 17              |
| <b>Şekil 3.4.</b> Motor Tasarım Süreci Algoritması.....                                                                                             | 20              |
| <b>Şekil 3.5.</b> Sabit mıknatıslı senkron motorun geometrik yapısı.....                                                                            | 23              |
| <b>Şekil 3.6.</b> Kare mıknatıs ve manyetik eşdeğer devresi .....                                                                                   | 27              |
| <b>Şekil 3.7.</b> Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi .....                                                                   | 27              |
| <b>Şekil.3.8.</b> SMSM elektriksel eşdeğer devresi .....                                                                                            | 32              |
| <b>Şekil 4.1.</b> Motor Bobinlerinin Sarılması.....                                                                                                 | 42              |
| <b>Şekil 5.1.</b> Motora ait sargı şeması.....                                                                                                      | 46              |
| <b>Şekil 5.2.</b> Motor stator ve rotor sacında kullanılan M19_29G malzeme özelliklerinin tanıtımı .....                                            | 47              |
| <b>Şekil 5.3.</b> Motor Rotorunda Kullanılan NdFe35 Mıknatıs Malzeme Özelliklerinin Tanıtılması .....                                               | 48              |
| <b>Şekil 5.4.</b> Sargılar arasında faz oluşturulması .....                                                                                         | 48              |

|                    |                                                                |    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.5.</b>  | Maxwell 3D Motor Modeli .....                                  | 49 |
| <b>Şekil 5.6.</b>  | Motor manyetik alan yoğunluğunun gösterimi .....               | 49 |
| <b>Şekil 5.7.</b>  | Motor manyetik akı yoğunluğu dağılımı .....                    | 50 |
| <b>Şekil 5.8.</b>  | Mıknatıs yönlerinin belirlenmesi .....                         | 50 |
| <b>Şekil 5.9.</b>  | Manyetik akı çizgilerinin dağılımı .....                       | 51 |
| <b>Şekil 5.10.</b> | Motora ait H vektör çizgilerinin dağılımı .....                | 51 |
| <b>Şekil 5.11.</b> | Motora ait 3 faz akım grafiği .....                            | 52 |
| <b>Şekil 5.12.</b> | Motora ait 3 faz akı bağlantı grafiği .....                    | 52 |
| <b>Şekil 5.13.</b> | 3 Faz endüklenen gerilim grafiği .....                         | 53 |
| <b>Şekil 5.14.</b> | Stator ve rotora ait sac kayıp değerleri .....                 | 53 |
| <b>Şekil 5.15.</b> | SMSM' nin RMXprt Modeli .....                                  | 54 |
| <b>Şekil 5.16.</b> | SMSM'nin optimizasyondan önceki moment eğrisi .....            | 54 |
| <b>Şekil 5.17.</b> | SMSM'nin optimizasyondan sonraki moment eğrisi .....           | 55 |
| <b>Şekil 6.1.</b>  | Motor malzeme özelliklerinin girilmesi .....                   | 57 |
| <b>Şekil 6.2.</b>  | Motor malzemelerinin atanması .....                            | 57 |
| <b>Şekil 6.3.</b>  | ANSYS Maxwell Modelinin ANSYS Fluent' e Aktarılması .....      | 58 |
| <b>Şekil 6.4.</b>  | ANSYS Maxwell' de oluşturulan geometri .....                   | 59 |
| <b>Şekil 6.5.</b>  | Malzeme özelliklerinin tanıtılması .....                       | 59 |
| <b>Şekil 6.6.</b>  | Malzeme ayarlarının gerçekleştirilmesi .....                   | 60 |
| <b>Şekil 6.7.</b>  | ANSYS Maxwell eddy current çözümü-1 .....                      | 60 |
| <b>Şekil 6.8.</b>  | ANSYS Maxwell eddy current çözümü-2 .....                      | 61 |
| <b>Şekil 6.9.</b>  | Bölümlendirme sonucu elde edilen düğüm ve eleman sayısı .....  | 61 |
| <b>Şekil 6.10.</b> | Akış domain' i bölümlendirilmiş görüntüsü .....                | 62 |
| <b>Şekil 6.11.</b> | Motor katı modelinin bölümlendirilmiş görüntüsü .....          | 62 |
| <b>Şekil 6.12.</b> | Ortamda bulunan havanın bölümlendirilmiş görüntüsü .....       | 63 |
| <b>Şekil 6.13.</b> | Maxwell-Fluent Aktarımı .....                                  | 63 |
| <b>Şekil 6.14.</b> | Ansyz Fluent düzleminin belirlenmesi .....                     | 64 |
| <b>Şekil 6.15.</b> | Orta düzlemde oluşan sıcaklık durumunun üstten görüntüsü ..... | 65 |

|                    |                                                               |    |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.16.</b> | Sargı, mıknatıs, stator ve rotorda oluşan ısı dağılımı .....  | 65 |
| <b>Şekil 6.17.</b> | Y-Eksen Sıcaklık Değişimi .....                               | 66 |
| <b>Şekil 6.18.</b> | X-Eksen Sıcaklık Değişimi .....                               | 66 |
| <b>Şekil 6.19.</b> | Akış hacminin dış yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımı ..... | 67 |



## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                          | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 1.1.</b> Uyarma Akımı Dalga Şekillerine Göre Sabit Mıknatıslı Motorların Sınıflandırılması..... | 2               |
| <b>Tablo 1.2.</b> Mıknatıs Malzeme Özellikleri .....                                                     | 7               |
| <b>Tablo 1.3.</b> Mıknatıs Manyetik Özellikleri .....                                                    | 7               |
| <b>Tablo 2.1.</b> SMSM'nin Uyarma Akım, Akı Yoğunluğu, Güç ve Bmf Dalga Şekilleri .....                  | 15              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Eşdeğer devrelerin parametre benzerlikleri .....                                       | 19              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Motorun Test Verileri .....                                                            | 44              |
| <b>Tablo 7.1.</b> Motor Tasarım Sonuçları .....                                                          | 69              |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                 |                                      |                      |                    |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------|
| $A$             | : Akının geçtiği alan                | : Metre <sup>2</sup> | : m <sup>2</sup>   |
| $A_c$           | : Çekirdeğin kesit alanı             | : Metre <sup>2</sup> | : m <sup>2</sup>   |
| $A_g$           | : Hava aralığının kesit alanı        | : Metre <sup>2</sup> | : m <sup>2</sup>   |
| $B$             | : Akı yoğunluğu                      | : Tesla              | : T                |
| $B_c$           | : Çekirdeğin akı yoğunluğu           | : Tesla              | : T                |
| $B_r$           | : Mıknatısın kalıcı akı yoğunluğu    | : Tesla              | : T                |
| $D_{kablo}$     | : Kablounun çapı                     | : metre              | : m                |
| $E_a, E_b, E_c$ | : Her bir fazın emf değeri           | : Volt               | : V                |
| $f$             | : Frekans                            | : Hertz              | : Hz               |
| $F$             | : Manyetomotor kuvveti               | : Amper.Sarım        | : AT               |
| $H$             | : Manyetik alan yoğunluğu            | : Amper/metre        | : Am <sup>-1</sup> |
| $H_c$           | : Çekirdeğin manyetik alan yoğunluğu | : Amper/metre        | : Am <sup>-1</sup> |
| $h_{mag}$       | : Mıknatısın uzunluğu                | : Metre              | : m                |
| $I$             | : Akım                               | : Amper              | : A                |
| $I_d, I_q$      | : d-q- eksen akımı                   | : Amper              | : A                |
| $I_a, I_b, I_c$ | : Her bir fazdan akan akım           | : Amper              | : A                |
| $J$             | : Motorun mil ataleti                | :                    |                    |
| $k_e$           | : Girdap kayıp katsayısı             |                      |                    |
| $k_h$           | : Histerezis kayıp katsayısı         |                      |                    |
| $k_{st}$        | : Yığın faktörü                      |                      |                    |
| $k_w$           | : Sargı faktörü                      |                      |                    |
| $L_a, L_b, L_c$ | : Her fazın indüktansları            | : Henry              | : H                |
| $l_c$           | : Çekirdeğin ortalama yol uzunluğu   | : Metre              | : m                |
| $L_c$           | : Telin uzunluğu                     | : Metre              | : m                |
| $L_d, L_q$      | : d-q- eksen indüktansı              | : Henry              | : H                |
| $L_g$           | : Hava aralığı uzunluğu              | : Metre              | : m                |
| $M$             | : Kütle                              | : Kilogram           | : kg               |
| $\omega$        | : Motorun hızı                       | : Rad / sn           | : d/dk             |

|                          |                                       |                     |              |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------|
| $N$                      | : Sarım sayısı                        |                     |              |
| $N_{oluk}$               | : Oluk sayısı                         |                     |              |
| $P$                      | : Kutup sayısı                        |                     |              |
| $q$                      | : Oluk sayısı/kutup sayısı/faz sayısı |                     |              |
| $R_a, R_b, R_c$          | : Her bir fazın sargı direnci         | : Ohm               | : $\Omega$   |
| $R_g$                    | : Hava aralığı Relüktansı             | : Amper-sarım/weber | : AS/Wb      |
| $R_s$                    | : Faz direnci                         | : Ohm               | : $\Omega$   |
| $T_e$                    | : Moment                              | : Newton. Metre     | : Nm         |
| $T_L$                    | : Harici yük momenti                  | : Newton. Metre     | : Nm         |
| $V_a, V_b, V_c$          | : Her bir fazın sargı gerilimi        | : Volt              | : V          |
| $W_c$                    | : Koenerji                            | : Joule             | : J          |
| $\mu$                    | : Çekirdeğin geçirgenliği             | : Henry/metre       | : $Hm^{-1}$  |
| $\mu_0$                  | : Hava aralığının geçirgenliği        | : Henry/ metre      | : $Hm^{-1}$  |
| $\mu_r$                  | : Mıknatısın geçirgenliği             | : Henry/ metre      | : $Hm^{-1}$  |
| $\emptyset$              | : Akı                                 | : Weber             | : wb         |
| $\rho$                   | : İletken direnç özelliği             | : Ohm.metre         | : $\Omega.m$ |
| $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ | : Her bir fazın akı bağlantısı        | : Weber             | : Wb         |
| $\Psi_m$                 | : Mıknatısın akısı                    | : Weber             | : Wb         |
| $\omega_e$               | : Rotorun elektriksel hızı            | : Radyan/saniye     | : rad/s      |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|            |                                                  |
|------------|--------------------------------------------------|
| AA         | : Alternatif akım                                |
| $b_{emf}$  | : Geri elektromotor kuvveti                      |
| Cpitch     | : Bir bobinin açısal yayılımının bir kutba oranı |
| Spitch     | : Bir bobinin iki iletken arasındaki oluk sayısı |
| DA         | : Doğru akım                                     |
| Dms        | : Mıknatısın yüzeysel çapı                       |
| Dsi        | : Statorun iç çapı                               |
| Dso        | : Statorun dış çapı                              |
| EMF        | : Elektromotor kuvveti                           |
| Kcs        | : Karter katsayısı                               |
| $k_{fill}$ | : Oluk doluluk faktörü                           |
| PSO        | : Parçacık sürü algoritması                      |
| hbc        | : Arka çekirdeğin uzunluğu                       |
| MMK        | : Manyetomotor kuvveti                           |
| NdFeB      | : Neodyum-demir-bor                              |
| SM         | : Sabit mıknatıs                                 |
| SMSM       | : Sabit mıknatıslı senkron motor                 |
| SEA        | : Sonlu elemanlar yöntemi                        |
| $w_0$      | : Oluğun dış genişliği                           |
| $w_{c1}$   | : Sargı son uzunluğu                             |
| $L_{ext}$  | : Sargı son yüksekliği                           |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel Bakış

Elektrik makinaları temel enerji dönüşüm cihazlarıdır ve yaygın olarak enerji dönüşümde kullanılır. Globalleşen dünya şartlarında enerji kaynaklarının azalmasına rağmen günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olan enerjiye ihtiyacın sürekli olarak artması sebebiyle birçok alanda enerji verimliliği önem kazanmıştır. Gerek yaşam standartlarındaki artış, gerekse artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte her geçen gün daha fazla gereksinim duyulmaktadır. Enerji verimliliği ve tasarrufu konusunun önem kazanmasıyla birlikte elektrik motorlarının yüksek verim değerlerine ulaşması amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Elektrik motorlarının kullanım alanının oldukça geniş olması bu motorlardaki verim çalışmalarının hızlanmasına neden olmuştur. Bir elektrik motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürken kayıplar meydana getirir. Bu kayıplar azaltılarak verim artırılabilir. Elektrik makineleri transformatörler, generatörler ve motorlar olarak üç ana gruptan oluşmaktadır, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması açısından elektrik makinalarının veriminin iyileştirilmesi oldukça önemlidir.

Asenkron motorların veriminin kayma ile değişmesi, uyarma akımına ihtiyaç göstermesi ve özellikle robotik gibi üstün performanslı uygulamalarda gerek duyulacak olan yüksek moment/ağırlık oranına sahip olmayışı nedeniyle, alternatif çözüm arayışları başlamış ve bu anlamda yüksek performanslı uygulamalar için farklı motorlar geliştirilmiştir [2]. Bu yeni geliştirilen motorlardan biri de sabit mıknatıslı senkron motordur. Üstün performans istenen uygulamalarda; yüksek moment, yüksek güç, yüksek verim ve düşük ses gibi üstünlükleri, SMSM' nin diğer alternatif akım motorlarından daha popüler olmasını sağlamaktadır. SMSM' nin güç yoğunluğu, ısı dağılım kapasitesi ile orantılıdır. Bu motorlarda; bakır, fuko ve histerisiz kayıpları statorda olmakta, uyarma akımı kayıpları ve aynı zamanda ek kayıplar da ortadan kalkmaktadır. Bu tür makinalarda stator normal bir asenkron motordaki gibidir, manyetik alan ve uyarma alanı rotora yerleştirilen sürekli mıknatıslar ile sağlanmaktadır [2]. Rotorda kullanılan sabit mıknatıslar sayesinde rotordaki bakır kayıpları

azaltılmıştır. Elektrik motorlarındaki kayıpların büyük kısmı sargılarda meydana geldiği için bu kayıpların azaltılması verimin artırılması açısından oldukça önemlidir.

Motor verimini arttırmak için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon kuramının bir probleme uygulanması sürecinde ilk adım, problemle ilgili kuramsal bileşenlerin belirlenmesidir. Bu, çözümlemenin en zor bölümüdür, çünkü sistemin çalışması, tümüyle anlaşılmış ve kesin matematiksel ifadeler aracılığıyla betimlenmiş olmalıdır. Sistemin ana kuramsal bileşenleri girdiler, çıktılar ve işleme kurallarıdır. Sistemin içinde bulunabileceği durumlar bir durum kümesi oluşturur. Sistem çalışması sırasında belirli bir anda bu durumlardan birinde bulunur; bir durumdan bir başka duruma geçiş koşullarını girdi ve çıktı değerleri belirler [3]. Motor tasarım denklemleri bu metoda uygun başlıklarla eşleştirilmiş ve parçacık sürü optimizasyon tekniği uygulanmıştır.

Uyarma alanı ve dalga şekillerine göre sabit mıknatıslı motorlar sınıflandırılmaktadır. Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) ve fırçasız doğru akım motorları (FDAM) arasındaki temel farklar bu sınıflandırmadan kaynaklanmaktadır. Bu tip sabit mıknatıslı motorların karşılaştırılması Tablo 1.1 'de yapılmıştır. Burada dalga şekillerinin sınıflandırılması özellikle kontrol devresinin tasarımı gerçekleştirilirken, anahtarlama stratejisini belirlemek için kullanılmaktadır. SMSM ve FDAM' nin geometrik yapıları temelde hemen hemen aynıdır. Bu iki motoru ayıran en önemli nokta uyarma dalga şekillerinin farklı olmasıdır.

**Tablo 1.1.** Uyarma Akımı Dalga Şekillerine Göre Sabit Mıknatıslı Motorların Sınıflandırılması

|                           | <b>SMSM</b> | <b>FDAM</b>     |
|---------------------------|-------------|-----------------|
| Uyarma Alanı Dalga Şekli  | Sinüzoidal  | Kare            |
| Geri Elektromotor Kuvveti | Sinüzoidal  | Kare            |
| Akı Yoğunluğu             | Sinüzoidal  | İkizkenar Yamuk |
| Güç ve Moment             | Sabit       | Sabit           |

## **1.2. Elektrik Motorlarının Tarihçesi**

Alessandro Volta 1801 yılında, yaptığı ilk pille ilgili ayrıntıları ve bilgileri yayınlamıştır. Volta pili belirli çözeltilerle metal elektrotlar arasındaki kimyasal tepkimeden yararlanma yoluyla elektrik üretmektedir. John Frederick Daniell gibi bilim adamları, elektrot

yapımında farklı gereçler kullanarak Volta'nın tasarımını geliştirmişlerdir. Günümüzün pilleri de aynı temel tasarıma dayanmakta, ancak yapımlarında modern gereçler kullanılmaktadır. Motor temelini oluşturan bu çalışmayla elektrik gücünün üretimi görülmüştür [4].

Hans Christian Oersted, 19. yüzyılın başlarında, Volta' nın birkaç yıl önce ortaya çıkardığı “elektrik akımı” ile deneyler yapmakta olan fizikçilerden birisi olmuştur. Volta piliyle deney yaparken yakınında bulunan pusulanın iğnesinin saptığını görmüştür. Böylece elektrik ile manyetik arasındaki ilişkinin varlığını ispatlamıştır. Böylece elektromanyetizmanın keşfi gerçekleşmiştir.

Michael Faraday, kariyerine bir kimyager olarak başlamasına rağmen kısa bir süre sonra bilimin pek çok farklı alanı ile ilgilenmeye başlamış ve özellikle elektromıknatis teknolojisi ile ilgili çalışmıştır. 1813 yılında Humphry Davy' nin altında Kraliyet Enstitüsü' nde çalışmaya başlayan Faraday, orada elektromanyetik döngüye odaklanmış ve bunun üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda ilk elektrik motorunu icat etmeyi başarmıştır. Oersted tarafından icat edilen elektromanyetiğin bulunmasının ardından Faraday, elektromanyetik enerji ile mekanik hareketlerin sağlanabileceğini 1821 yılında kanıtlamıştır. Faraday, alternatif akım altında mıknatis bulunan küçük bir kase içerisinde yer alan bir cıva içerisine yerleştirmiştir. Kablonun dairesel bir şekilde hareket ettiğini gözlemlemiştir. Bu durum, elektrik akımının kablo çevresinde manyetik bir alan oluşturduğunu kanıtlamıştır. Bu manyetik akım, mıknatis ile etkileşime girmiş ve bunun sonucunda kablo hareket etmiştir.

Peter Barlow, Elektromanyetik dönme hareketi keşfetmiş ve adını verdiği Barlow Modelini oluşturmuştur [5].

### **1.3. SMSM Tasarımı**

SMSM'lerin fırçalı motorlara göre daha çok tercih edilme sebebi boyutlarının küçük, verimlerinin ve hızlarının yüksek olmasıdır. Sahip oldukları düzgün termal karakteristik sayesinde güç yoğunlukları fazladır. Ayrıca küçük hacimli olmalarına rağmen yüksek moment üretebilmektedirler. Bakım maliyetleri düşüktür. Tüm bu sebeplerden dolayı SMSM' ye olan ilgi oldukça artmıştır.

SMSM, rotordaki sargıların yerini mıknatısların alması ile elde edilir. SMSM 'nin yol alabilmesi için bir sürücü devresine ihtiyaç vardır. Mikroişlemci, mikrodenetleyici, güç elektroniği ve malzeme alanında gelişmeler sebebiyle SMSM' lere olan ilgi oldukça artmıştır.

Günümüzde sayısal işlemciler sayesinde vektör kontrol uygulamaları başarılı bir şekilde yapılabildiği için SMSM daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. SMSM' lerde rotor devresinin olmaması sebebiyle indüksiyon motorlara göre kontrolü daha kolay olmaktadır [6].

Motor tasarımı yapılırken üretilebilirliğinin olması için aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır;

- Bir motor öncelikle minimum şekilde tasarlanmalıdır. Yalın üretim esas alınmalıdır. Malzeme ve imalat maliyetlerinin analizi iyi bir şekilde yapılmalıdır.
- Malzeme kısıtlamalarına dikkat edilmelidir. Malzemenin fiziksel sınırlamaları motor boyut-performans ilişkisini doğrudan etkilemektedir. Motor kullanım alanına ve ihtiyaca göre boyutsal parametreler ve malzeme kısıtlamaları belirlenmelidir.
- Motor tasarlanırken kullanılan malzeme özelliği, motorun tasarımı ve performansı uluslararası standartlara uygun bir şekilde üretilmelidir; NEMA, IEC vb. gibi kalite standartlarına uygun olmalıdır. Ayrıca üretimde kullanılacak malzemeler ilgili kuruluş tarafından tanımlanan standartlara bağlı özelliklerde olmalıdırlar.
- Tüm bu faktörlerin haricinde özel uygulamalarda kullanılacak motorlar farklı ihtiyaçlar gerektirebilir. Örneğin hava araçlarında kullanılan motorların performansının yüksek, ağırlığının hafif olması beklenir.

Özel uygulamalarda ise; klasik doğru akım motorlarında uyartım fırça ve kollektör düzeneği kullanılarak mekaniksel olarak gerçekleştirilmektedir. Bu mekaniksel uyartımdan dolayı motor sık sık bakıma gereksinim duymaktadır. DA motorlarındaki moment-hız karakteristiğinin korunarak uyartımın elektronik olarak gerçekleştirilmesi ile fırçasız doğru akım motorları geliştirilmiştir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarımı yapılırken, motor veriminin yükseltilmesi ve çalışma performansının artırılması amacıyla bazı parametrelerde iyileştirme yapılabilir. Motorun her parametresi çalışmasını etkilemektedir. Motor boyutundan, verimine kadar

birçok değişikliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle bu iyileştirmeler yapılırken ayrı bir çalışma alanı gerekmektedir. Motor tasarımının en iyi şekilde gerçekleştirilmesi, motorun kayıplarını azaltarak verimin artmasını ve motorun ısınma probleminin giderilmesini sağlamaktadır.

### **1.3.1. Sürekli Mıknatıslar**

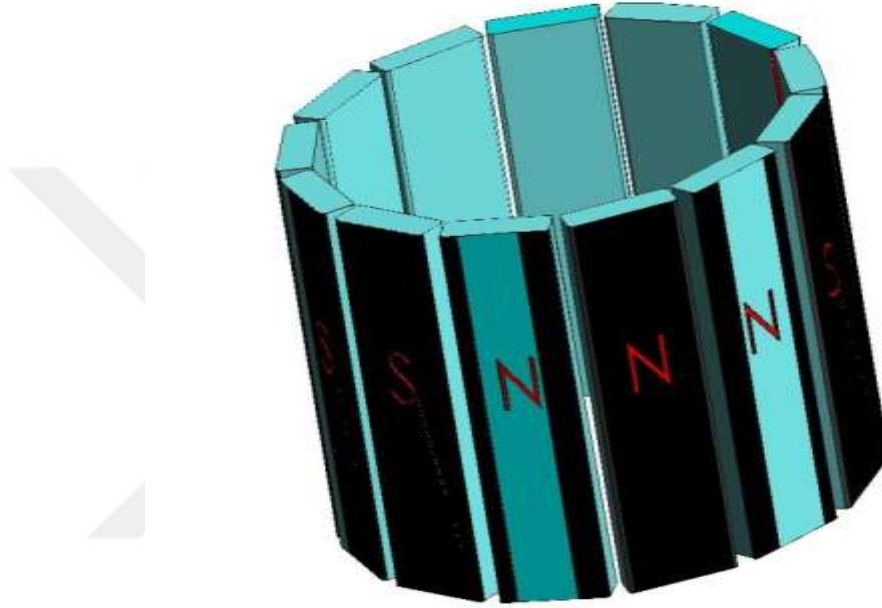
Yumuşak ve sert malzeme olmak üzere iki çeşit manyetik malzeme vardır. Ferromanyetik malzeme olarak da adlandırılan yumuşak malzemeler kolayca mıknatıslanabilir, demanyetize olabilir ve mıknatıslanmayı kolaylaştırmak için kullanılabilirler. Laminasyon sacları bunlara bir örnektir. Öte yandan sert malzemeler güçlükle mıknatıslanır ve demanyetize olurlar. Geniş bir histerisiz eğrisi ile karakterize edilirler.

Sürekli mıknatıslar endüstride, elektronikte ve günlük hayatımızın hemen hemen her yerinde kullanılmaktadır. Gelişen mıknatıs teknolojisi ile motorların veriminin ve çalışma performansının artırılmasında mıknatıslar önemli rol oynamaktadır. Sanayide yaygın olarak kullanılan mıknatıslar; Ferrite, Alnico, Samaryum-Kobalt (SmCo5) ve Neodyum-Demir-Bor (NdFeB) olarak gösterilebilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan motorda mıknatıslar NdFeB (Neodyum-Demir-Bor) olarak seçilmiştir. Motor üretilmeden önce, tasarım aşamasında belirlenen mıknatıslar sipariş verilirken N-S kutupları belirlenerek tedarik edilmelidir. Mıknatıs üreticisi müşteri talebine göre bu kutupları belirler ve uygun mıknatıslar seçilir. Tedarik edilen mıknatıslar oluk-kutup kombinasyonuna göre motora dizilmelidir. Tez çalışmasında, kullanılan motordaki mıknatıslara manyetik özellik kazandırılmadan üretim bandındaki işlemi tamamlanmıştır. Bu işlemin ardından rotor kısmında bulunan mıknatıslara manyetik özellik kazandırılmıştır. Böylece N-S kombinasyonu olağan motorlardan farklı olmuştur. Mıknatıslar rotora dizildikten sonra manyetik özelliğin yüklenmesi ve neticesinde mıknatısların son hali Şekil 1.1 'de gösterilmiştir.

Mıknatısın oluşturduğu enerji ne kadar yüksek olursa elde edilebilen moment değeri de o kadar büyük olur ve aynı güçteki diğer motorlara göre boyutları da küçülür. Bunun sonucunda da motorun atalet momenti küçük olur [7].

Tüm bu durumlar değerlendirilirse motorun sessiz çalışması, veriminin artırılması amacıyla tez çalışmasında kullanılan motorun manyetik alan dağılımı, dolayısıyla kutup dizilimi var olan motorlardan farklı bir biçimde tasarlanmıştır. Manyetik alan dağılımı Şekil 1.1’ de gösterilmektedir.



**Şekil 1.1.** Mıknatısların kutup dizilimi

Alnico, Smco, NdFeB, Ferrite gibi mıknatısların varlığı ile SMSM’ ler birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Bu mıknatısların sürekli akı yoğunlukları ve  $B \cdot H$  değerlerinin yüksek olması bu alanda avantaj sağlamıştır. Mıknatıslı motorların dezavantajı ise üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu tür mıknatıslar arasında maliyeti en düşük olan mıknatıs ferrite mıknatıstır. Ancak Alnico ve Ferrite mıknatıs türünün enerjileri SmCo ve NdFeB mıknatıslara göre daha düşüktür. SmCo türü mıknatısın ise mekanik dayanımı oldukça zayıftır ve yüksek hızlı motorlarda kısa sürede kırılma yapabilir. Ayrıca bileşeninde bulunan maddelere ulaşma gücü sebebiyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı tez çalışmasında optimum çalışmayı sağlayacak olan ve yüksek sürekli akı yoğunluğuna sahip NdFeB türü mıknatıs kullanılmıştır.

Motorda kullanılan NdFeB mıknatısına ait teknik özellikler aşağıda Tablo 1.2 ve Tablo 1.3’ de verilmiştir.

**Tablo 1.2. Mıknatıs Malzeme Özellikleri**

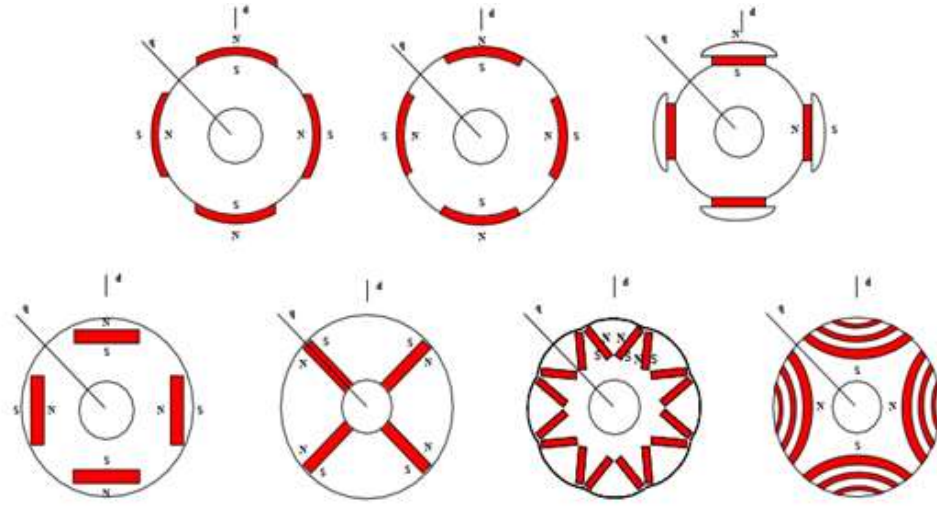
| Mıknatıslanma Değeri         |                              | Koersivite |                 |            | Enerji Yoğunluğu          |                                | Sıcaklık Katsayısı |         |
|------------------------------|------------------------------|------------|-----------------|------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|---------|
| Br typ. (Wb/m <sup>2</sup> ) | Br min. (Wb/m <sup>2</sup> ) | HcB (kA/m) | HcB min. (kA/m) | HcJ (kA/m) | BH(max) kJ/m <sup>3</sup> | BH(max) min. kJ/m <sup>3</sup> | TK(Br)             | TK(HcJ) |
| 1.18                         | 1.13                         | 915        | 860             | 2230       | 270                       | 240                            | 0.085              | 0.55    |

**Tablo 1.3. Mıknatıs Manyetik Özellikleri**

| Grade | Br   |      |      |      | HcB  | HcJ   | BH (max)          |      | Maksimum çalışma Sıcaklığı |
|-------|------|------|------|------|------|-------|-------------------|------|----------------------------|
|       | KGs  |      | T    |      | KA/m | KA/m  | KJ/m <sup>3</sup> |      | °C                         |
|       | Max. | Min. | Max. | Min. | Min. | Min.  | Max.              | Min. |                            |
| Nd35  | 12.3 | 11.7 | 1.23 | 1.17 | ≥860 | ≥2625 | 287               | 263  | ≥230                       |

Mıknatıs yapısı aynı zamanda rotor topolojisi ile yakında ilgilidir. Kullanılan mıknatısın şekli ve boyutu motorun geometrik yapısı ile alakalı bilgi verir. Mıknatıslı motorun rotor kısmında kullanılan mıknatıs şekline tasarımcı karar vermektedir. Mıknatısa ait özellikler ise matematiksel tasarım denklemlerinden elde edilir.

Sabit mıknatıslı motorlarda tasarım ihtiyaçlarına göre farklı yapılarda mıknatıslar kullanılabilir. Şekil 1.2’ de SMSM ’lerin farklı rotor yapılarına örnek verilmiştir [8].



**Şekil 1.2.** SMSM' lerin farklı rotor yapıları

Motorda kullanılan NdFeB mıknatıs Şekil 1.3' de ve motorun rotor yapısında Şekil 1.4' de gösterilmiştir. Şekil 1.5' de sürekli mıknatıs malzemesine ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon özellikleri gösterilmiştir.

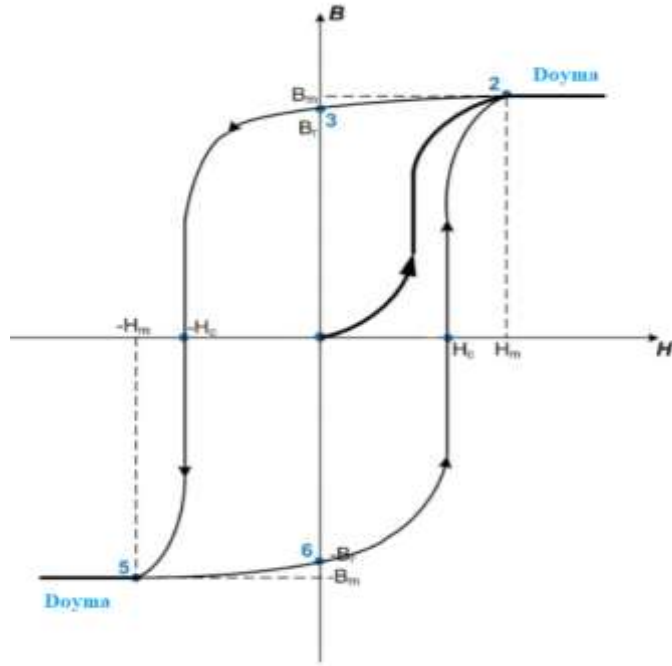
X ekseni malzemedeki mıknatıslama kuvvetini veya alan yoğunluğu olan  $H'$  yi ölçer. Y ekseni malzemedeki manyetik akı yoğunluğu  $B'$  dir. Manyetik olmayan duruma bir örnek olarak  $B = 0$  ve  $H = 0$  dır ve bu nedenle manyetizasyon orjinin dışında başlar [9].



**Şekil 1.3.** Motorda kullanılan NdfeB mıknatıs



Şekil 1.4. Motorun rotor yapısı



Şekil 1.5. Sürekli Mıknatıs Malzemesine Ait B-H Eğrisi

#### **1.4. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında SMSM' nin tasarım aşamaları açıklanarak, verimliliğini arttırmak için parçacık sürü tekniği ile sargı optimizasyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde yer alan SMSM' ler üzerine yapılmış çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş olup, tasarım optimizasyonunu etkileyen en önemli kriterler belirlenmiştir. Motor tasarımında ilk olarak motora ait analitik denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemler kullanılarak motor parametreleri hesaplanmıştır. Motorun performans sonuçları değerlendirilerek tasarım optimizasyonu ile performansında iyileştirmeler elde edilmiştir. Motorun optimizasyon sonuçlarının ardından motor katı modeli SOLIDWORKS programı yardımıyla oluşturularak, manyetik analizlerinin yapılabilmesi için ANSYS Maxwell programı ile entegre edilmiştir. Bu işlemlerin ardından sonlu elemanlar yöntemini uygulayan paket program ANSYS Maxwell ile motorun manyetik analizi gerçekleştirilmiştir.

Motor tasarımının ve optimizasyonunun sonuçlandırılmasının ardından motorun ısı analizi gerçekleştirilmiştir. Isıl analiz ANSYS Workbench Fluent Programı yardımıyla sonuçlandırılmıştır. Motor gerçek ölçülerine göre modellenerek, malzeme özellikleri tanıtılmış ve köşeli elemanlarla bölümlene ayarları yapılmıştır.

#### **1.5. Tezin İçeriği**

Birinci bölümde tez çalışması ile alakalı giriş bilgileri belirtilmiş olup, elektrik motorlarının tarihçesi açıklanmış, tezin amacı ve içeriği anlatılmıştır.

İkinci bölümde SMSM yapısı ve çeşitleri açıklanmış, kullanılan mıknatısların özellikleri ve türü belirtilerek; mıknatıs teknolojisi hakkında bilgi verilmiştir. Motorun eşdeğer devre modelleri yardımıyla motor denklemleri elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde motor tasarım süreci anlatılarak tasarım denklemleri çıkarılmıştır. Ayrıca motor tasarım denklemleri elde edildikten sonra, açıklamaları ile birlikte yazılmıştır. Motorun eşdeğer devreleri hakkında bilgi verilmiş, geometriye bağlı denklemler elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde motor optimizasyonu için kullanılan teknik olan parçacık sürü optimizasyon tekniği, detaylı bir şekilde ele alınmış ve optimizasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, motor tasarım sürecinin en önemli kısmı olan sonlu elemanlar yönteminin açıklaması yapılmış, ANSYS Maxwell sonuçları elde edilmiştir.

Altıncı bölümde, ANSYS Maxwell elektromanyetik çözümünün sonuçları elde edildikten sonra, alınan sonuçlar ısı analiz modülü olan Fluent yazılımına ANSYS Workbench ile aktarılmıştır. Kayıpların neden olduğu sıcaklık değişimleri gözlemlenmiş, analizden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

## 2. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

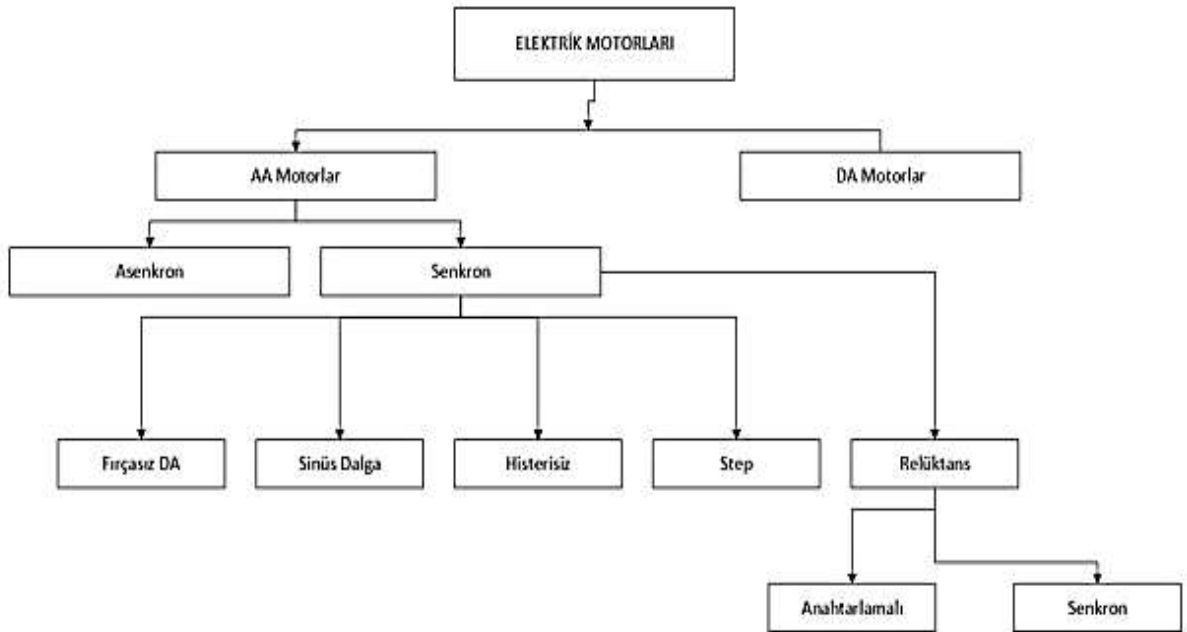
### 2.1. Giriş

Bu bölümde sürekli mıknatıslı motor türlerinden olan yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlar hakkında genel bilgiler verilmiştir ve sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan malzeme türleri anlatılmıştır. Ayrıca yüzey mıknatıslı motorlara ait tasarım denklemleri çıkartılarak, motor tasarım süreci ifade edilmiştir.

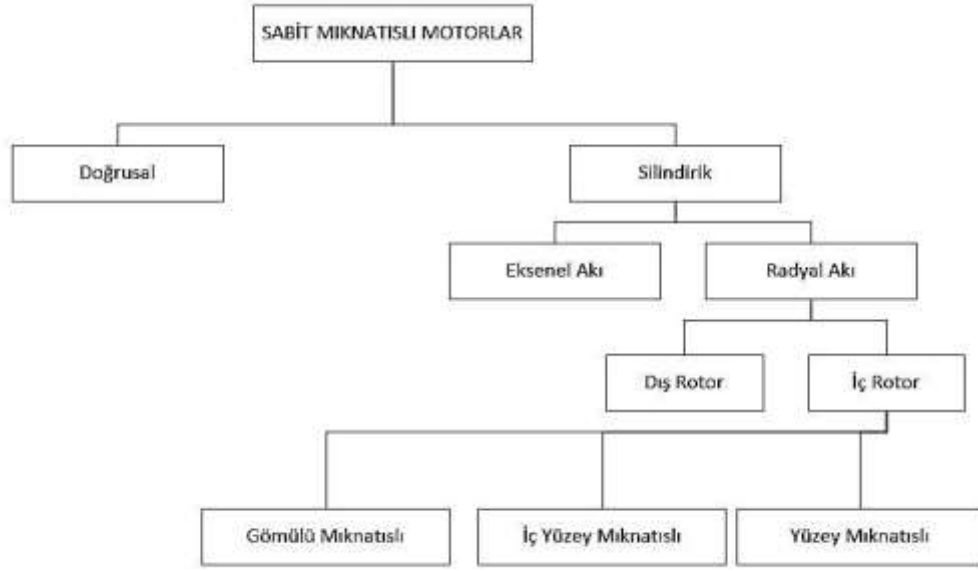
### 2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Elektrik motorları endüstriyel alanlarda çeşitli yükleri sürmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yüklere göre farklı güçlerde birçok motor bulunmaktadır.

Sürekli mıknatıslı motorlar çeşitli sınıflara ayrılmıştır. Her sınıflandırmanın kendi temeli vardır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’ de sürekli mıknatıslı motorların elektromekanik ve geometrik yapıya dayalı sınıflara ayrılması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. SMSM’ lerin Elektromekanik Yapıya Dayalı Sınıflara Ayrılması



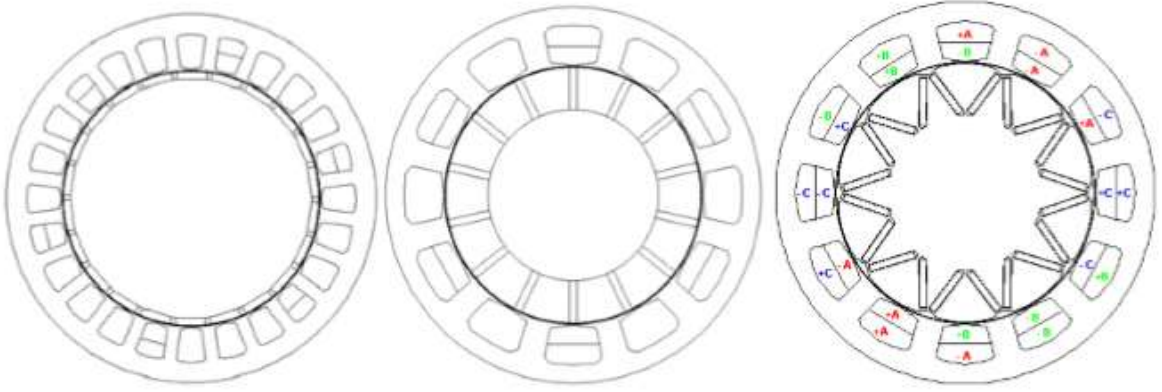
**Şekil 2.2.** SMSM’ lerin Geometrik Yapıya Dayalı Sınıflara Ayrılması

Şekilde görüldüğü gibi SMSM elektromekanik çalışmasına göre iki ayrım yapılmıştır. Silindirik SM motorlar, bir dönen rotor ve bir sabit stator ile normal dönme hareketine sahiptirler. Doğrusal motorlar ise rotorun düz yolda kayması ile çalışır.

Bu tez çalışmasında SMSM çalışıldığından silindirik motor yapısı incelenecektir. Bu tür motorlar manyetik devrelerine göre eksenel akı ve radyal akı olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Eksenel akı motorlarda stator ve rotor düz ve birbirinin üzerinde yer alırlar. Halbuki radyal akı ve rotorlarda rotor ve stator birbirinin içindedir.

Radyal akı motorlar, rotor ve stator pozisyonlarına göre iç rotor (rotor, stator ile sarılı) ve dış rotor (stator, rotor ile sarılı) olarak iki sınıfa ayrılırlar. İç rotorlu motorlar mıknatıs yapılarına göre üç gruba ayrılırlar; gömülü mıknatıs, iç yüzeysel mıknatıs ve yüzeysel mıknatıs. Her birinin yapısına göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Tasarım ve üretim sürecinde bu ayrımlar dikkate alınarak süreç tamamlanır. Tasarım süresi boyunca ihtiyaca göre, üretim süresi boyunca ise yalınlık, işçilik vb. gibi durumlara göre motor sınıfı belirlenir.

Bu noktada SMSM’ nin tasarımında oluk-kutup kombinasyonu ve geometrik yapısı tasarım sonucu belirler. Tasarımcı ihtiyaç doğrultusunda farklı yapılara sahip motorlar tasarlayabilir. Şekil 2.3’ de farklı oluk-kutup kombinasyonlarına örnekler verilmiştir [10].



**Şekil 2.3.** 24 Oluk-22 Kutup, Yüzey Mıknatıslı; 12 Oluk-14 Kutup, Radyal Gömülü Mıknatıs; 12 Oluk-10 Kutup V-Pozisyonlu Gömülü Mıknatıs

Mıknatısların geometrik durumu kadar oluk geometrik yapısı da değişebilir. SMSM’ de kullanılan farklı stator yapıları ve oluk geometrilerine ait örnekler ise Şekil 2.4’ de verilmiştir.



**Şekil 2.4.** SMSM ’lerde Kullanılan Farklı Stator Yapılarına Ait Örnekler

SM motorları, akı yoğunluk dağılımına ve uyarma akımı şekline göre iki gruba ayrılabilir. Birinci grup SMSM, sinüzoidal akı yoğunluğuna sahip ve diğer grup (SM-FDAM motor) dikdörtgen şekilli akı yoğunluğuna sahiptir. Bu tip SM motorların özellikleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** SMSM'nin Uyarma Akım, Akı Yoğunluğu, Güç ve Bemf Dalga Şekilleri

| SMSM             |            |
|------------------|------------|
| Faz akımı uyarma | Sinüzoidal |
| Akı yoğunluğu    | Sinüzoidal |
| Faz bemf         | Sinüzoidal |
| Güç ve Moment    | Sabit      |

Senkron motorların rotorunda yer alan DA uyarım sargısı yerine mıknatıs kullanarak uyarım alanı oluşturulan motor türleri SMSM olarak adlandırılmaktadır. Birçok araştırmacı bu motorlarla alakalı çalışmalar gerçekleştirmiş fakat manyetik malzeme alanındaki kısıtlılıklar, güç elektroniği teknolojisinin yeteri kadar gelişmiş olmaması ve motor kontrolünün yetersizliği gibi etkenlerden dolayı yeterli ilerleme sağlanamamıştır. Son yıllarda nadir toprak türü mıknatısların keşfi ile mıknatıs üretim teknolojisi ilerleme kaydetmiş bunun sonucunda bu türdeki motor ve generatörlerin kullanımı artmıştır. 1980' den sonra yüksek enerjili NdFeB (Neodyum Demir Bor) ve SmCo (Samarium Kobalt) mıknatıslarının bulunması ile SM motorlar asenkron ve DA motorlara nazaran popüler hale gelmiştir. SMSM' lerin asenkron ve DA motorlarına göre tercih edilmesinin nedenleri hacim ve ağırlıklarının az olması ayrıca verim, moment, güç yoğunluğu ve birim hacim başına üretilen moment miktarının yüksek olmasıdır.

NdFeB mıknatısları akı yoğunluğu en yüksek olan mıknatıslardan biri olduklarından dolayı motor manyetik devresinin daha iyi tamamlanmasını sağlar. Aynı güçteki motorlara göre daha küçük boyutta olmaları, moment ve güç yoğunluğunun yanı sıra verimlerinin de yüksek olmasından dolayı SMSM' ler birçok uygulamada öncelikle tercih edilmektedirler.

SMSM yüzey ve gömülü tip olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Yüzey mıknatıslı motorların üretiminin daha kolay ve motor kontrolünün de diğer motor türlerine kıyasla kolay olması önemli avantajlarından. Bunların yanı sıra yüksek hızlarda oluşan mekanik problemler rotor kılıfı kullanarak aşılabilir. Bu nedenle tez çalışmada yüzey mıknatıslı senkron motor kullanılmıştır.

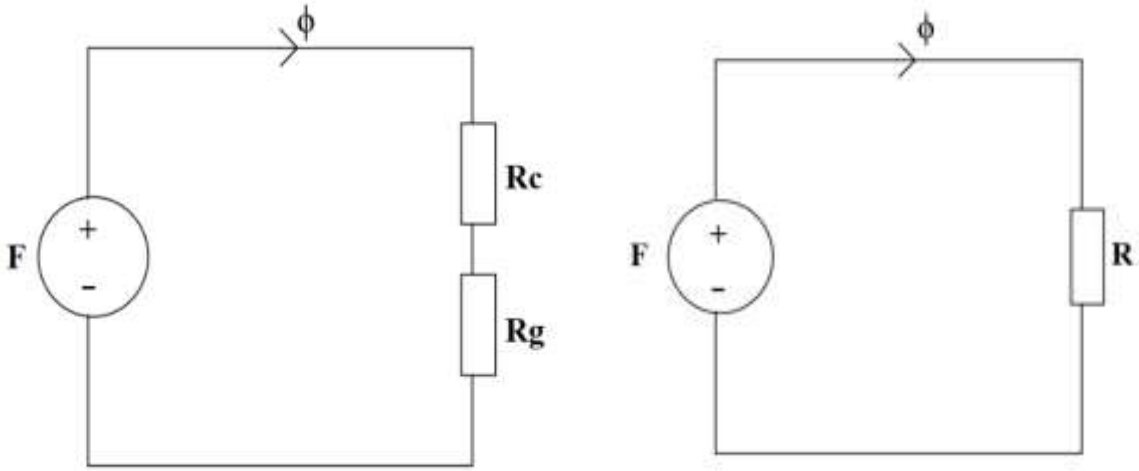
### 3. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORUN TASARIMI

Motor tasarımı yapılırken Amper Yasası ve Faraday yasası esas alınır. Bu iki yasanın anlaşılması motorun tasarım parametrelerinin hesaplanması için oldukça önemlidir.

**Amper Yasası** : Amper yasasına göre içinden akım akan bir iletkenin etrafında manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alanın yönü akımın yönüne göre değişir.

**Faraday Yasası** : Bir bobinin etrafındaki zamanla değişen akı bobinde gerilim oluşmasına sebebiyet verir.

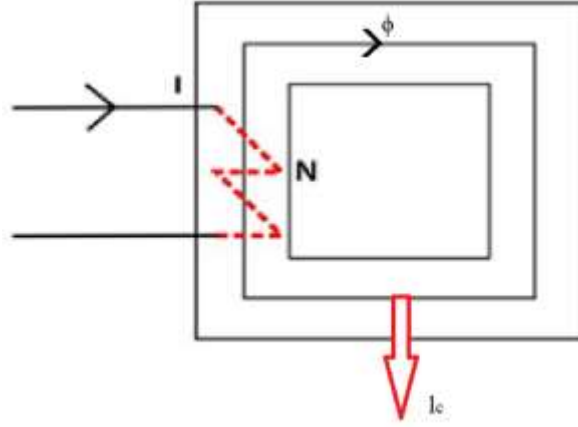
Bir manyetik çekirdeğin çevresindeki  $N$  sarımlı bir bobinden  $I$  akım akarsa  $N \times I$  değerinde bir manyetomotor kuvvet (MMK) oluşur. Bu kuvvet  $F$  ile gösterilir, birimi Amper-sarımdır. Bir çekirdeğin hem manyetik benzetim devresi hem de elektriksel eşdeğer devresi vardır. Bu devrelere amper ve faraday yasaları uygulanırsa, motor parametrelerinin matematiksel ifadelerine ulaşılabilir. Şekil 3.1’ de çekirdeğin manyetik eşdeğer benzetim devresi verilmiştir.



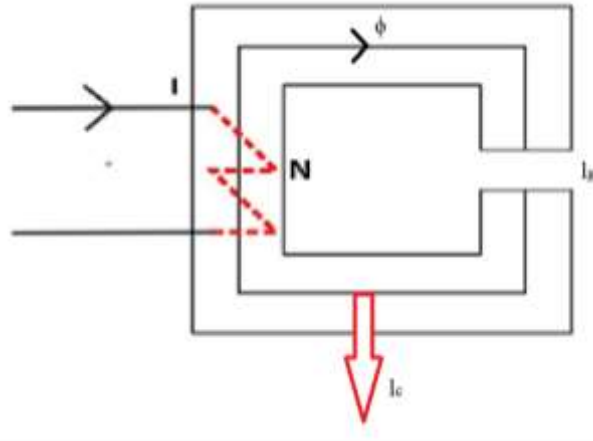
**Şekil 3.1.** Çekirdeğin manyetik eşdeğer benzetim devreleri

Nüvede hava aralığı yokken, burada direnç ( $R_g$ ) oluşmayacağı için eşdeğer manyetik benzetim devresinde hava aralığı direnci bulunmamaktadır. Ancak Şekil 3.3’ de gösterilen manyetik yapı hava aralığına sahiptir. Dolayısıyla hava aralığı direnci eşdeğer manyetik ve eşdeğer elektriksel devrede gösterilerek hesaplamalara dahil edilir.

Şekil 3.2’ de bir nüvenin hava aralığı yokken manyetik yapısı Şekil 3.3 ‘de ise bir nüvenin hava aralığı mevcutken ki yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hava Aralığı Yok İken Manyetik Yapı



Şekil 3.3. Nüvenin Hava Aralığı Mevcut İken Manyetik Yapı

Hava aralıklı yapı ve hava aralığının olmadığı yapı için ayrı ayrı denklemler çıkarılır. Temel yasalardan faydalanarak gerekli eşitlikler oluşturulur. Motor yapısının tasarımında bu eşitliklere ve motorun geometrik yapısına bağlı olarak motorun elektriksel ve manyetik tasarımı gerçekleştirilir. Her yapının kendine özgü geometrik eşdeğeri olması sebebiyle eşdeğer devreler geometriye bağlı olarak değişecektir. Ancak elektriğin ana yasaları değişmez ve tasarımın temelini oluşturmaktadır. Şekil 3.4’ de hava aralığı mevcut iken manyetik ve elektriksel eşdeğer devresi gösterilmektedir.

Motor devresinin analitik çözümü için gerekli denklemlerin oluşturulmasında manyetik alanın ve elektriğin temel yasalarından faydalanılır.

$$F = I_{net} = \oint H . d_{lc} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1' deki kısaltmalar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

F : Manyetomotor kuvveti

H : Manyetik alan yoğunluğu

$l_c$  : Çekirdeğin ortalama yol uzunluğu

$I_{net}$  : Akım

Denklem 3.2' deki manyetik alan kuvveti N (sarım sayısı) ve I (akım) cinsinden ifade edilirse manyetomotor kuvveti için aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$F = N . I = \oint H . d_{lc} \quad (3.2)$$

Manyetik akı yoğunluğu denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$B = \mu . H \quad (3.3)$$

B : Akı yoğunluğu

$\mu$  : Malzemenin geçirgenlik katsayısı

Manyetik akı Denklem 3.4 aşağıdaki gibidir.

$$\phi = B . A \quad (3.4)$$

A : Kesit alanı

Yukarıdaki denklemler manyetomotor eşitliklerinde yerine yazılırsa Denklem 3.5 elde edilir ;

$$F = N . I = H_c . l_c = \frac{B_c}{\mu} . l_c \quad (3.5)$$

$H_c$  : Çekirdeğin manyetik alan yoğunluğu

$B_c$  : Çekirdeğin akı yoğunluğu

$l_c$  : Çekirdeğin ortalama yol uzunluğu

$A_c$  : Çekirdeğin kesit alanı

$\mu$  : Çekirdeğin manyetik geçirgenlik katsayısı

N : Sarım sayısı

$I$  : Akım

$\phi$  : Manyetik akı

Hava aralığı mevcut iken manyetik yapı, eşdeğer manyetik devre ve eşdeğer elektriksel devresi Şekil 3.4 ‘deki gibi olacaktır. Bu devrelerden yola çıkarak çekirdeğin relüktansı Denklem 3.6 ‘daki gibi hesaplanır;

$$R_{mc} = \frac{l_c}{\mu.A_c} \quad (3.6)$$

Böylece Denklem 3.7 ile manyetomotor kuvveti bulunacaktır.

$$F = R_{mc}.\phi \quad (3.7)$$

Ancak hava aralığı ihmal edilmediği takdirde hava aralığı relüktansı da Denklem 3.8 ‘deki gibi hesaplanacaktır;

$$R_{mg} = \frac{L_g}{\mu_0.A_g} \quad (3.8)$$

$L_g$  : Çekirdeğin Hava Aralığı Uzunluğu

$A_g$  : Çekirdeğin Hava Aralığı Kesit Alanı

Bu durumda manyetomotor kuvveti aşağıdaki Denklem 3.9 ile hesaplanır;

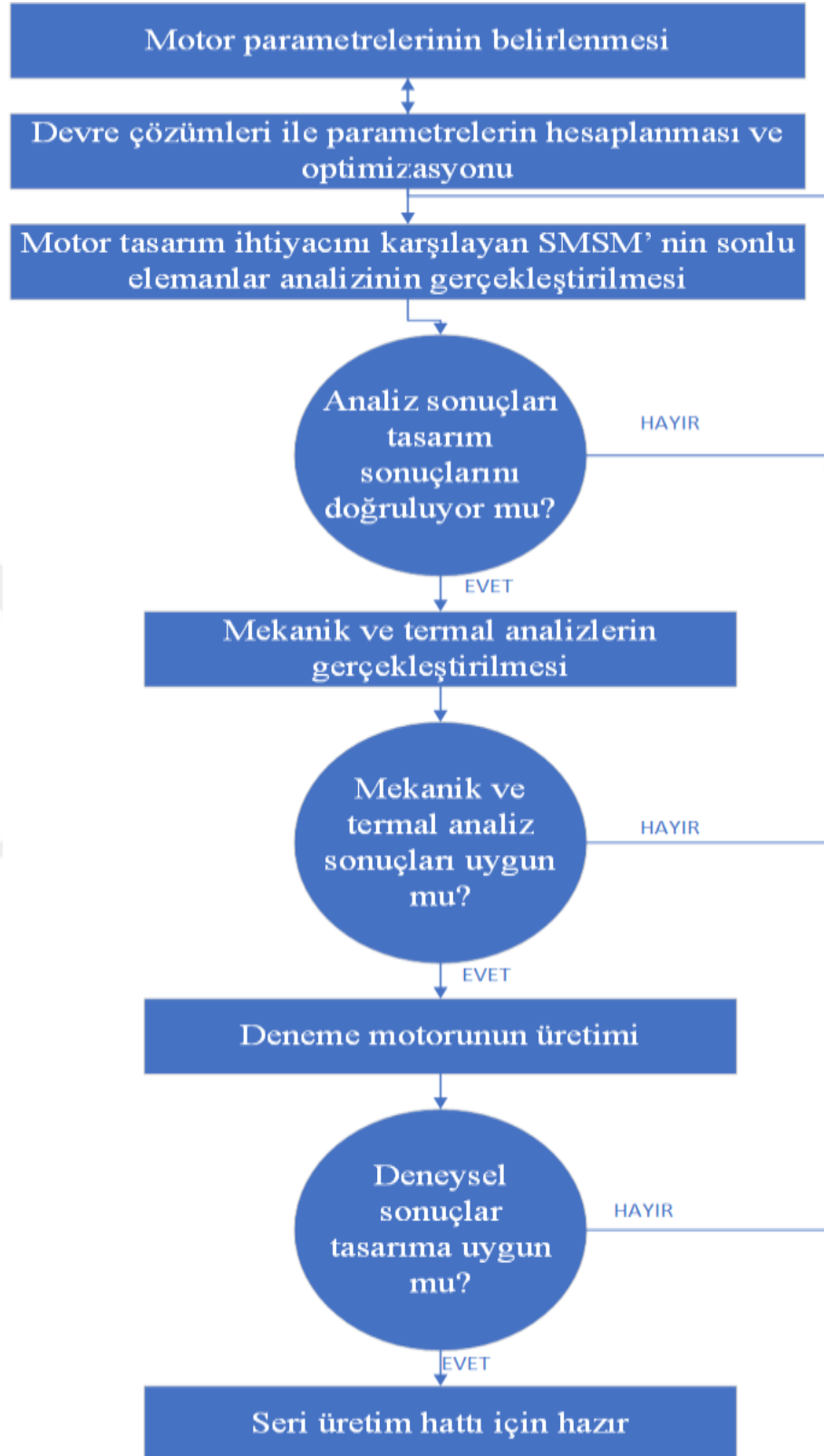
$$F = \phi.(R_{mg} + R_{mc}) \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde hesaplanan parametrelerin benzerlikleri Tablo 3.1’ de verilmektedir.

**Tablo 3.1.** Eşdeğer devrelerin parametre benzetişimleri

| Manyetik Devre |        | Elektriksel Devre |   |
|----------------|--------|-------------------|---|
| Akı            | $\phi$ | Akım              | I |
| Relüktans      | $R_m$  | Direnç            | R |
| MMK            | F      | Gerilim           | V |

Motor tasarım sürecindeki her adım önem arz etmektedir. Tasarımın eksiksiz tamamlanabilmesi için motor tasarım süreci algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma Şekil 3.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.4. Motor Tasarım Süreci Algoritması

### 3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Ön Tasarımı

SMSM' ler yapı olarak stator, sargılar, sürekli mıknatıslar, rotor ve milden oluşmaktadır. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu yapılırken amaç fonksiyonu olarak motorun performans değerleri gözetilmektedir. Diğer bir ifade ile sürekli mıknatıslı motorun tasarım optimizasyonu yapılırken mıknatıs boyutları, hava aralığı uzunluğu, olukların yapısı ve sargı dizilimi önem arz etmektedir. Yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde motorun veriminin arttırılması, maliyet, ağırlık ve motor ısısının dolayısıyla kayıpların azaltılması gibi durumlar hedeflenmektedir. Sürekli mıknatıslı motorların ön analitik tasarım sürecinde ilk olarak istenilen tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak motorun manyetik devresi modellenir ve oluk-kutup kombinasyonu gibi değerler ile stator çapı, dış kalınlığı, rotor çapı ve oluk yapısı gibi motorun temel geometrik tasarımı gerçekleştirilir. Daha sonra manyetik ve elektriksel hesaplamalar neticesinde motorun ön analitik tasarımı gerçekleştirilir. Tasarım kriterlerinde istenen amaç fonksiyonlarını karşılayan bir sonuç elde edildiğinde motorun sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek oluşan performansın istenen amaç kriterlerinde olup olmadığına bakılır. Ön analitik çalışma, tasarım optimizasyon algoritması ve sonlu elemanlar yönteminin yanı sıra deneysel sonuçların incelenmesi ile bir motorun tasarımı tamamen gerçekleştirilmektedir.

### 3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tasarımı

Bu bölümde yüzey mıknatıslı senkron motor tasarımı için motorun eşdeğer manyetik ve elektriksel devresi ile eşdeğer geometrik modeli detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Elde edilen bu eşdeğer modellerden motor tasarım parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen matematiksel ifadeler ile radyal akıllı bir mıknatısa sahip motorun matematiksel modeli elde edilmiştir. Motorun sargı telinin çapı, sargı telinin uzunluğu, gibi büyüklükleri tasarım optimizasyonu için kullanılan giriş parametreleridir. Çıkış parametreleri ise kayıplar, ısınma derecesi gibi motorun performans değerleridir. Burada motor geometrisi üzerinde değişiklik yapılmadan, sonradan müdahale edilerek performansın arttırılması amaçlanmıştır.

SMSM tasarımı temel olarak 6 ana aşamada yapılmaktadır;

- Motor tasarım gereksinimi belirlenmekte ve rotor topolojisi seçilmektedir.

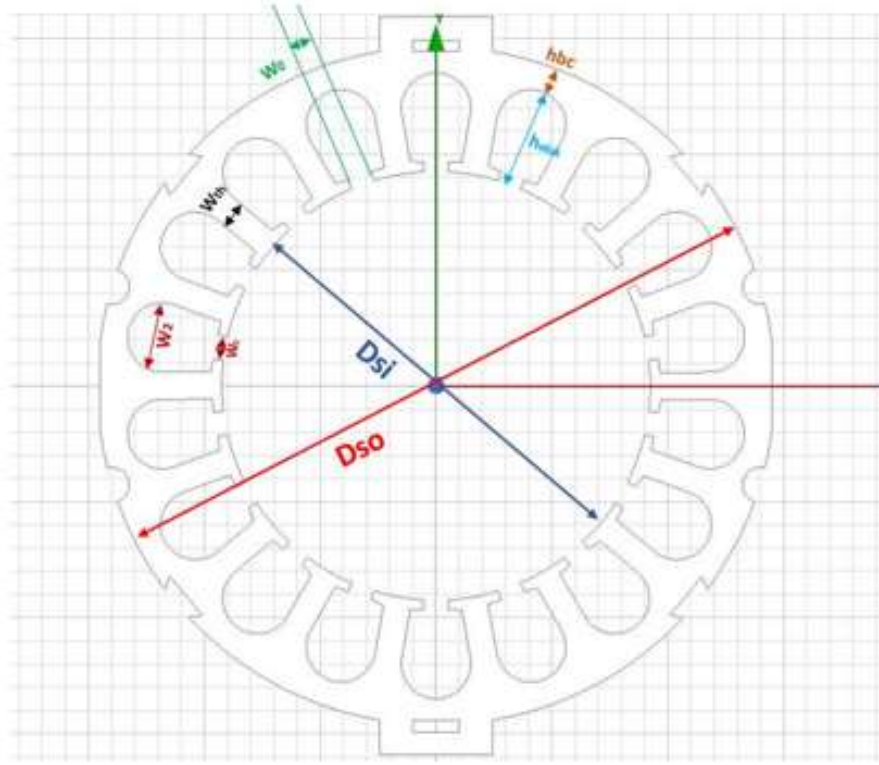
- Motor tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmektedir.
- Motorun elektromanyetik, yapısal ve termal analizleri yapılmaktadır.
- Motorun teknik çizimleri gerçekleştirilmektedir.
- Motor protoiplerinin üretimi ve deneysel doğrulama yapılmaktadır.
- Motor seri üretime aktarılmaktadır.

Motorun matematiksel modeli oluşturulurken aşağıdaki maddeler dikkate alınmıştır;

- Hava aralığı akısı sinüzoidal olup, kutup sayısına bağlı olarak  $120^\circ$  lik elektriksel açı sağlayacak şekilde statora düzgün bir şekilde yayılmıştır.
- Histerezis ve fuko kayıpları ihmal edilmiştir.
- Skin effect olayı ihmal edilmiştir.
- Direncin sıcaklıktan etkilenmediği kabul edilmiştir.
- Sabit mıknatısların oluşturduğu toplam manyetik akı değeri sıcaklıktan bağımsız ve sabit olarak kabul edilmiştir [11].
- Motor manyetik alan dağılımı düzgün kabul edilmiştir.

### 3.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Geometrisi

Sabit mıknatıslı senkron motorun tasarım denklemlerinin doğru olarak çıkarılabilmesi için motor geometrik modeli ayrıntılı olarak ele alınmalıdır. Motora ait manyetik ve elektriksel eşdeğer devrelerinin doğru olarak çözülebilmesi, motor geometrisine bağlı matematiksel denklemler elde edilmiştir. Motorun giriş parametreleri olan matematiksel denklemler, motora ait performans büyüklüklerini hesaplamak için kullanılacaktır. Sabit mıknatıslı senkron motorlarda geometrik değişkenlere ait formüller ise aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir. Şekil 3.5 ise motorun geometrik yapısını ifade etmektedir.



**Şekil 3.5.** Sabit mıknatıslı senkron motorun geometrik yapısı

Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda stator iç çapı  $D_{si}$  hesabında, motorun geometrik durumuna bağlı olarak rotor dış çapı  $D_{rd}$ , mıknatıs uzunluğu  $h_m$  ve hava aralığı uzunluğu  $g$  kullanılmaktadır. Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda ise motorun geometrik yapısına bağlı olarak denklemlerde değişiklik olacaktır. Bu tez çalışmasında yüzey mıknatıslı rotor yapısı kullanıldığından dolayı motor giriş parametreleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$D_{si} = D_{rd} + 2.(h_m + g) \quad (3.10)$$

Stator oluk üst çapı  $D_{st}$  Denklem 3.11 ile ifade edilir.

$$D_{st} = D_{si} + 2.h_{ss} \quad (3.11)$$

Burada  $h_{ss}$  stator oluk uzunluğu ve stator oluk ağzı uzunluğunun toplamını,  $D_{si}$  ise stator iç çapını ifade etmektedir.

$D_{ms}$ ; mıknatısın yüzeysel çapı Denklem 3.12 ile ifade edilmiştir. Burada  $D_{rd}$  rotor dış çapını temsil etmektedir.

$$D_{ms} = D_{rd} + 2.h_m \quad (3.12)$$

Motora ait diğer geometrik denklemler aşağıdaki gibidir.

$$h_{bc} = \frac{D_{rd} - D_{ri}}{2} \quad (3.13)$$

$h_{bc}$  : arka çekirdek uzunluğu

$$h_{rc} = \frac{D_{ri} - D_i}{2} \quad (3.14)$$

$h_{rc}$  : rotor çekirdeği uzunluğu

$D_i$  : mil çapı

$$\tau_s = \pi \cdot \frac{D_{si}}{N_s} \quad (3.15)$$

$\tau_s$  ile ifade edilen oluk adımı Denklem 3.15 yardımıyla hesaplanır, burada  $N_s$  oluk sayısını temsil etmektedir.

$$S_{pitch} = \frac{D_{si}}{Q_s} \cdot \pi \quad (3.16)$$

Motor geometrik denklemleri birbirini takip eder. Oluk alt kısmının genişliği Denklem 3.17 ile ifade edilir.

$$w_1 = \pi \cdot \frac{D_{si} + 2.h_{sw}}{N_s} - b_{ts} \quad (3.17)$$

$w_1$  : Oluk genişliğine ait alt kısmı

$h_{sw}$  : Oluk ağzı uzunluğu

Oluk genişliğinin üst kısmının hesaplanabilmesi için Denklem 3.18 kullanılır.

$$w_2 = \pi \cdot \frac{D_{si} + 2h_{oluk}}{N_s} - b_{ts} \quad (3.18)$$

$w_2$ : Oluk genişliğine ait üst kısım

$b_{ts}$  : Diş kalınlığı

Oluk açıklığı Denklem 3.19' daki denklem ile hesaplanır.

$$w_0 = k_{open} \cdot w_1 \quad (3.19)$$

$w_0$  : Oluk dış açıklığı

$w_1$  : Oluk genişliğine ait alt kısım

$$w_{th} = S_{pitch} - w_0 \quad (3.20)$$

$w_{th}$  : Stator dış genişliği

Oluk uzunluğu Denklem 3.21 ile ifade edilir.

$$h_{slot} = h_{ss} - h_{sw} \quad (3.21)$$

$h_{ss}$  : Stator oluk uzunluğu

$h_{sw}$  : Oluk ağzı uzunluğu

$h_{slot}$  : Oluk uzunluğu

Mıknatıs oranı (embrace) motor tasarımında önemli parametrelerden birisidir. Motor geometrisinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde yazılıma doğru verilerin girilmesi sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Motor geometrisini doğrulayan bu oran Denklem 3.22 ile hesaplanır.

$$\text{COV} = \frac{a_{mag}}{\pi} \quad (3.22)$$

$a_{mag}$  : Mıknatısın elektriksel açısı

Mıknatıs yay uzunluğu olarak adlandırılan  $w_m$  Denklem 3.23 ile ifade edilir.

$$w_m = \frac{\text{COV} \cdot \pi \cdot D_{ms}}{\rho} \quad (3.23)$$

Oluk hacmi Denklem 3.24 ve Oluk alanı denklem 3.25' deki ifadeler ile hesaplanır. Motor geometrisinin farklı olmasıyla bu denklemler farklı olabilir. Motor geometrisine bağlı olarak matematiksel denklemler elde edilir.

$$V_{mag} = A_{mag} \cdot L \quad (3.24)$$

$$A_{slot} = (b_{ss1} + b_{ss2}) \cdot \frac{h_{ss} - h_{sw}}{2} \quad (3.25)$$

Motor tasarımcısı için tasarımın temelini oluşturabilecek olan faz ve kutup sayısı başına düşen oluk sayısı miktarı Denklem 3.26 ile hesaplanır.

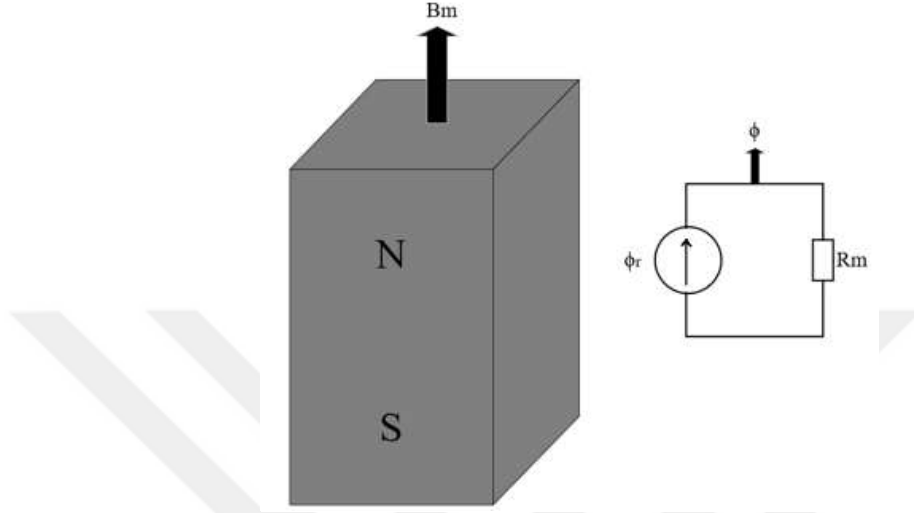
$$q = \frac{Q_s}{\text{faz} \cdot \rho} \quad (3.26)$$

### 3.4. SMSM' nin Tasarım Parametreleri ve Performans Hesapları

Analitik çözümlene yapılabilmesi için yüzey mıknatıslı SMSM motorun manyetik ve elektriksel eşdeğer devreleri elde edilir. Eşdeğer devreler için matematiksel denklemlerden yararlanılır.

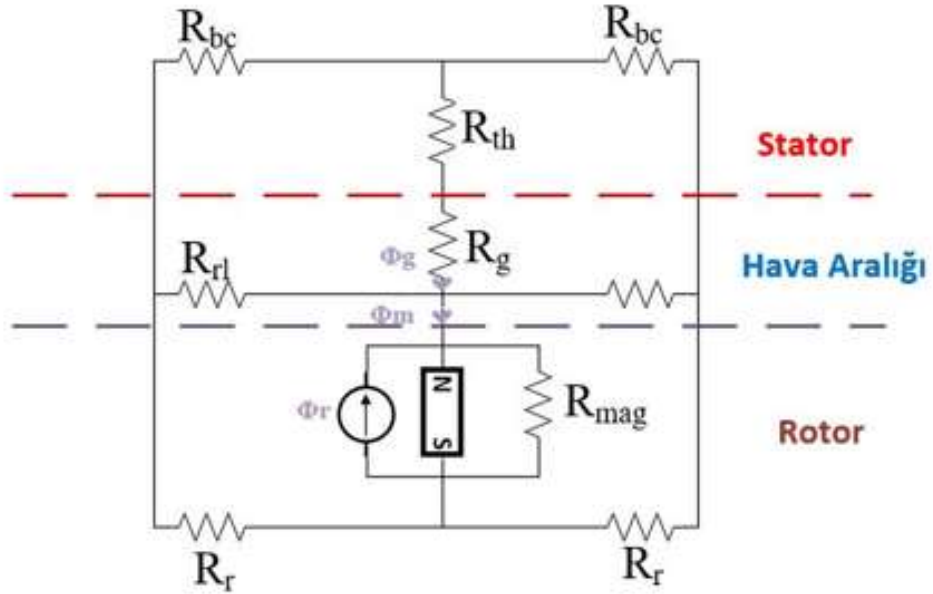
### 3.5 Manyetik Devre Parametrelerinin Hesabı

Manyetik bir malzeme Şekil 3.6’ daki gibi eşdeğer manyetik bir devre oluşturmaktadır.



Şekil 3.6. Kare mıknatıs ve manyetik eşdeğer devresi

Mıknatıslı motorlarda kullanılan her mıknatıs kendi manyetik eşdeğer devresini oluşturmaktadır. Motor tasarım sürecinde mıknatıs eşdeğerler devresinin doğru şekilde tanımlanması tasarım denklemlerinin doğru elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.7. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi

Bir motorun manyetik eşdeğer devresi oluşturulurken mıknatıslar için Şekil 3.7' deki temel manyetik eşdeğer devre esas alınır, manyetik malzemeye göre motor modellenir.

Bir motor için temel manyetik eşdeğer devre oluşturulur. Gerekli parametreler için denklemler çıkarılır. Tez çalışmasında temel manyetik alan kavramları ile başlanarak, manyetik geçirgenlik, relüktans, akı ve manyetomotor kuvveti (MMK) kavramlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir [12].

Sürekli mıknatıslar tarafından üretilen manyetik akı, kuzey ve güney kutbu ile sonuçlanan bir dağılıma sahiptir. Rotor ve stator demirin sonsuz geçirgenliğe sahip olduğunu varsayarsak bobin tarafından üretilen MMK' nin, akış yolundaki iki hava boşluğunun relüktansını aşabilmek için tamamen bittiğini anlamak kolaydır [13].

Parametrelerin hesaplanması için manyetik devrede akı yollarının belirlenmesi gerekmektedir. Manyetik devre parametrelerinin hesabında en önemli büyüklük mıknatıslar tarafından oluşturulan hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğudur. Kutuplarda meydana gelen akı hava aralığı ardından stator dişleri üzerinden geçip manyetik nüve üzerinden yolu takip ederek tekrar stator dişleri ve ardından mıknatıslar üzerinden geçerek rotora ulaşır. Motorun manyetik parametre hesabı yapılırken motora ait her mıknatıs Norton eşdeğeri ile ifade edilmektedir. Manyetik bir devrenin eşdeğeri aslında elektrik devresiyle benzetişim yapılmıştır. Akım, gerilim, direnç yerine sırasıyla akı, MMK, relüktans olarak düşünülebilir. Manyetik devreler, bir elektrik devresine benzetilerek çözülebilir.

Motora ait manyetik parametrelerin hesaplanması, açıklamalarla birlikte aşağıda gösterilmektedir.

### 3.6. Manyetik Relüktans

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda mıknatıs modellenmesi motor tasarımının başlangıcı olarak kabul edilir. Her bir mıknatıs bir akı kaynağı ve bir mıknatıs iç relüktansı ile ifade edilir. Denklem 3.27' de mıknatısa ait relüktans ifade edilmektedir.

$$R_{mag} = \frac{h_{mag}}{\mu \cdot A_{mag}} \quad (3.27)$$

$R_{mag}$  : Mıknatısın relüktansı

$h_{mag}$  : Mıknatıslanma yönündeki mıknatıs yüksekliği

$A_{mag}$  : Mıknatıslanma alanı

### 3.7. Rotor Kaçak Relüktansı

Rotor kaçak relüktansı statora geçemeyen akı sebebiyle oluşmaktadır, bu akının hava aralığından statora geçemeyen kısımları bulunmaktadır. Bu parametrenin doğru bir biçimde hesaplanması zordur. Bu nedenle literatürde rotor kaçak relüktansı, mıknatıs iç relüktansın yaklaşık on katına eşit sayılmaktadır. Rotor kaçak relüktansı Denklem 3.28 ile ifade edilmektedir.

$$R_{rl} = 10.R_{mag} \quad (3.28)$$

$R_{rl}$ : rotor kaçak relüktansı

### 3.8. Hava Aralığı Relüktansı

Hava aralığı relüktansı eşdeğer manyetik devrenin en önemli parametrelerinden birisidir. Bu parametre hava aralığı akısının ve akı yoğunluğunun hesaplanabilmesi için gereklidir. Hava aralığı manyetik direnci (relüktansı) Denklem 3.29 ile ifade edilmiştir.

$$R_{mg} = \frac{(g.k_c)}{A_{gap} \cdot \mu_0} \quad (3.29)$$

Mıknatısın oluşturduğu manyetik akının büyük bir kısmı hava aralığına geçmektedir. Dolayısıyla hava aralığında manyetik bir relüktans söz konusudur. Manyetik bir direncin hesaplanması için, akı yolunun uzunluğu ve akının geçtiği alanın hesaplanması gerekmektedir. Oluklardaki boşluklar hava aralığı relüktansını etkilediği için hesaplamada Karter katsayısı kullanılacaktır. Karter katsayısı Denklem 3.30' da ve Denklem 3.31' de gösterildiği gibi iki şekilde hesaplanabilir;

$$k_{carter} = \frac{S_{pitch}}{S_{pitch} - \frac{(b_{ss0})^2}{b_{ss0} + 5.g}} \quad (3.30)$$

$$k_{carter} = \frac{(\pi \cdot D_{si} \cdot N_{slot})}{oluk\text{ğimi} - (w_0 / (w_0 + 5 \cdot g))} \quad (3.31)$$

- $S_{pitch}$  : Bir bobinin iki iletken arasındaki oluk sayısı  
 $D_{si}$  : Stator iç çapı  
 $b_{ss0}$  : Oluk açıklığı  
 $g$  : Hava aralığı uzunluğu  
 $N_{slot}$  : Oluk sayısı  
 $K_c$  : Karter katsayısı

### 3.9. Hava Aralığı Alanı

Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda mıknatıs tarafından üretilen akı hava aralığından geçerek statora ulaşmaktadır. Hava aralığı akı yoğunluğunun, hava aralığı relüktansının ve bunlara bağlı parametrelerin hesaplanabilmesi için hava aralığı alanının hesaplanması oldukça kritik bir işlemdir. Bu tez çalışmasında kullanılan motora ait mıknatıslar dikdörtgen formda olduğu için gerekli formüller aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Elde edilen denklemler motorun rotor, stator, mıknatıs geometrisine göre değişmektedir. Bu nedenle yapılacak hesaplamalarda motorun geometrik yapısı göz önünde bulundurulmalıdır.

Mıknatıs kesit alanı aşağıda Denklem 3.32' deki gibi hesaplanmaktadır. Burada  $A_{mag}$ ; mıknatısın kesit alanını,  $W_m$ ; mıknatıs genişliğini ve  $h_m$ ; mıknatısın yüksekliğini ifade etmektedir.

$$A_{mag} = W_m \cdot h_m \quad (3.32)$$

Hava aralığı alanının hesaplanması Denklem 3.33' de verilmiştir. Hava aralığı hesaplanırken stator iç çapı dikkate alınmaktadır. Bu denklemde verilen değişkenler  $D_{si}$ ,  $a_{mag}$ ,  $g$  ve  $L$  sırasıyla stator iç çapı, mıknatıs yüzey açısı, hava aralığı uzunluğu ve paket boyunu ifade etmektedir.

$$A_{gap} = \left( \frac{D_{si} \cdot a_{mag}}{2} + 2 \cdot g \right) \cdot L \quad (3.33)$$

Sabit mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan mıknatıslar bir açıya sahip ise bu mıknatısın yüzey açısı Denklem 3.34 ile hesaplanabilir;

$$a_{mag} = \frac{a \cdot \pi}{180} \quad (3.34)$$

$a_{mag}$  : mıknatısın yüzey açısı

### 3.10. Stator Dişi ve Stator Arka Boyunduruk Direnci

Stator dişi ve arka boyunduruk direnci birçok uygulamada ihmal edilebilmektedir. Ohm kanununa göre direnç hesaplanırken malzemenin sonsuz geçirgenliğe sahip olduğu varsayılarak dirençler ihmal edilmektedir. Fakat bazı uygulamalarda manyetik alan yoğunluğunun yüksek olması, dolayısıyla bu uygulamalarda stator dişi direnci ve stator arka boyunduruk direncinin hesaplanması gerekmektedir.

Stator dişi ve arka boyunduruk direncinin hesaplanması için kullanılan denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$R_{th} = \frac{h_{slot}}{\mu_{çelik} \cdot \mu_0 \cdot A_{th} \cdot S_{pitch}} \quad (3.35)$$

$$R_{bc} = \frac{\pi \cdot (D_{s0} - h_{bc})}{\mu_0 \cdot \mu_{çelik} \cdot A_{bc} \cdot \rho} \quad (3.36)$$

Stator dişi relüktansı ve arka boyunduruk relüktansının hesaplanabilmesi için stator dişi alanı ve stator arka boyunduruk alanının da hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamalar için gerekli eşitlikler denklem 3.37 ve 3.38’ de ifade edilmiştir.

$$A_{th} = W_{th} \cdot L \quad (3.37)$$

$$A_{bc} = h_{bc} \cdot L \quad (3.38)$$

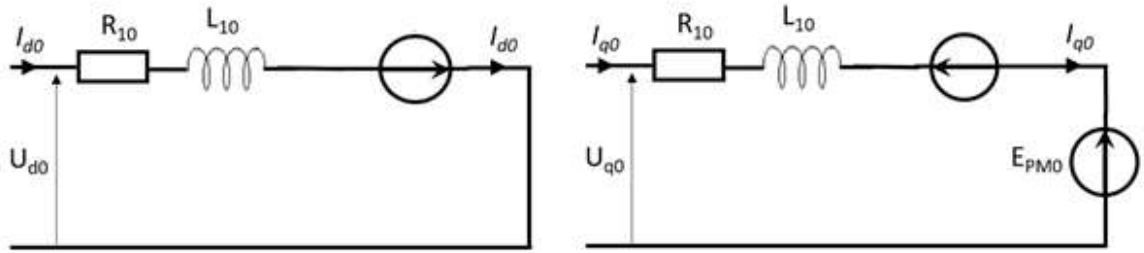
$A_{th}$  : Stator Dişı Alanı

$A_{bc}$  : Stator Arka Boyunduruk Alanı

$L$  : Paket Boyu

### 3.11. Elektriksel Eşdeğer Devre Modelinin Hesaplanması

Sabit mıknatıslı motorların elektriksel eşdeğer devresi, iki devre (d ve q eksen) şeklinde ifade edilebilir. Elektriksel eşdeğer devre Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil.3.8. SMSM elektriksel eşdeğer devresi

$$V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_{0d}}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot I_q \quad (3.39)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_{0q}}{dt} - \omega_e \cdot L_d \cdot I_d + \omega_e \cdot \Psi_m \quad (3.40)$$

$R_s$  : Bir faza ait direnç

$I_d, I_q$  : (d-q eksen) dirençler üzerinden geçen akım

$L_d, L_q$  : (d-q eksen) indüktansı

$\Psi_m$  : Mıknatıs akısı

$\omega_e$  : Rotorun elektriksel hızı

$I_{0d}, I_{0q}$  : (d-q eksen) indüktansları üzerinden geçen akım

$V_d, V_q$  : d-q ekseni gerilimi

### 3.12. İletken Uzunluğu

Motor oluklarında bulunan bir bobin için iletken uzunluğu Denklem 3.41' deki gibi hesaplanır;

$$L_{kablo} = 2.N.(L + L_{ext} + (S_{pitch} / N_{oluk} (D_{si} + h_{oluk}).\pi) \quad (3.41)$$

L : Paket uzuluğu

L<sub>ext</sub> : Sargı son yüksekliği

N<sub>oluk</sub> : Oluk sayısı

h<sub>oluk</sub> : Oluğun yüksekliği

### 3.13. İletken Kesit Alanı

Motor bobinleri için D çapında bir iletken seçilmiş ise, bu iletkenin kesit alanı Denklem 3.42 ile hesaplanır;

$$A_{iletken} = \pi.D_{iletken}^2 / 4 \quad (3.42)$$

D<sub>iletken</sub> : İletken çapı

Eğer iletkenin çapı bilinmiyorsa kesit alanının hesaplanması için Denklem 3.43 kullanılır.

$$A_{iletken} = \frac{0,5.A_{oluk}.k_{fill}}{N} \quad (3.43)$$

A<sub>oluk</sub> : Oluk alanı

k<sub>fill</sub> : Oluğun doluluk oranı

N : Sarım sayısı

Burada k<sub>fill</sub> oluk doluluk oranını ifade etmektedir. Motor tasarımının temel kriterlerinden biridir ve 0 ile 1 arasında değer alır.

$$k_{fill} = \frac{A_{kablo}}{A_{oluk}} \quad (3.44)$$

### 3.14. İndüktans Değerinin Hesaplanması

Motor d-q indüktanslarının değeri ( $L_d$  ve  $L_q$ ) motorun boyutları cinsinden hesaplanmıştır. Toplam sargı indüktanslarının hesaplanabilmesi için oluk sızıntı indüktansı, sargı son indüktansı ve mıknatıslanma indüktansının hesaplanması gerekmektedir.

#### 3.14.1. Oluk Sızıntı İndüktansının Hesaplanması

Oluk sızıntı indüktansı, çift katmanlı sargı yapısında iki kısımdan oluşmaktadır. Bu indüktansın oluşmasının sebebi bakır iletkenleri birbirine bağlayan akıdır. Bu indüktans Denklem 3.45 ile ifade edilebilir.

$$L_{oluk} = L_{sls} + L_{slm} \quad (3.45)$$

$L_{oluk}$  : Oluk indüktansı

$L_{sls}$  : Bobinin kendi indüktansı

$L_{slm}$  : Bobinin karşılıklı indüktansı

#### 3.14.2. Sargı Son İndüktansının Hesaplanması

Bu tür indüktansların gerçek değerini hesaplamak oldukça zordur. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi bu indüktansların hesabı için kullanılmaktadır. Sargı son indüktansının hesaplanmasında çift katmanlı sargı yapısı için Denklem 3.46 kullanılabilir.

$$L_{end} = 4 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{tf}}{p} L_{1e} \cdot \lambda_{end} \quad (3.46)$$

$L_{1e}$  : Toplam sargı son uzunluğu

$\lambda_{end}$  : Sargı sonu için sızıntı geçirgenliği

### 3.14.3. Mıknatıslanma İndüktansının Hesaplanması

Mıknatıslanma indüktansının hesaplanması için Denklem 3.47 kullanılır.

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{p} \cdot (N_{oluk} \cdot k_w)^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot A_p}{g'} \quad (3.47)$$

$k_w$  : Sargı faktörü

$A_p$  : Kutup kesit alanı

$g'$  : Hava aralığı uzunluğu

Sonuç olarak toplam d-q indüktansları Denklem 3.48 ve 3.49 ile ifade edilir.

d- eksen indüktansının hesaplanması;

$$L_d = L_{oluk} + L_{son} + L_{md} \quad (3.48)$$

$L_{oluk}$  : Oluk indüktansı

$L_{end}$  : Sargı son indüktansı

$L_{md}$  : Mıknatıslanma indüktansı (d-ekseni için)

q- eksen indüktansının hesaplanması ;

$$L_q = L_{oluk} + L_{son} + L_{mq} \quad (3.49)$$

$L_{oluk}$  : Oluk indüktansı

$L_{end}$  : Sargı son indüktansı

$L_{md}$  : Mıknatıslanma indüktansı (q-ekseni için)

### 3.15. Elektromanyetik Moment Hesabı

Moment hesabı için milden alınan güç denkleminde faydalanılır. Denklem 3.50 çıkış gücü denklemini ifade etmektedir.

$$P_{em} = 3 \cdot E_0 \cdot I \quad (3.50)$$

Ayrıca çıkıştan alınan güç, moment ve mil hızının (rad/s) çarpımına eşittir. Böylece Denklem 3.51’ deki ifade elde edilir.

$$T_e = \frac{3.E_0.I}{\omega_m} \quad (3.51)$$

Denklem 3.52’ deki ifade, vektör kontrolü elektriksel eşdeğer devresi için geçerlidir, burada sadece q-ekseni aktiftir. Moment denklemi açık olarak yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$T_e = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{P}{2} \cdot N_{gf} \cdot \overline{B_g} \cdot A_p \cdot k_w \cdot k_{st} \cdot I_q \quad (3.52)$$

#### 4.OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Optimizasyon bir problemin en iyi çözümünü veya tasarımını bulmak işlemi olarak tanımlanır. Mühendisler; tasarımda, imalatda veya bakım çalışmalarının aşamalarında kararlar almak zorundadırlar. Bütün bu kararların nihai amacı gerekli çaba, sermaye, malzeme veya teknolojinin minimumda tutulması veya kârı maksimum yapmaktır. Dolayısıyla optimizasyon hedeflenen amacı maksimum veya minimum yapacak şartları bulma işlemi olarak tanımlanır.

Günümüzün gerçek dünyasında sorunlar genellikle karmaşık ve büyüktür. Bu nedenle, uygun bir zamanda ve maliyette kesin yöntemlerle çözülemezler [14]. Bir optimizasyon problemini çözmek için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler miktar olarak çok hızlı büyür ve aynı zamanda çözüm yaklaşımları vardır. Bu yöntemlerin bir kısmı sezgi üstü (metaheuristics) olarak adlandırılan doğal süreçlerden esinlenir. Biçimsel mantık veya matematiksel programlamaya dayalı geleneksel yöntemlere göre hazırlanır, bu sezgi üstü (metaheuristics) algoritmalar genellikle daha güçlüdür [15]. Son kırk yılda yetmişden fazla sezgi üstü algoritma yöntemi geliştirilmiştir. Bunların birçoğu, küresel popülasyona ulaşabilmek için bazı iterasyonlarda çözüm popülasyonunu gerçekleştiren evrimsel algoritmalar. Özellikle kuş ve balıklarda doğal organizmalar, sosyal davranışlar, beslenme ve çiftleşme davranışları, sezgi üstü fikirlerinin ana kaynağıdır [16].

Sürü zekasında en çok bilinen örnek parçacık sürüsü optimizasyonudur (PSO) [17]. Algoritma, parçacık simülasyonu kolektif davranışına (veya hayvanlara) dayanır ve ayrıca kuş akınının veya balık okulunun sosyal davranışından ilham alır.

PSO algoritması, GA ve diğer evrimsel algoritmalarla kıyaslandığında bir takım çekici özelliklere sahip olduğu görülür. Bir yandan, ayarlanacak çok az parametreye sahip olması yönüyle, parametrelerin optimum değerlerinin sağlanması için gereken hesaplama sayısı ve zaman yönünden tasarruf sağlarken, diğer yandan da çok hızlı bir şekilde optimum noktaya yaklaşabilmektedir. Çünkü bir adımda sadece iki hesaplama yapılmaktadır. Bu avantajlara rağmen, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde yerel en iyi noktalarda kalması da mümkündür [18].

Verilen şartlar altında en iyi sonucun elde edilme işi olan optimizasyon için çok çeşitli algoritmalar mevcuttur. Optimizasyon alanındaki en önemli gelişmeler 18. yüzyılda Newton ve Lagrange tarafından yapılmıştır [19].

#### 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Başlangıçta PSO algoritması arama uzayı içinden aday çözümleri rastgele seçer. Amaç fonksiyonunun ne olduğunu ve hangi aday çözümün küresel veya yerel en iyi değerlere yakın ya da uzak olduğunu bilmez. Sadece amaç fonksiyonunu aday çözümleri değerlendirmek için kullanır ve edinilen uygunluk değerine göre işlem yapar.

Her parçacığın bir konumu ve bir hızı mevcuttur. Uygunluk değerlendirmesinde konumu gBest (global en iyi) değerine uzak olan parçacığın hızı yakın olanlara göre daha fazladır. Zira uzaktaki parçacığın daha kısa sürede en uygun değere ulaşması gerekmektedir.

Her bir parçacık kendi konumunu ( $x$ ), uygunluk değerini ve hızını ( $v$ ) muhafaza etmektedir. Buna ek olarak optimizasyon süreci içinde şimdiye kadarki elde ettiği en iyi değeri (pBest) ve tüm parçacıklar arasında en iyi değeri (gBest) hafızasında tutar. Genellikle arama adımları ilerledikçe pBest ve gBest değerleri de değişir. Bir noktadan sonra artık değişmediği gözleniyorsa optimum noktalardan bir tanesine ulaşılmış demektir. Ancak bu fonksiyondaki yerel veya global minimum noktaya ulaşıldığı anlamına gelmez.

Her adım sonrasında, diğer parçacıkların hız vektörleri, gBest değerine sahip parçacığın bulunduğu noktaya doğru hareket edecek şekilde güncellenir. Parçacıklar birbirlerine yaklaştıkça hareket alanları da daralır. Bu sayede, her adımda arama uzayı bir bakıma küçülmüş olur. Bunun avantajı, optimum noktanın çok kısa sürede bulunmasıdır. Ancak arama uzayı içinde global minimuma, hem konum hem de değer olarak, çok yakın lokal minimumlar olabilir. Diğer taraftan, gBest değerine sahip parçacık, böyle bir lokal minimum noktayı bulmuş olabilir. Geçerli gBest noktasına doğru hareket eden parçacıklar, sonraki adımlarda, arama kapsamı daralacağı için, arama uzayının dışında kalmış olan global minimum noktasını hiç bulamayabilirler. Bu da bir dezavantaj olarak görülebilir. Bunun önüne geçmek için literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

PSO algoritması durdurma şartı sağlanana kadar tekrar eden üç ana adımdan oluşur:

1. Her bir parçacığın uygunluk değerlendirmesi yapılır.

2. pBest ve gBest uygunluk değerleri güncellenir.

3. Her bir parçacığın hız ve konumları güncellenir.

Uygunluk değerlendirmesi, amaç fonksiyonuna aday çözümün uygulanması ile yürütülür. nceki uygunluk değeri ile şimdiki gBest ve pBest değerleri kıyas edilerek değerlendirme yapılır. Yeni değerler önceki adıma göre daha iyi ise güncellenir, değilse herhangi bir işlem yapılmaz.

PSO algoritmasındaki mantığa göre, popülasyon içindeki bir parçacığın hızı, gBest değerine sahip paracığla aralarındaki mesafe ile doğru orantılıdır. Böylece paracığ, optimum noktaya çok daha çabuk yaklaşabilmektedir.

Optimizasyon uygulamasında, minimum noktaya en yakın olan paracığ gBest olarak belirlenir. Bir sonraki adımda her bir parçacığın yeni konumunun belirlenmesinde kullanılan hız vektörleri hesaplanırken gBest olarak belirlenmiş parçacığın konumu dikkate alınır. Bu şekilde her adımda hem gBest, minimum noktaya, diğer paracığlar da gBest değerine sahip parçacığa doğru yaklaşırlar.

Bir sistemi optimize etmek için gereken parametre değerlerini aramak, kuşların yerini bilmediği yiyecekleri aramalarına benzer. Hangi parametrenin hangi değere ayarlanacağı belirsizdir. Kuşlardan birisi yiyecek bulduğu zaman, sürüdeki diğer kuşlara da haber verir. Diğer kuşlar da yiyeceğe en yakın olan kuşa doğru uçmaya başlar. Buradaki her bir kuş olası bir çözüm olarak düşünülebilir. Her bir aday çözümün pozisyonu uygunluk değerlendirmesine alınır. Yiyeceğe en yakın kuş gBest olarak işaretlenir.

PSO algoritması, doğrusal olmayan problemleri optimize etmek için kullanılır. Başlangıç durumunda optimum noktanın çok uzağında olunduğu ya da optimum nokta ile ilgili hiçbir fikrin olmadığı anlarda çok kullanılışlıdır. Çok parametreye sahip (ok boyutlu) optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar vermiştir.

PSO algoritması, GA gibi evrimsel hesaplama yöntemlerine benzerlik gösterir. Algoritma öncelikle paracığları arama uzayında rastgele noktalara yerleştirir. Her adımda (jenerasyonda) konumlar güncellenerek optimum noktaya doğru bir hareket başlar. PSO algoritmasında paracığ olarak adlandırılan aday çözümler o andaki gBest parçacığı sonraki adımlarda takip ederler. Ayarlanacak parametre sayısı az olduğu için PSO algoritmasının uygulaması çok esnek ve kolaydır.

PSO algoritması, birkaç aday çözümün arama uzayında eş zamanlı olarak denenmesiyle çalışan, ayrık zamanlı bir algoritmadır. Algoritmanın her adımında, her bir aday çözüm optimize edilecek amaç fonksiyonu tarafından değerlendirmeye alınır. Her bir aday çözüm, amaç fonksiyonunun minimum değerini bulmak için çözüm uzayında dolaşan bir parçacık olarak düşünülebilir [20].

Başlangıçta bütün parçacıkların hızları belirli bir değere ayarlanabilir. Temelde PSO algoritmasının hız vektörü Denklem 4.1'e ve yeni konum Denklem 4.2' ye göre güncellenir.

$$V_i^{(k+1)} = V_i^k + r_{1i}p_i - x_i^k + r_{2i}(G_i - x_i^k) \quad (4.1)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^k + V_i^k \quad (4.2)$$

Burada,

$i$  : Parçacık numarası,

$k$  : İterasyon numarası

$v$  : Parçacığın hızı

$x$  : Parçacığın konumu

$r_1$  : 0 ile 1 arasında rastgele ondalıklı bir sayı

$r_2$  : 0 ile 1 arasında rastgele ondalıklı bir sayı

$p$  : Parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi uygunluk değerini döndüren parçacık (pBest)

$G$  : Tüm popülasyon içinde o ana kadar elde edilen en iyi uygunluk değerini döndüren parçacık (gBest) anlamına gelir.

Başlangıç popülasyon matrisine göre ;

1. Parçacık  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]_{1 \times D}$  = lokal en iyi birey

$p_{besti} = [p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestiD}]_{1 \times D}$  ve global en iyi birey  $g_{besti} = [g_{besti1}, g_{besti2}, \dots, g_{bestiD}]_{1 \times D}$  olur. Ayrıca her bir parçacığın kontrolünü sağlayan hız vektörü ise  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]_{1 \times D}$ 'dir.

2. Her bir iterasyonda parçacıkların hız ve konum vektörleri Denklem 4.3 ve 4.4' e göre bulunur.

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c_1 \text{rand}_1^k (p_{best\ i}^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}_2^k (g_{best}^k - x_i^k) \quad (4.3)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (4.4)$$

3. Sonlandırma kriteri sonrasında bulunan global optimum değer sonuç olarak alınır

Optimizasyon sürecinde uygunluk değerlendirmesi ANSYS Maxwell programı tarafından gerçekleştirilmiştir. Program verilen tasarım parametrelerinin değerleriyle motor tasarımını gerçekleştirmekte ve amaca göre, moment, moment dalgalanması , manyetik alan dağılımı ve çizgileri gibi parametrelerini hesaplamak için simülasyon işlemini gerçekleştirmektedir. Elde edilen sonuç değerleri MATLAB programı tarafından geri okunarak uygunluk değerlendirmesine tabi tutulmuştur.

PSO algoritmasının motor tasarım optimizasyonuna uygun şekle getirildikten sonra motor tasarım optimizasyonuna geçilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum motor tasarımları elde edilmiştir. Matlab Programı yardımıyla gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda motor geometrisi ANSYS Maxwell ile analiz edilerek manyetik sonuçlar değerlendirilmiştir.

Manyetik analizin ardından ANSYS Fluent yazılımı ile ısı analiz gerçekleştirilerek, sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### 4.1.2. Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Optimizasyon işlemi motorun sargı yapısına uygulanmıştır. Motor alışlagelmiş kutup yapısından farklı tasarlanması sebebiyle en iyi sonucu elde etmek için sargı yapısının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta  $0,35 \text{ mm}^2$  bakır tel ile sarılan stator yapısı, yapılan optimizasyon çalışması neticesinde  $0,37 \text{ mm}^2$  olarak değiştirilmiştir.

Motor verimi ve motorun ısı durumu optimizasyonda çıkış parametresi olarak kullanılmıştır. Motor sargısının tel çapı ise giriş parametresi olarak değerlendirilmiştir. Motor üretiminde yapılan testlerde  $0.37 \text{ mm}^2$  tel çapı ile sarılan SMSM'nin çalışma

şartlarının daha düzgün olduğu saptanmıştır. Motorun ısınma problemi giderilerek nominal akımında çalışma durumu sağlanmıştır.

0.37 mm<sup>2</sup> tel çapı özel üretim bakır tel grubuna girmektedir. Motor test aşamasında bakır teller tedarik edilerek motor sargıları yapılmış ve test aşamalarına geçilmiştir. Motorun sargılarının sarılmasının ardından motor yapısı Şekil 4.1' deki gibi olmuştur.



**Şekil 4.1.** Motor Bobinlerinin Sarılması

Bir motorda hesaplanması gereken kayıp güçler; sargılarda bakır kaybı olarak, stator ve rotor saclarında demir kaybı olarak ve mekanik olarak milde (Sürtünme ve Rüzgar) oluşmaktadır. Bu kayıpların azalması motorun daha yüksek verime sahip olması anlamına gelmektedir. Toplam kayıp güç motorun tasarım parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Önceden üretimi yapılmış motorların belli parametrelerinin değiştirilmesi ve iyileştirilmesi motorun çalışma performansını arttırmayı sağlamaktadır.

SMSM' ye ait bütün tasarım denklemleri optimizasyon için MATLAB kodlarına eklenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Tek bir fazda, stator bobinlerinde oluşan kaybın hesaplanması;

$$R = \delta \cdot \frac{L}{A} = 5.44 \, \Omega$$

$$L = 34 \, \text{m (tel uzunluğu)}$$

$$A = 1.075 \cdot 10^{-7} \, \text{m}^2 \, (\text{sargı kesit alanı})$$

$$\delta = 1.72 \cdot 10^{-8} \, \Omega \cdot \text{m (bakır özgül direnci)}$$

Toplam stator bobinlerinde oluşan kayıp;

$$\begin{aligned} P_{scu} &= 3 \cdot I^2 \cdot R \\ &= 3.0.55^2 \cdot 5.44 \\ &= 4,9368 \text{W} \end{aligned}$$

Rotor ve stator nüvesinde oluşan güç kaybının hesaplanması;

$$P_{core} = K_h \cdot B_{\max}^2 \cdot f + K_c (B_{\max}^2)^2 + K_e (B_{\max} \cdot f)^{1.5}$$

sacın sabit değerleri;

$K_h$  ve  $K_e$  ve  $K_c$

$f$  : Frekans

$B_{\max}$  : Maksimum akı yoğunluğu

Mekaniksel güç kaybının hesaplanması:

1-Sürtünme kaybının hesaplanması;

$$P_{fr} = k_{fr} \cdot M_{ro} \cdot n \cdot 10^{-3} \, \text{W}$$

2-Rüzgar kaybının hesaplanması

$$P_{wind} = 2 \cdot D_{ro}^3 \cdot L_{sta} \cdot n \cdot 10^{-6} \, \text{W}$$

$k_{fr}$  : sürtünme katsayısı (1-3)

$M_{ro}$  : Rotorun ağırlığı

$n$  : hız (rpm)

$L_{sta}$  : motor paket uzunluğu

Yukarıda belirtilen güç kayıpların azaltılması ile motorun çalışma performansının artırılması mümkündür.

Bu optimizasyon çalışmasında üretimi gerçekleştirilmiş bir motor kullanılmıştır. Bu nedenle ısınma probleminin ortadan kaldırılması için optimizasyon yapılabilecek parametreler kısıtlıdır. Motor üretim aşamasının ardından değiştirilebilecek

parametrelerden birisi sargı yapısı; dolayısıyla bakır tele ait özellikler olacaktır. Sınır şartları belirlenerek optimum çalışma şartlarını sağlayabilecek sargı özellikleri elde edilmiştir. Burada sargı telinin çapı optimizasyona tabi tutulmuştur ancak oluk doluluk oranı için bakır telin kesiti; kayıpların artmaması için bakır telin direnci; manyetik saçaklanmayı engellemek adına bakır telin uzunluğu için sınır şartları belirlenmiştir. Ayrıca üretim süreci tamamlanmış bir motorun, revize edilebilirliği için en önemli kriter olan motorun işçiliği de göz önünde bulundurulmuştur.

Motor sargısının optimizasyonunun ardından 0.37 mm<sup>2</sup> tel çapı ile sarılan motor test edilerek sonuçlar doğrulanmıştır. Aşağıda belirtildiği gibi motora ait sargının optimizasyonu yapıldıktan sonra ölçülen bakır kayıplarının 4,9368 W' tan 2,4945 W' a düştüğü görülmektedir.

$$I = 0.45 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{scu} &= 3 \cdot I^2 \cdot R \\ &= 3.0,45^2 \cdot 4.1062 \\ &= 2,4945 \text{ W} \end{aligned}$$

Bu da motorun ısınma sorununun azaldığını belirtir. Burada 0,45 A ampermetre ile ölçülen akım değeridir.

Sürücüden Motora Giriş Gerilimi = 275 V AC

Sürücü Giriş Gerilimi = 300 V DC

**Tablo 4.1.** Motorun Test Verileri

| No | Hız<br>(rpm) | Akım (Yüksüz) A | Akım (Yükte) A | Akım (Max.) A | Frenleme Akımı (A) |
|----|--------------|-----------------|----------------|---------------|--------------------|
| 1  | 7000         | 0.16            | 0.55           | 2.07          | 1.98               |
| 2  | 6998         | 0.08            | 0.45           | 2.03          | 1.75               |

Motor test verilerine göre maksimum hızda çalışırken, beklenen akım değerleri görülmüştür. Ölçüm aletleri ile gerçekleştirilen test verileri Tablo 4.1' de gösterilmiştir. Motor yüksek akım çekmemiş, dolayısıyla ısınma problemi yaşanmamıştır.

## 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Elektrik makinalarının tasarımında kullanılan temel metotlardan birisi sonlu elemanlar yöntemidir. Çünkü tasarım denklemleri kısmi diferansiyeller içermektedir. Maxwell denklemlerinin çözümünde sınır şartlarının tanımlanması bu diferansiyel denklemler ile belirlenir, dolayısıyla denklemlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

1. Elektrik alan için “Gauss Yasası”,  $\nabla \cdot D = \rho$
2. Manyetik alan için “Gauss Yasası”,  $\nabla \cdot B = 0$
3. Faraday’ın “İndüksiyon Yasası”,  $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
4. “Ampere Yasası”,  $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$

Ansys Maxwell sonlu elemanlar yöntemini kullanarak motor analizlerini gerçekleştiren profesyonel bir paket programıdır. Motor tasarımının analitik olarak hesaplanmasının ardından modelleme ANSYS Maxwell programı ile yapılmıştır.

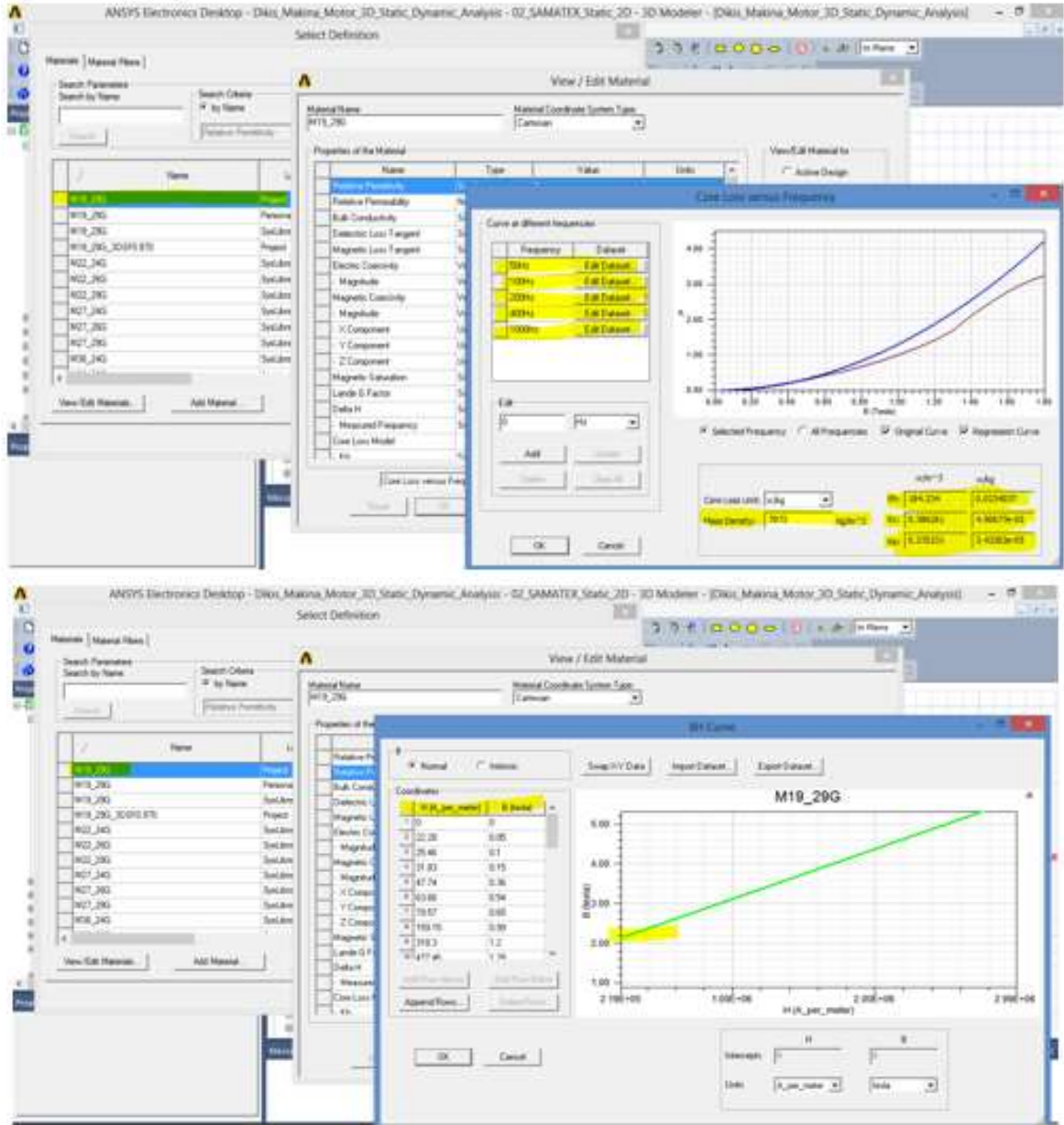
### 5.1. Ansys Maxwell Analiz Sonuçları

Tasarımı gerçekleştirilen motora ait bazı parametreler aşağıda verilmiştir.

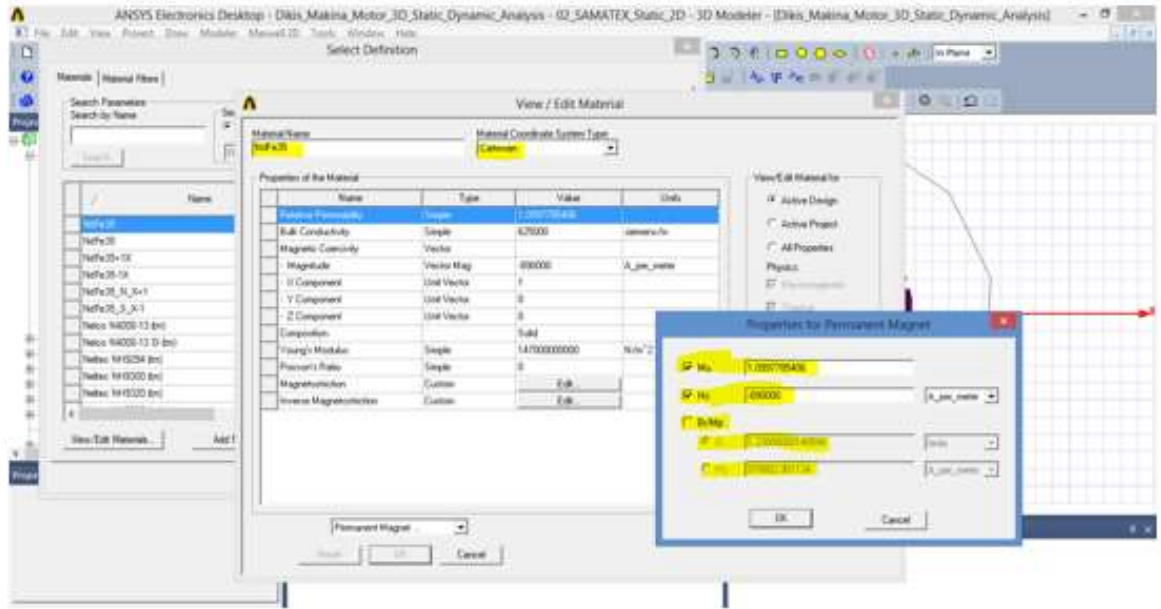
|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| Frenleme Akımı   | : 1,75 A                 |
| Akım (yükte)     | : 2,03 A                 |
| Akım (yüksüz)    | : 0,08 A                 |
| Güç              | : 1,18 kW                |
| f (frekans)      | : 100-120 Hz             |
| n (devir sayısı) | : 7000 rpm               |
| n (devir sayısı) | : 2000 rpm (200-275)V AC |
| Gerilim          | : 300 V AC               |



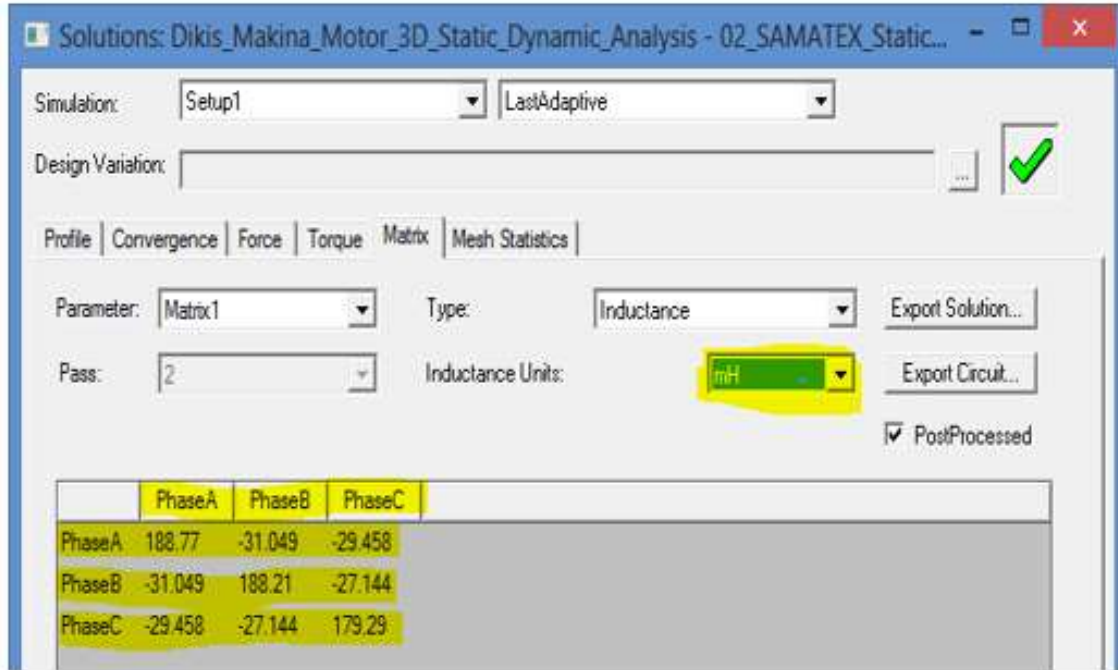
kritiktir. Bu tez çalışmasında kullanılan motora ait malzeme seçimleri Şekil 5.2’ deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5.2. Motor stator ve rotor sacında kullanılan M19\_29G malzeme özelliklerinin tanıtımı



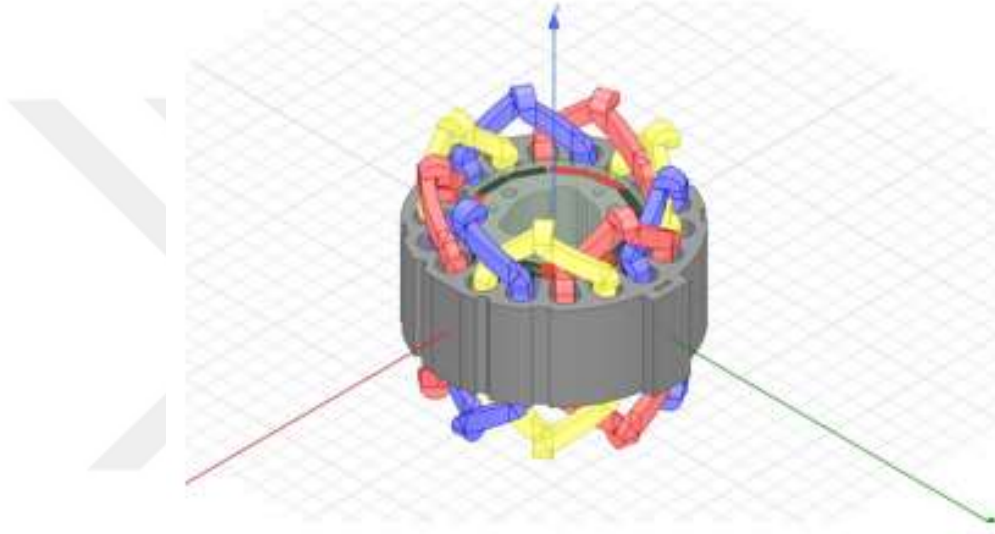
Şekil 5.3. Motor Rotorunda Kullanılan NdFe35 Mıknatıs Malzeme Özelliklerinin Tanıtılması



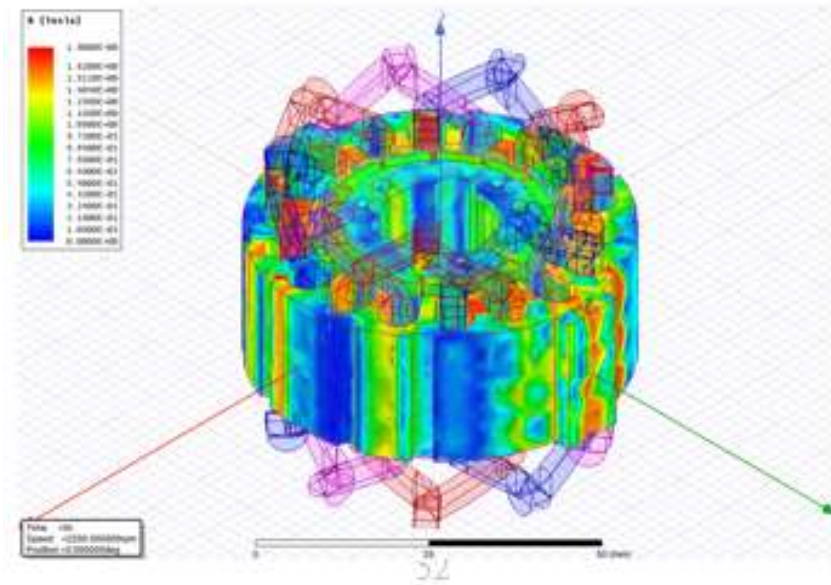
Şekil 5.4. Sargılar arasında faz oluşturulması

Şekil 5.3 ile NdFeB mıknatısın özellikleri tanıtılmış ve Şekil 5.4 ile sargılar arasında faz oluşturulmuştur.

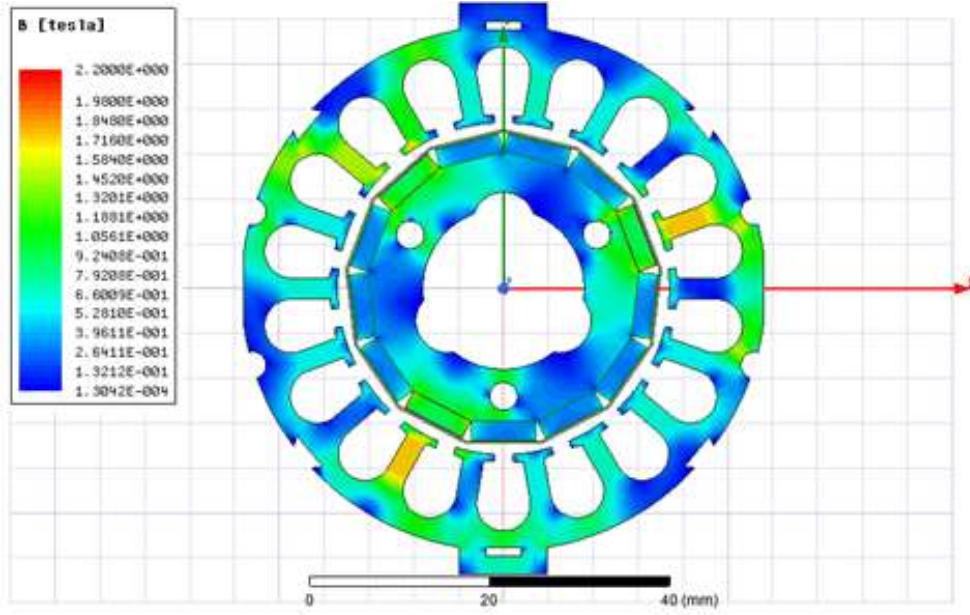
Tasarımı tamamlanan SMSM' nin sonlu elemanlar analizi ANSYS MAXWELL paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta 3 boyutlu analizi yapılan motorun, 2 boyutlu analizleri de gerçekleştirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Motorun 3 boyutlu analiz sonuçları Şekil 5.6' daki gibidir. Manyetik alan dağılımı beklenildiği gibidir. Manyetik alan yoğunluğu motor yüklendikçe artmaktadır ve tam yükte analiz edildiğinden motor sacında kısmen doyma görülebilmektedir. Şekil 5.5 ise motorun 3D modelini temsil etmektedir.



Şekil 5.5. Maxwell 3D Motor Modeli

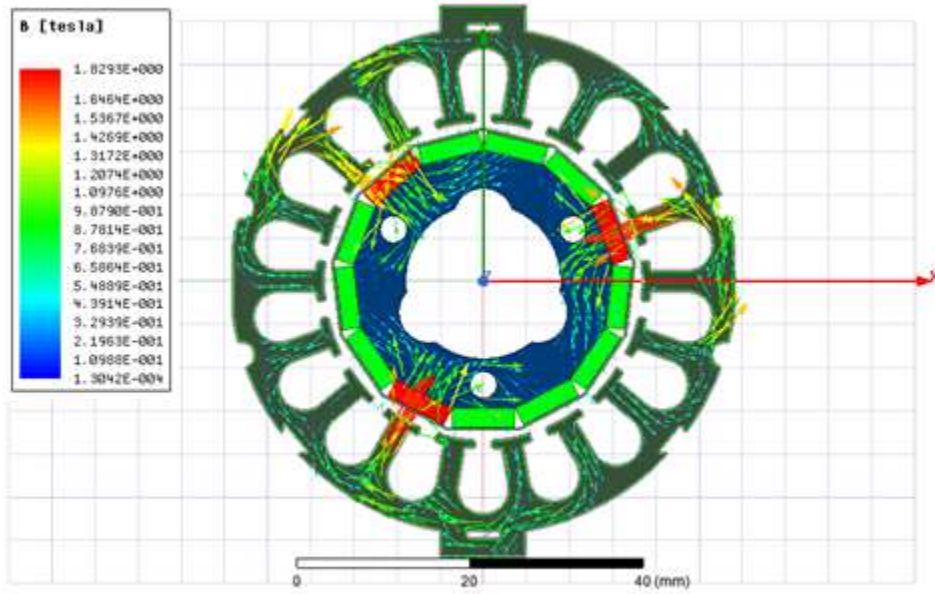


Şekil 5.6. Motor manyetik alan yoğunluğunun gösterimi

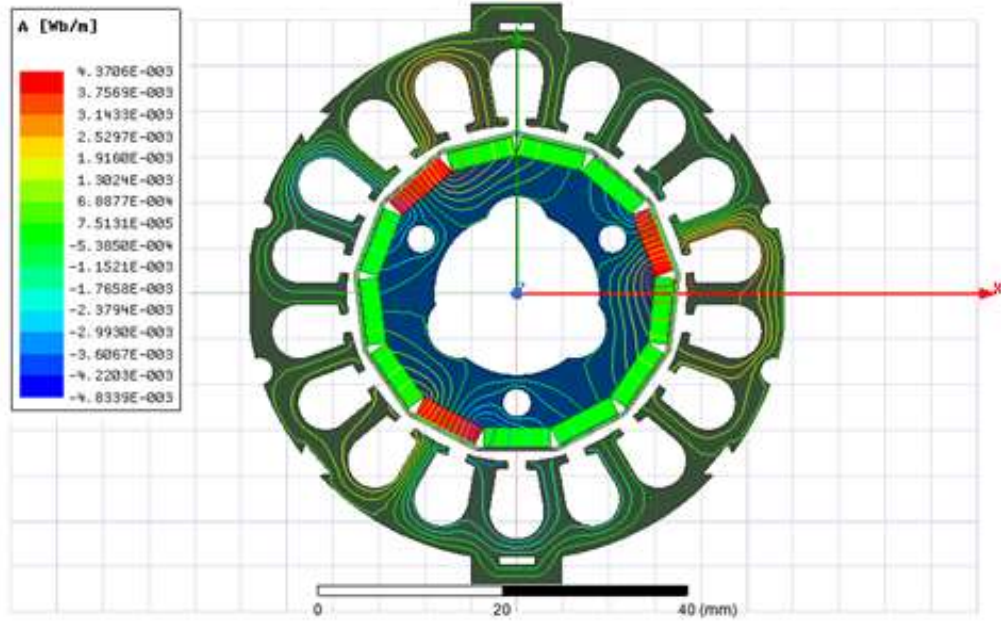


**Şekil 5.7.** Motor manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.7 motorun manyetik alan dağılımı göstermektedir. Akı yoğunluğu maksimum 2.2 T olarak görülmüştür. Şekil 5.8’ de ise mıknatıs yönlerinin gösterimi ifade edilmiştir.

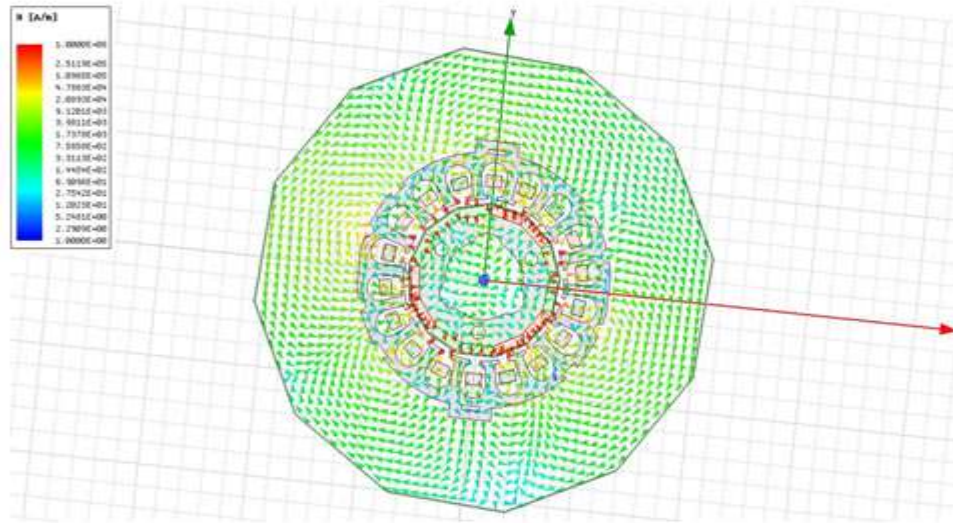


**Şekil 5.8.** Mıknatıs yönlerinin belirlenmesi



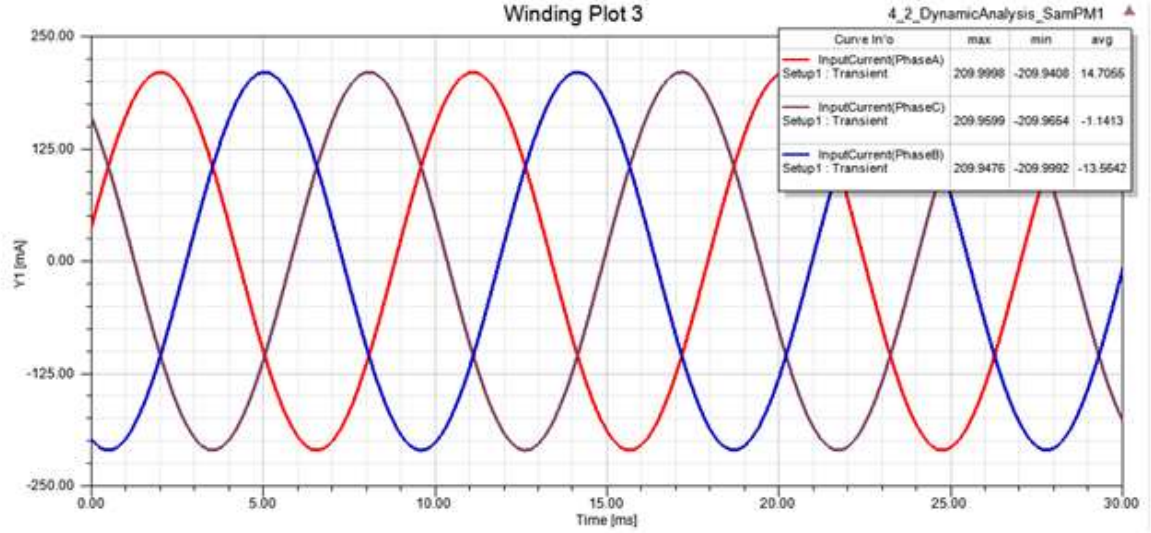
Şekil 5.9. Manyetik akı çizgilerinin dağılımı

Şekil 5.9 manyetik akı çizgilerinin dağılımını göstermektedir. Akı çizgileri dağılımı beklenildiği gibi düzgündür. Şekil 5.10 ise motora ait H vektör çizgilerini ifade etmektedir.

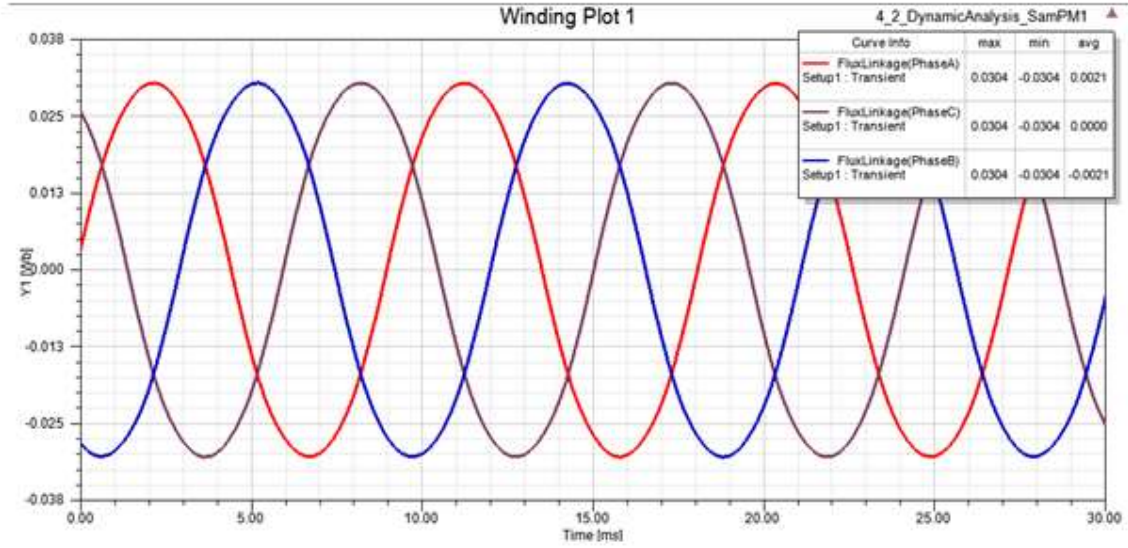


Şekil 5.10. Motora ait H vektör çizgilerinin dağılımı

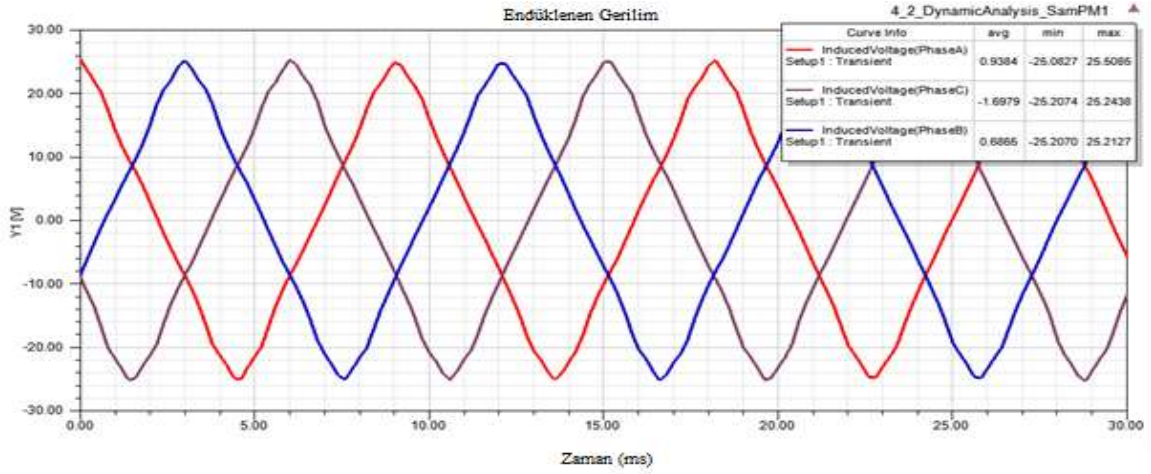
Motor yüksüz durumda yani boşa çalışırken 0,16 Amper akım çekmektedir. Bu koşullar altında elde edilen sonuçlar Şekil 5.11 ve 5.12’ deki gibidir;



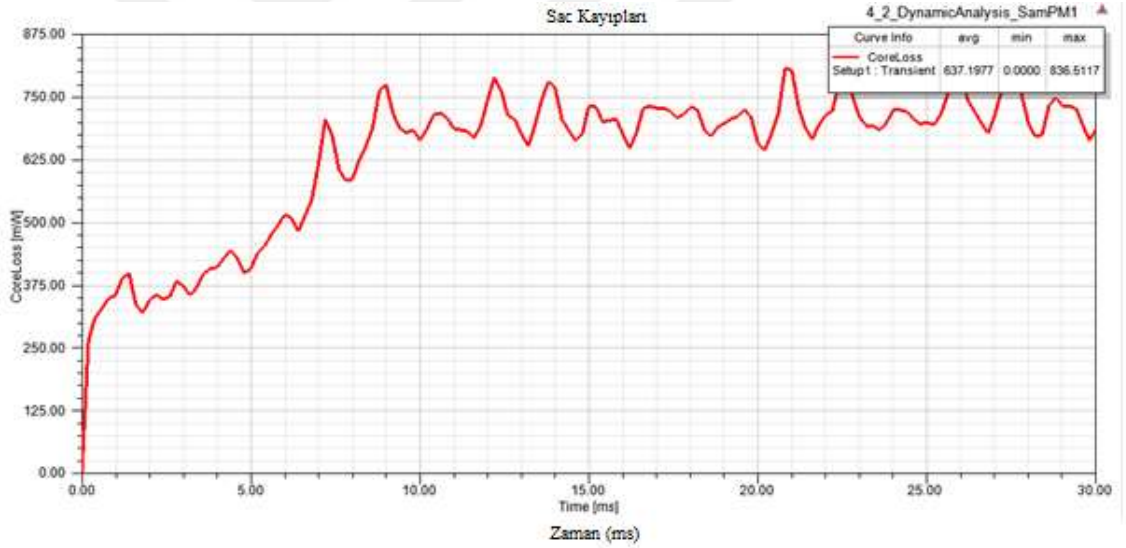
Şekil 5.11. Motora ait 3 faz akım grafiği



Şekil 5.12. Motora ait 3 faz akı bağlantı grafiği

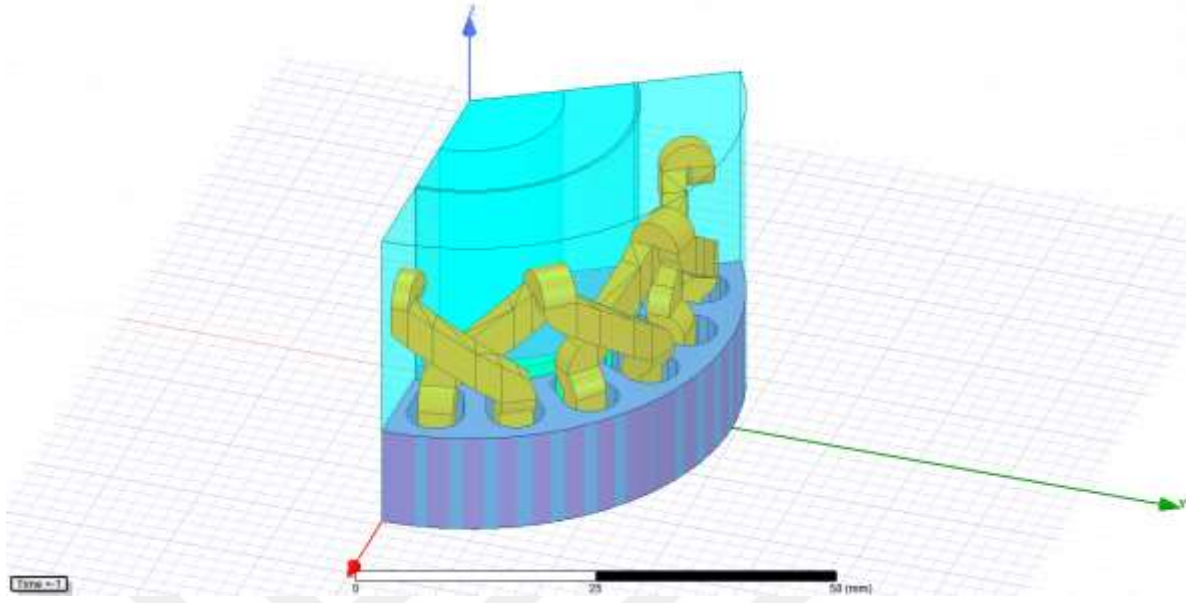


**Şekil 5.13. 3 Faz endüklene gerilim grafiği**



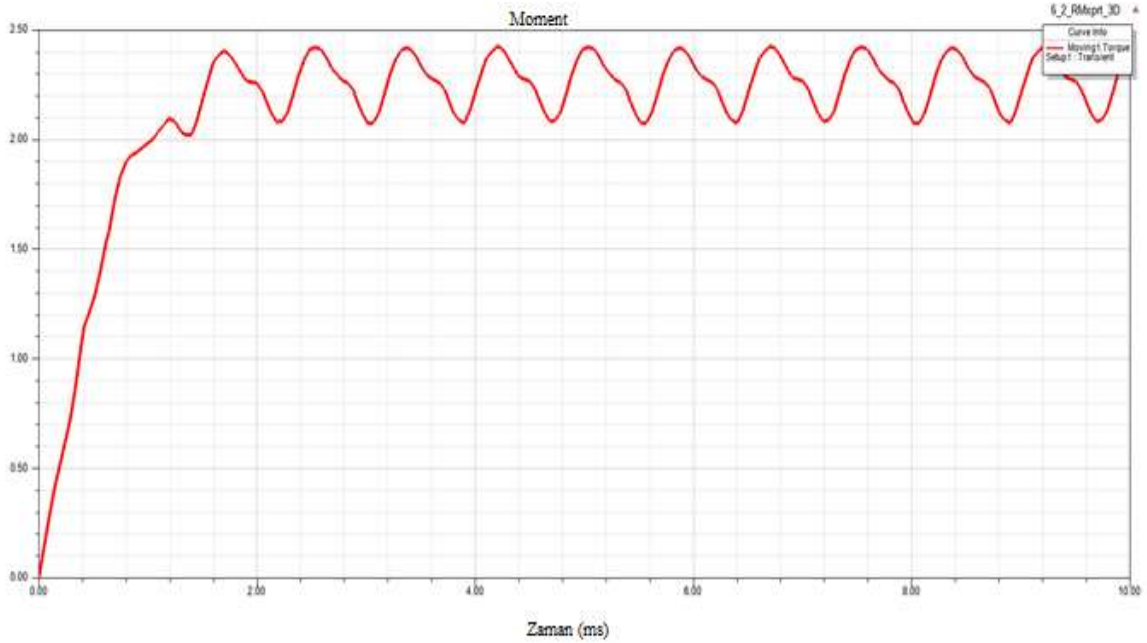
**Şekil 5.14. Stator ve rotora ait sac kayıp değerleri**

Motor analiz sonuçları mevcut girdiler ve beklenen sonuçlar ile uyumludur. Şekil 5.13’ de endüklene faz gerilimleri ve Şekil 5.14’ de ise motorun stator ve rotorundaki sac kayıp değerleri gösterilmektedir. Elektromanyetik analizler sonucunda kayıp ve ısı enerjisine dönüşen enerji değerleri ANSYS Fluent yazılımına girdi olarak aktarabilmektedir.

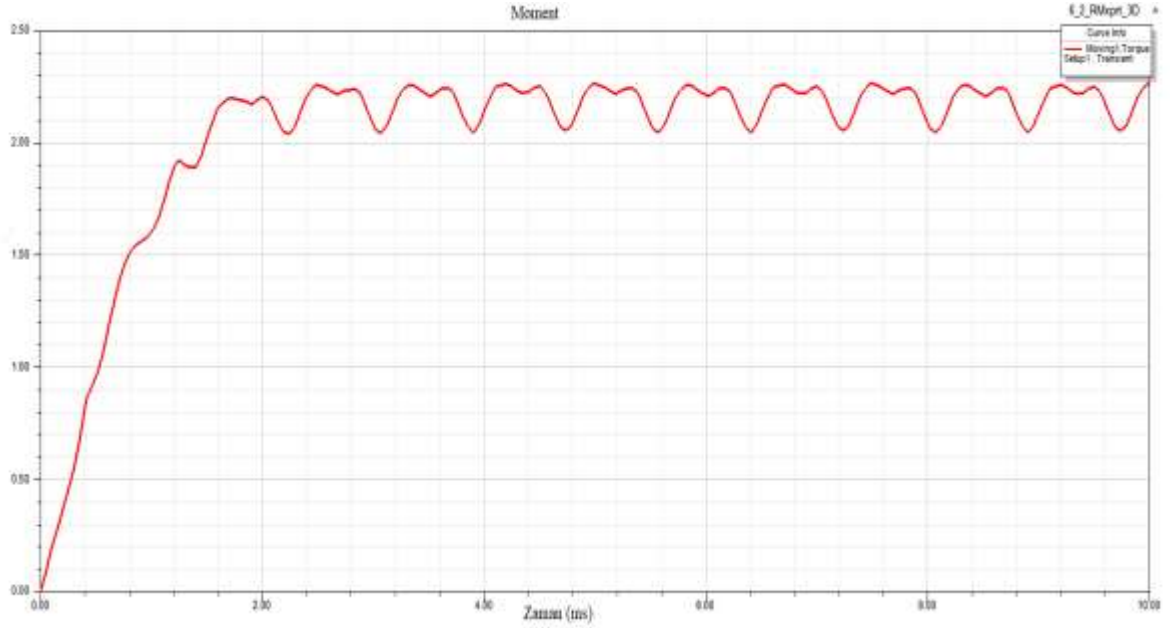


**Şekil 5.15.** SSM' nin RMxprt Modeli

Şekil 5.15' de motorun RMxprt modeli oluşturularak PSO' dan önceki ve sonraki analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.16' daki moment eğrisi motorun optimizasyon çalışmaları yapılmadan tamamlanan analiz sonucunu ifade etmektedir.



**Şekil 5.16.** SSM'nin optimizasyondan önceki moment eğrisi



**Şekil 5.17.** SMSM'nin optimizasyondan sonraki moment eğrisi

Şekil 5.17 SMSM' nin optimizasyondan sonraki moment dalgalanmasını ifade etmektedir. SMSM' nin sargısına parçacık sürü optimizasyon yöntemi uygulanmadan önce moment dalgalanması yüksek olduğu, optimizasyon işlemi ile birlikte yeni sargının yapılmasının ardından moment dalgalanmasında azalma olduğu görülmüştür. Böylece optimizasyonun temel amaçlarından biri olan performans iyileştirme süreci tamamlanmıştır. ANSYS Maxwell analiz sonuçları da bunu desteklemektedir.

Şekil 5.16' daki moment eğrisi  $0,35 \text{ mm}^2$  bakır tel ile sarılan SMSM' ye aittir. Motorun performansı değerlendirilirse, moment dalgalanmasının oldukça yüksek olduğu anlaşılabılır. Motorun momentindeki bu dalgalanma çalışma sırasında gürültüye ve sarsıntıya sebep olabilir.

Şekil 5.17' deki moment eğrisi ise  $0,37 \text{ mm}^2$  bakır tel ile sarılan SMSM' ye aittir. Motorun performans değerlendirilmesi sonucunda moment dalgalanmasının azaldığı görülebilir. Böylece motorun sarsıntısı ve gürültüsü azaltılmış olacaktır.

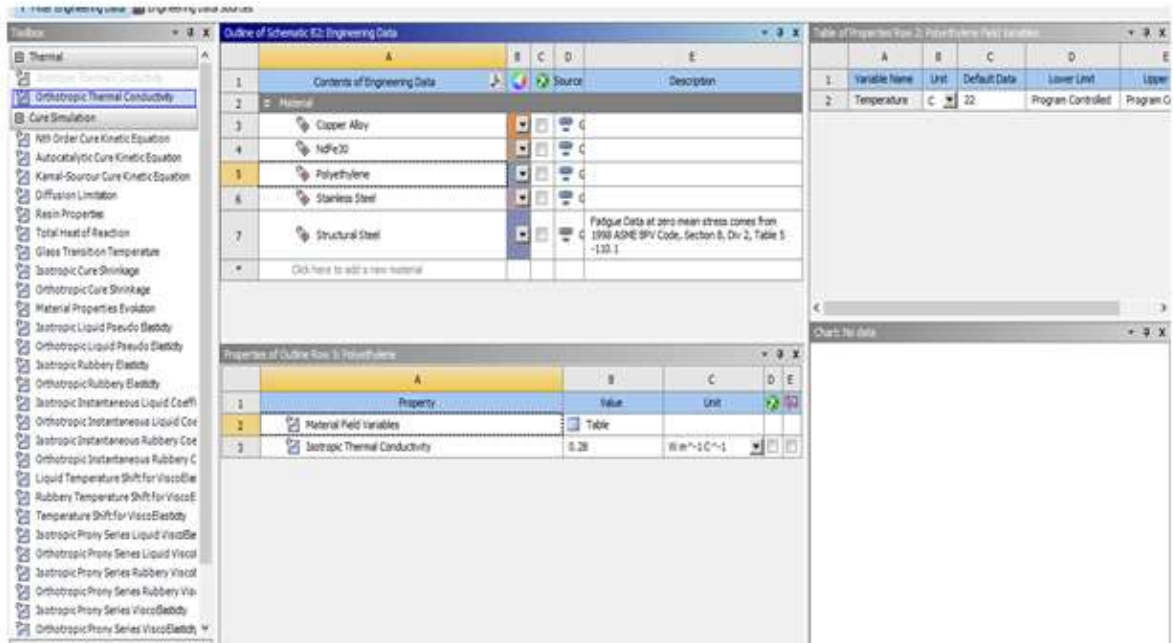
## 6. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORUN ANSYS FLUENT İLE ISIL ANALİZİ

Fluent yazılımı, endüstriyel uygulamalarda akış, türbülans, ısı transferi ve reaksiyonları modellemek için gereken geniş, fiziksel modelleme yapabilen bir programdır. Program yetenekleri uçak kanadı üzerindeki hava akışından fırında yanmaya, kabarcık kolonlarından petrol platformlarına, kan akışından yarı iletken imalatına ve temiz oda tasarımından atık su arıtma tesislerine kadar uzanır. Akıcı, silindir içi yanmayı, aero-akustiği, turbo makinesini ve çok fazlı sistemleri modelleme özelliğine sahip özel modeller de dahil olmak üzere geniş bir ürün yelpazesine sahiptir [21].

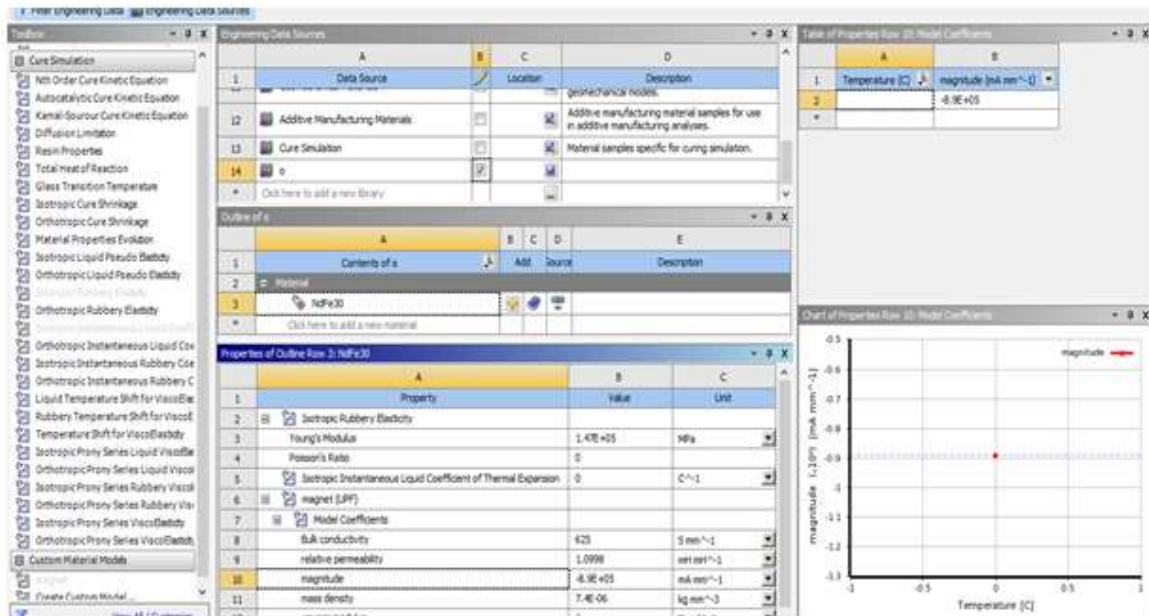
ANSYS Fluent ile akışkanların yanı sıra katı modellerin üzerinde de çalışmalar ve analizler yapılabilmektedir. ANSYS programı akış içeren tüm mühendislik alanlarında kullanılan gelişmiş akışkanlar dinamiği hesaplamaları yapabilen modüle sahiptir. Dünya üzerinde uçak, gemi ve otomobil gibi taşıtların hava ve su ortamında analizinin yapılması için kullanılan ANSYS Fluent, bir akışkan gibi hareket eden sayısal ağların oluşturulması ve analizlerinin yapılması ile kapsamlı bir akış simülasyonu yapılabilir. Fluent' in tüm bu özellikleri sebebiyle bu tez çalışmasında motor ısı analizlerinin bu yazılım ile gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bir SMSM' nin tasarım aşamalarında manyetik analizler kadar mekanik ve ısı analizler de oldukça önemli yer tutmaktadır. Çünkü gerçek hayatta bir motor üretilmeden önce tasarım işlemleri hem elektriksel, hem manyetik hem de mekanik olmak üzere tüm aşamaları ile tamamlanmalıdır.

ANSYS programı ile elektromanyetik simülasyonlar da yapılabilir. Elektrikle çalışan motor gibi elektrikli makinaların performansları, elektriğe bağlı olarak oluşan manyetik alanın görüntüsü, elektriksel ısınma analizleri, manyetik kuvvetlere bağlı oluşan etkilerin analizleri de ANSYS Fluent programı ile yapılır [22].

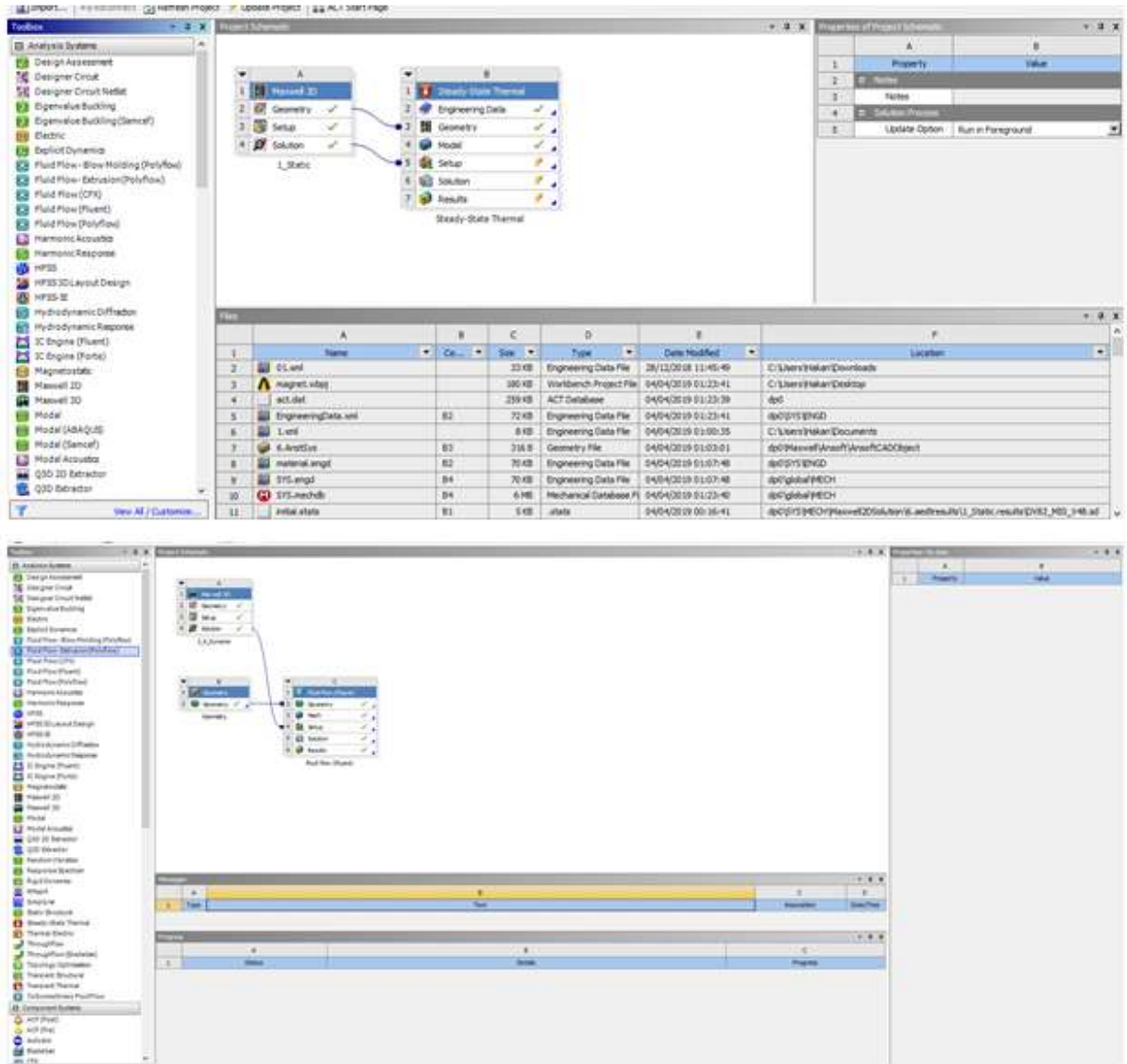
Özet olarak tüm bu durumların neticesinde SMSM' nin ısı analizlerinin ANSYS Fluent ile gerçekleştirilme süreci aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 6.1' de Fluent modülünde kullanılacak malzemelerin datasheet bilgileri girilmiş ve Şekil 6.2' de ise bu malzemeler programa tanıtılmıştır.



Şekil 6.1. Motor malzeme özelliklerinin girilmesi



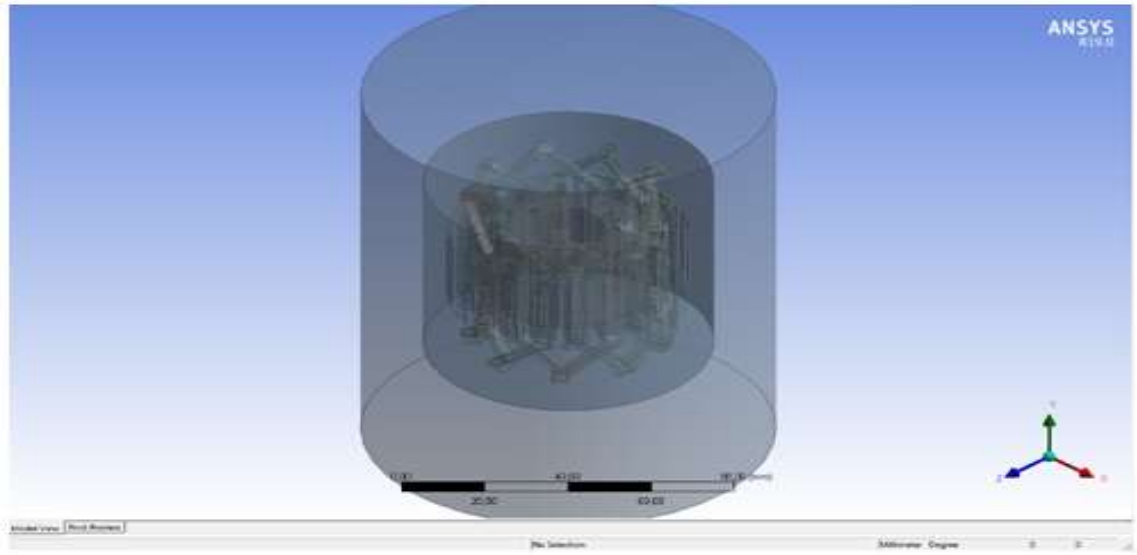
Şekil 6.2. Motor malzemelerinin atanması



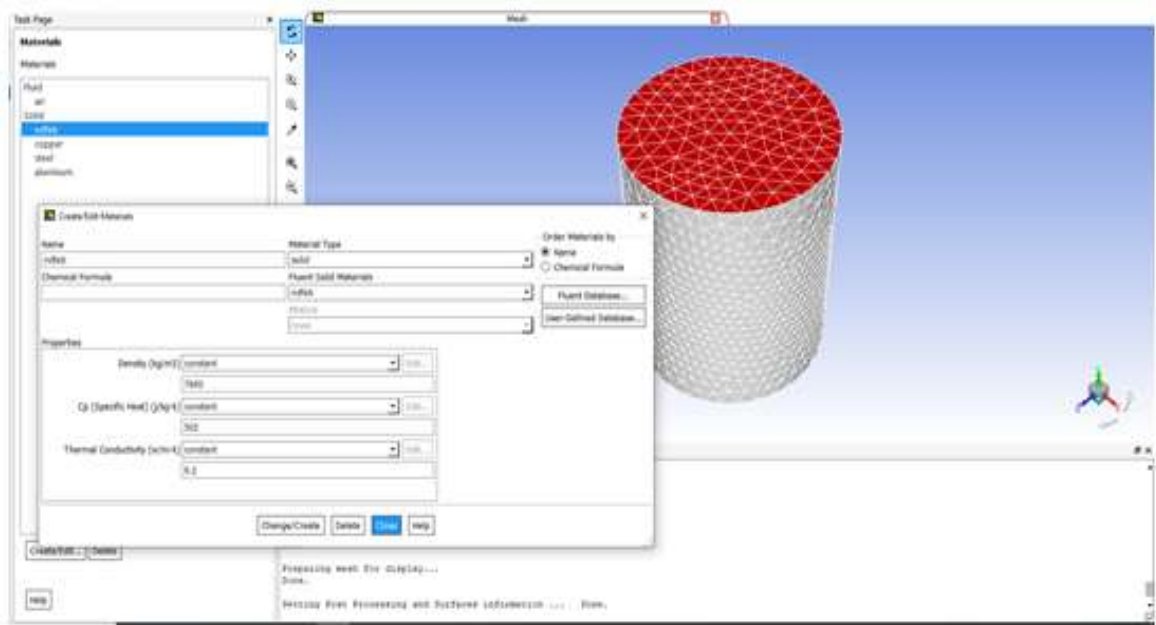
Şekil 6.3. ANSYS Maxwell Modelinin ANSYS Fluent’ e Aktarılması

Tasarlanan motorun elektromanyetik kayıpları Maxwell programı ile hesaplanmış ve ısı analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 6.3’ de görüldüğü gibi ısı analiz modülü olan Fluent’ e aktarılmıştır.

Analizde kullanılan geometri Ansys Maxwell programında oluşturulmuştur. Malzemelerin özellikleri girilip, termal özellikleri aktif hale getirilmiştir. Maxwell 3D-Eddy Current analizi tüm malzemeler için aktif hale getirilerek ve belirli bir iterasyon ile çözdürülmek üzere analiz ayarları tamamlanmıştır.

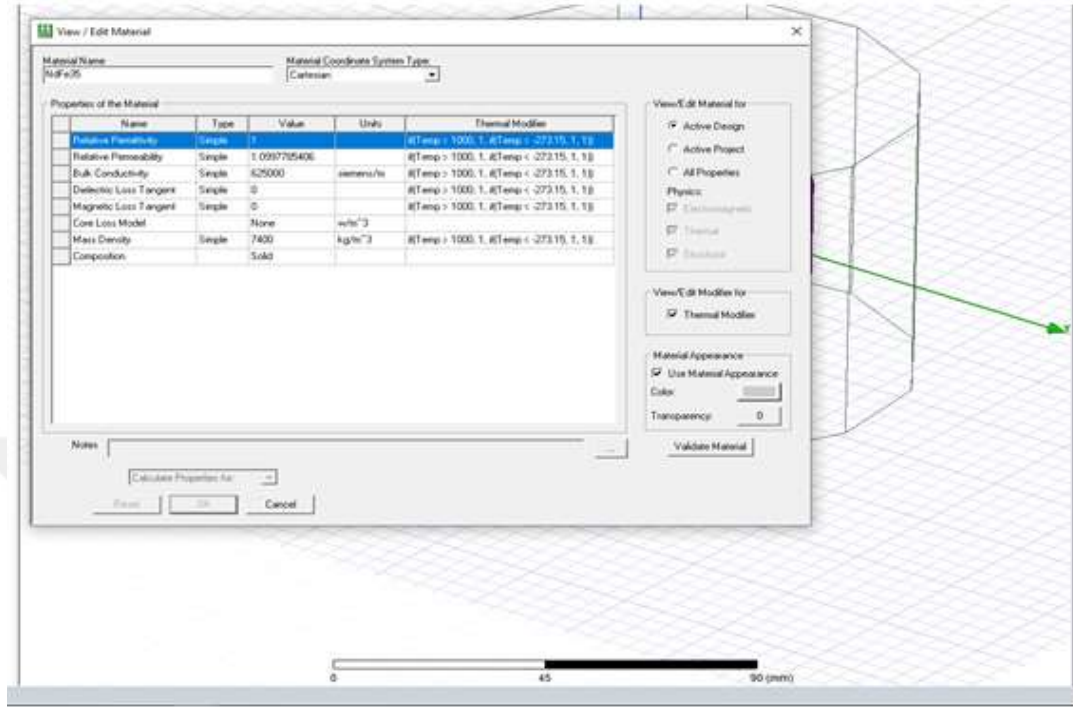


**Şekil 6.4.** ANSYS Maxwell’ de oluşturulan geometri



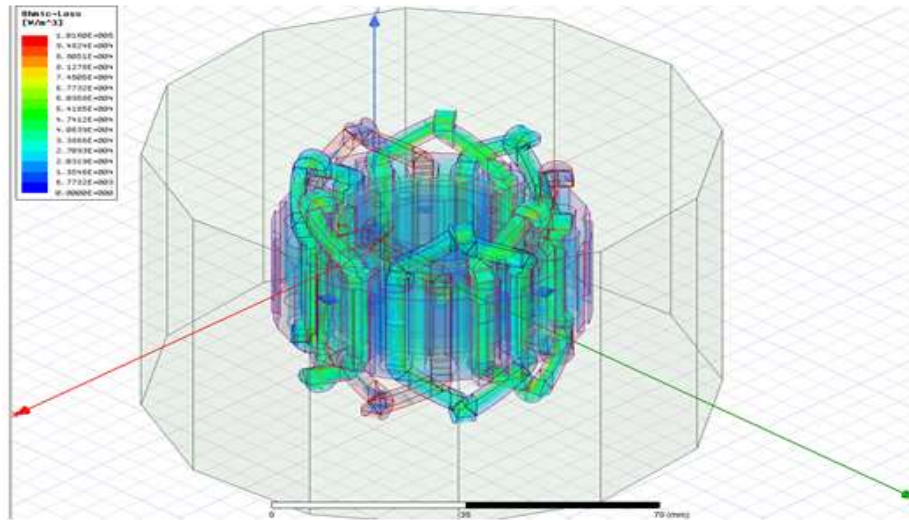
**Şekil 6.5.** Malzeme özelliklerinin tanıtılması

Şekil 6.4’ de motora ait katı model Ansys Maxwell programı yardımıyla oluşturulmuş ve Fluent modülüne aktarılmıştır. Şekil 6.5’ de ise katı model için gerekli malzemelerin ataması gerçekleştirilmiştir.



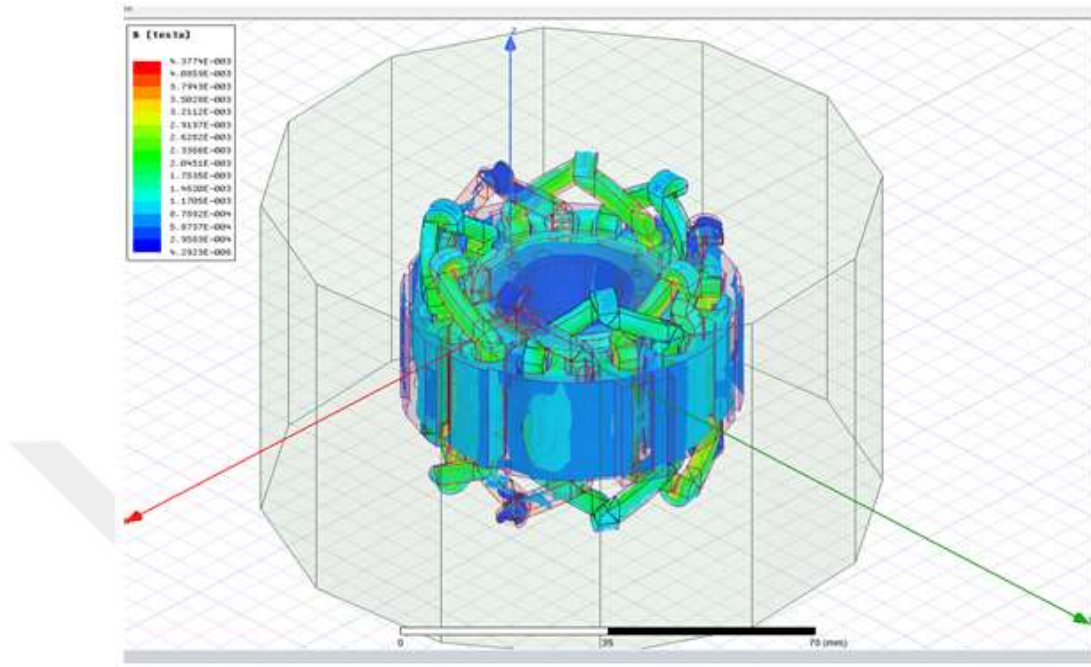
Şekil 6.6. Malzeme ayarlarının gerçekleştirilmesi

Motor ısı analizlerinin gerçekleştirilmesi için malzemelerin termal özellikleri aktif hale getirilmelidir. Bu işlemlerde malzeme konfigürasyon ayarları dikkatli bir şekilde oluşturulmalıdır. Şekil 6.6 ile malzeme konfigürasyon ayarları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7. ANSYS Maxwell eddy current çözümü-1

Şekil 6.7' de Ansys Maxwell eddy çözümleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.8.** ANSYS Maxwell eddy current çözümü-2

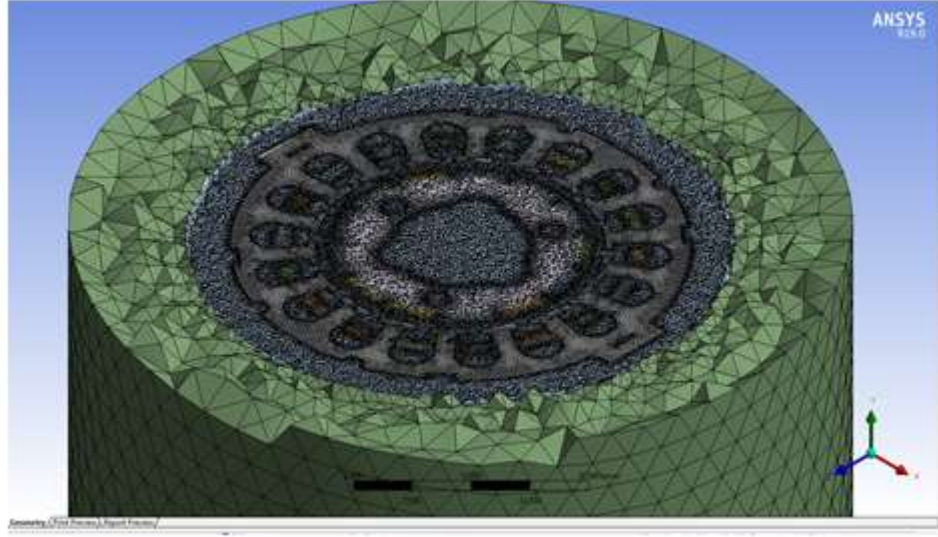
Şekil 6.8’ de analizin ANSYS Maxwell-3D çözümündeki Eddy Current çözümleri elde edilmiştir. Solution Type ayarında Eddy Current seçilmiştir. ANSYS Fluent’ in girdileri Maxwell-3D çözümünün çıktıları olacaktır. Bu nedenle Eddy Current manyetik analizinde manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve kayıplar elde edilmiştir.

Ansyes Workbench ekranında hazır bulunan Maxwell çözümündeki geometri, Fluent yazılımı ile birleştirilmek üzere eklenmiştir.

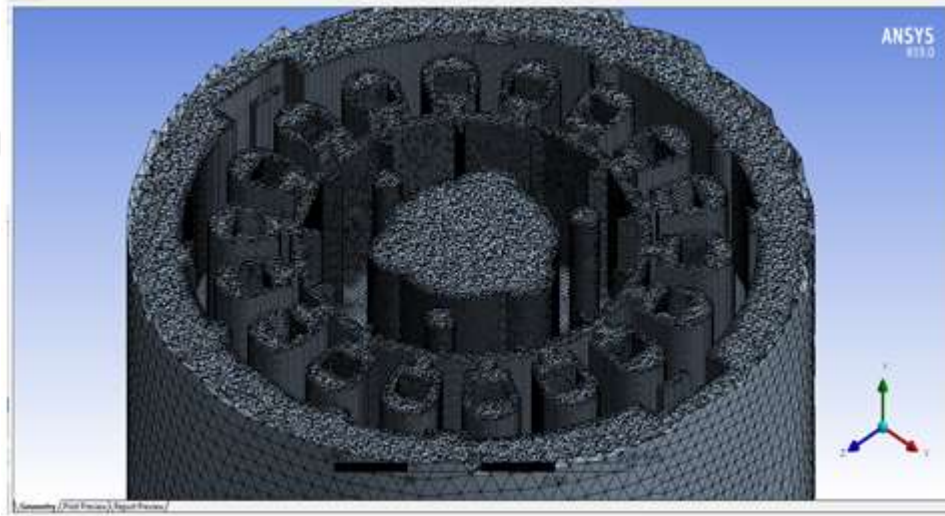
Motor modelinin geometrik yapısının doğru analiz edilebilmesi ve düzgün bölümlendirme yapısının sağlanabilmesi için gerekli konfigürasyonlar Solidworks ve Ansys Design Modeler yardımı ile yapılmıştır. Ansys mesh ortamına alınan geometri programın istediği ayarlamalar yapılarak yeterli düğüm ve eleman sayısına ulaştırılmıştır. Şekil 6.9 elde edilen düğüm ve eleman sayısını göstermektedir.

| Statistics                        |          |
|-----------------------------------|----------|
| <input type="checkbox"/> Nodes    | 5025736  |
| <input type="checkbox"/> Elements | 24790104 |

**Şekil 6.9.** Bölümlendirme sonucu elde edilen düğüm ve eleman sayısı

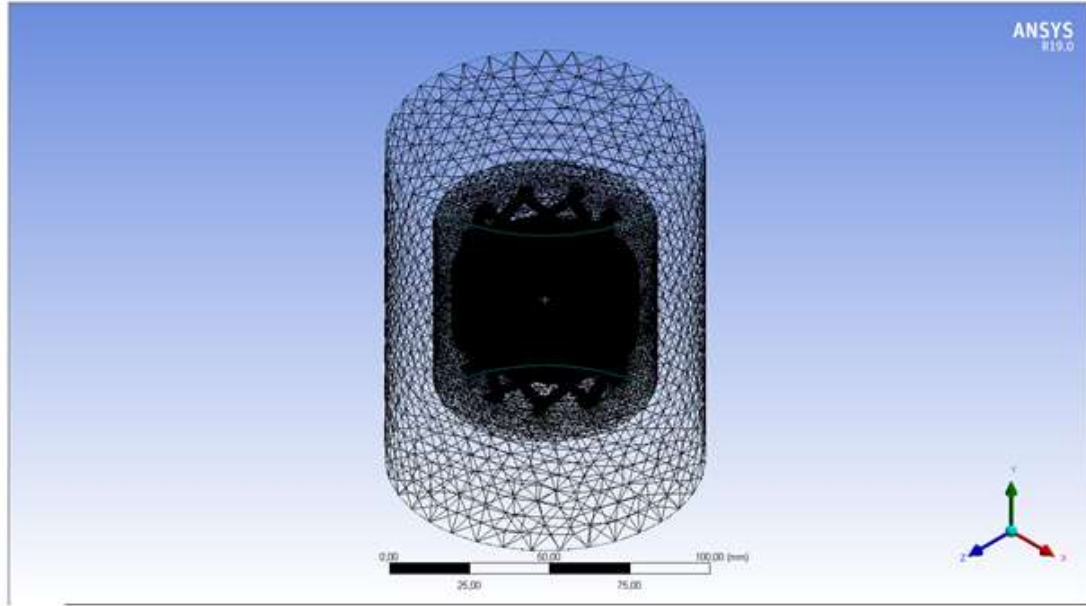


**Şekil 6.10.** Akış domain' i bölümlleştirilmiş görüntüsü



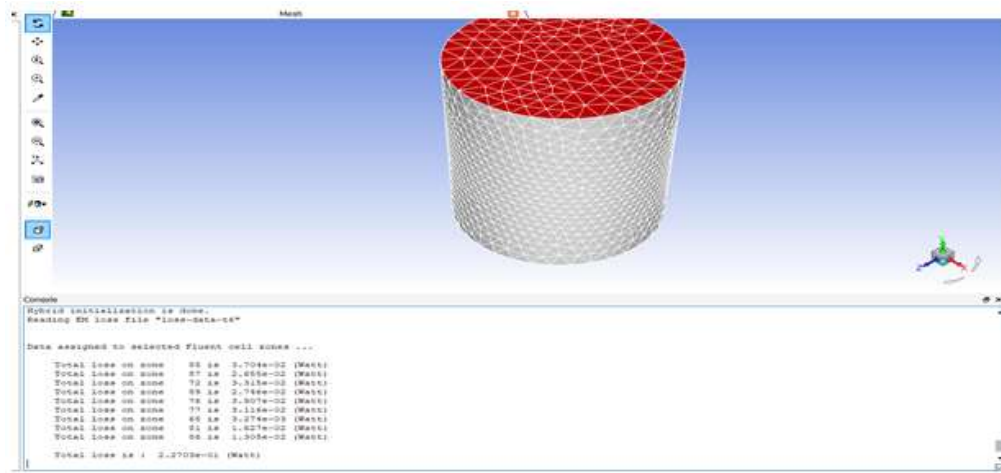
**Şekil 6.11.** Motor katı modelinin bölümlendirilmiş görüntüsü

Bölümlendirilme, fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Tez çalışmasında kullanılan SMSM için yapılan bölümlendirme ayarları Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 ile gösterilmiştir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Farklı ağ yapılarını analiz sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle mesh ayarlarının doğru şekilde yapılmasına dikkat edilmelidir.



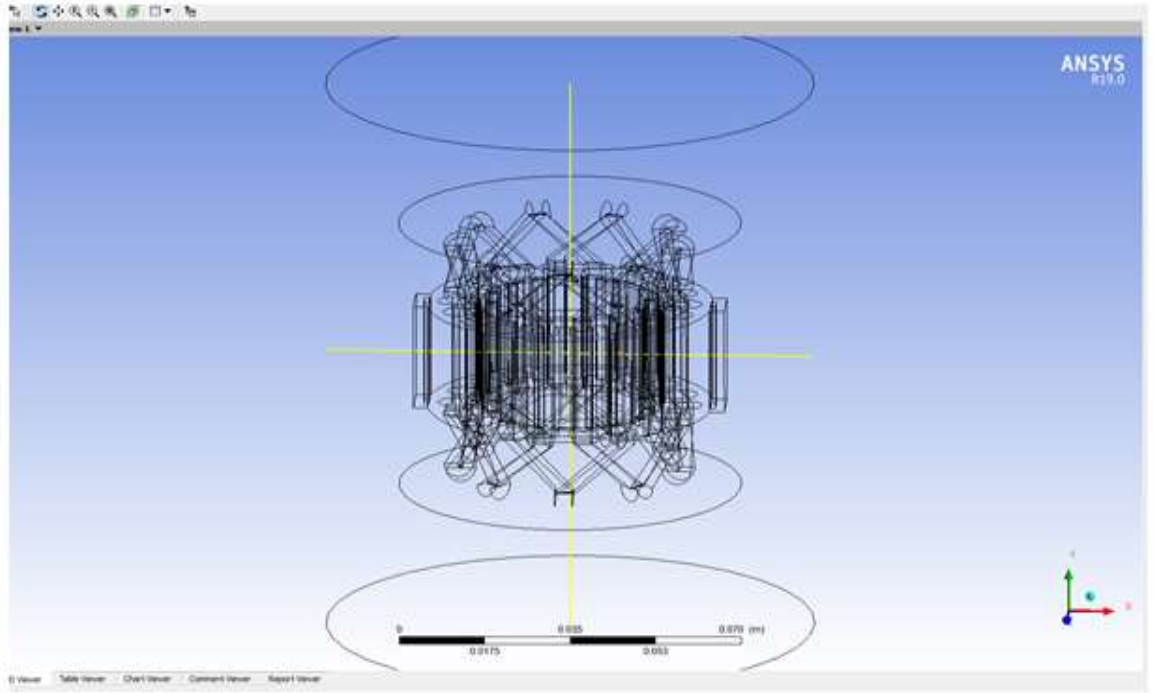
**Şekil 6.12.** Ortamda bulunan havanın bölümlendirilmiş görüntüsü

Termal analizin gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Maxwell’ de elde edilen çözümler ve bölümlendirme görüntüsü ANSYS Fluent’ e eklenmiştir. Şekil 6.12 havanın bölümlendirilmiş görüntüsünü ifade etmektedir.



**Şekil 6.13.** Maxwell-Fluent Aktarımı

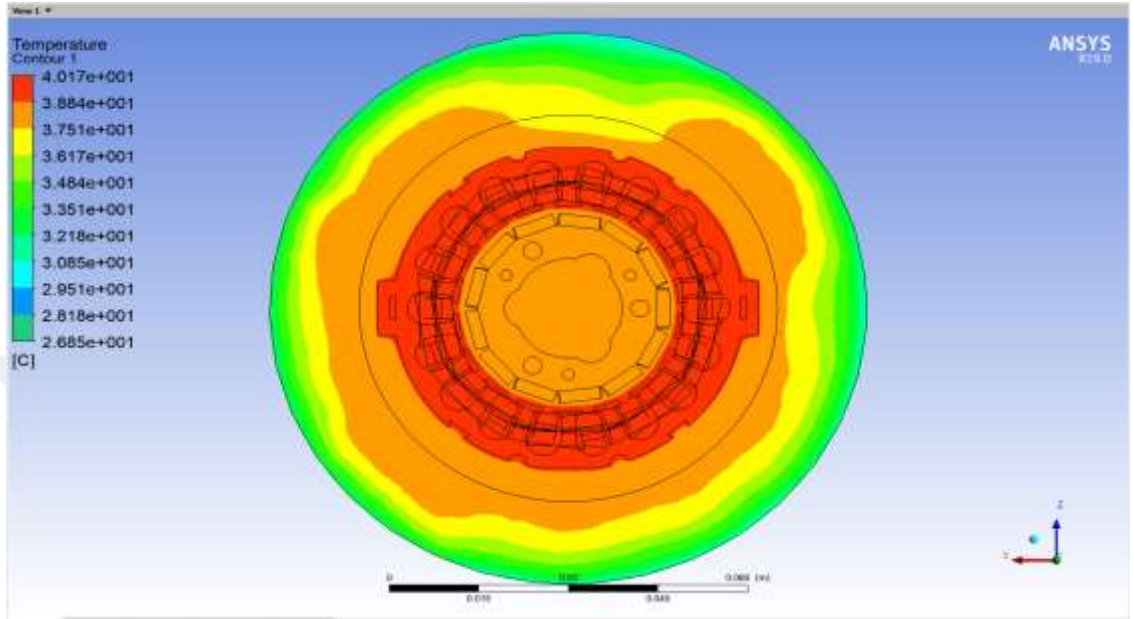
Şekil 6.13 ile Maxwell ve Fluent modülleri arasındaki veri aktarımı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.14.** Ansys Fluent düzleminin belirlenmesi

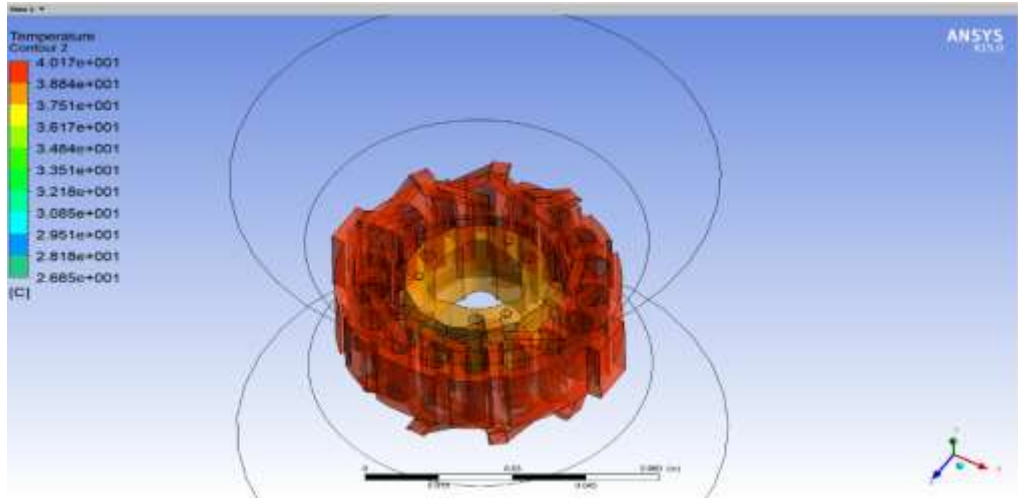
Analiz gerçekleştirilirken katı model için düzlem belirlenmeli ve bu düzlem üzerinde grafik çizdirilmelidir. Şekil 6.14’ de Fluent düzlemi belirlenmiştir. Malzemelerin ilk sıcaklıkları 300 K olarak belirlendi. Geometride oluşturulan akış hacminin dış ortam ile sağladığı konvektif ısı transfer katsayısı (H)  $5\text{W}\backslash\text{m}^2\text{K}$  olarak yazılıma eklenmiştir.

## 6.1. Ansys Fluent Isıl Analiz Sonuçları

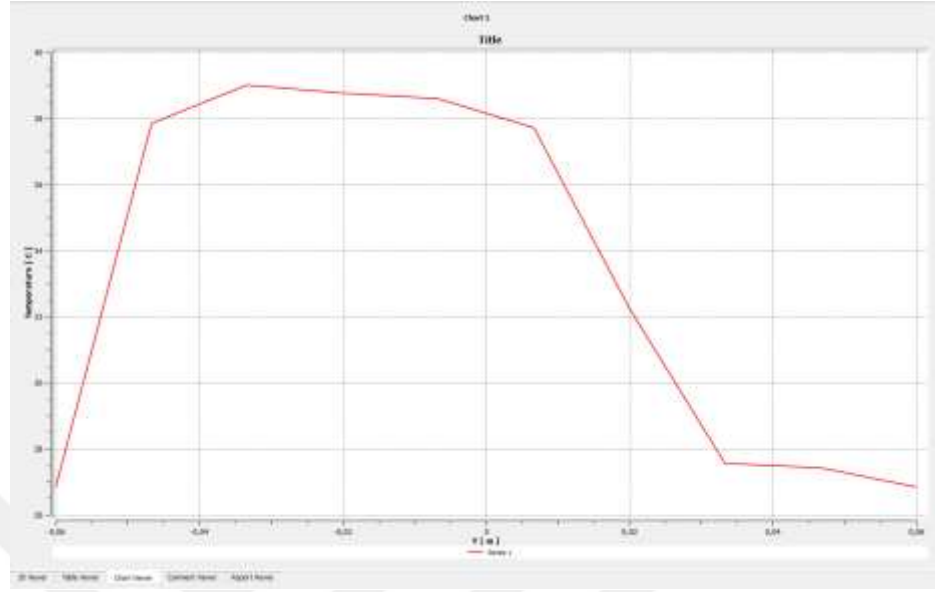


Şekil 6.15. Orta düzlemde oluşan sıcaklık durumunun üstten görüntüsü

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 Ansys Fluent modülünde gerçekleştirilen ısı analiz sonuçlarını ifade etmektedir. Şekil 6.15’ de orta düzlemdeki ısı dağılımının üstten görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 6.16 ise motorun sargı, mıknatıs, stator ve rotor kısımlarındaki ısı dağılımını göstermektedir.

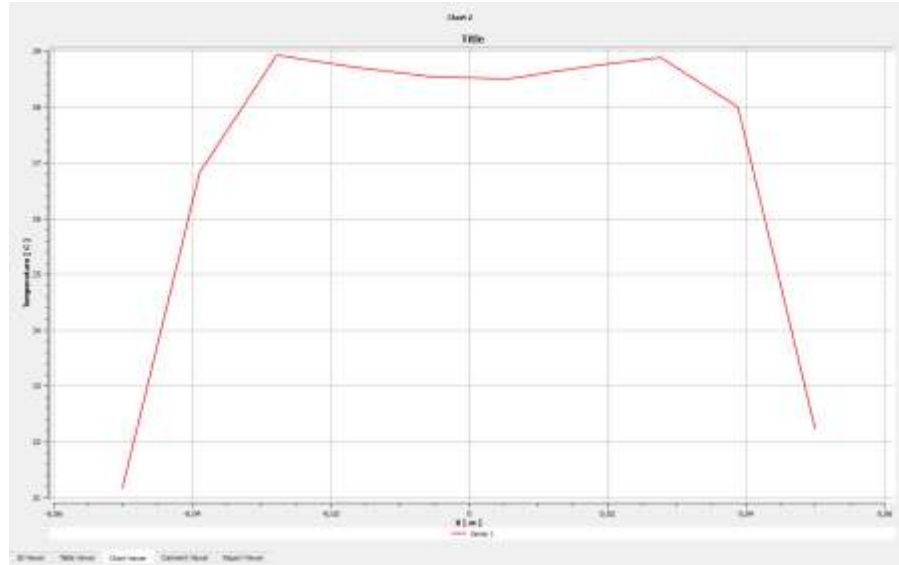


Şekil 6.16. Sargı, mıknatıs, stator ve rotorda oluşan ısı dağılımı



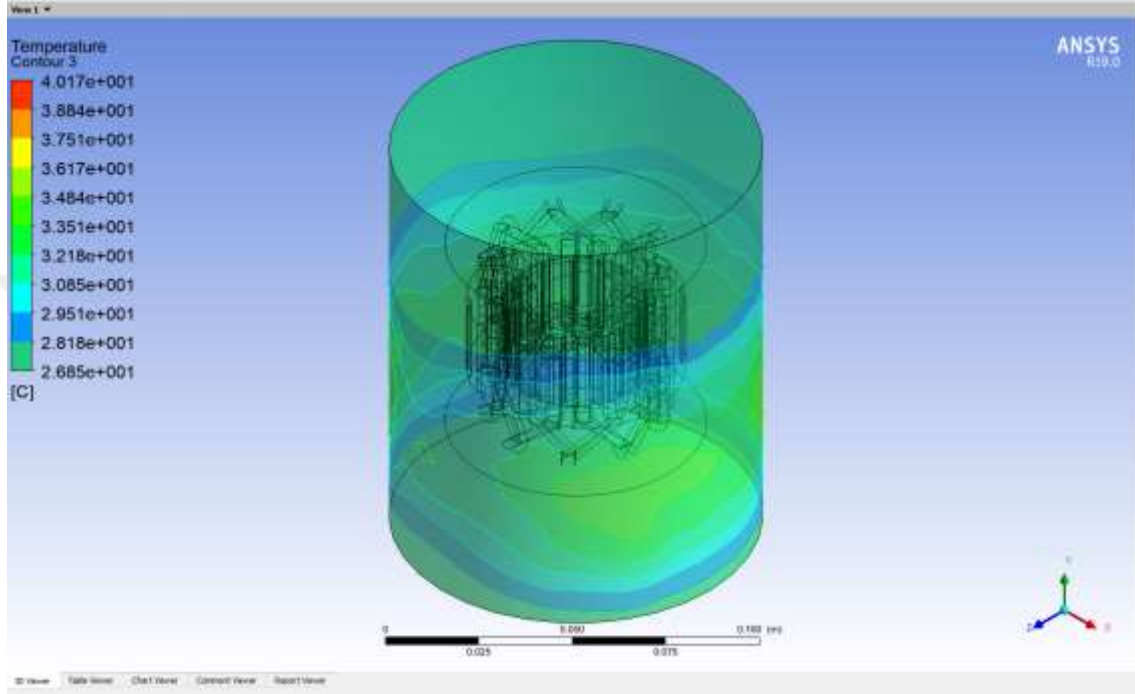
**Şekil 6.17.** Y-Ekseni Sıcaklık Değişimi

Analiz sonucunda akış hacminin Y ekseninde alt ve üst noktalarının merkezinden geçen bir çizgi atanmıştır. Çizgi boyunca değişen sıcaklık değerleri Şekil 6.17’ deki gibidir. Burada X ve Y eksenı boyunca sıcaklık değişimi görölmektedir. 30 iterasyon için sıcaklık artışı 40° C civarında olup beklenildiği gibidir.



**Şekil 6.18.** X-Ekseni Sıcaklık Değişimi

Analiz sonucunda akış hacminin X ekseninde alt ve üst noktalarının merkezinden geçen bir çizgi atanmıştır. Çizgi boyunca değişen sıcaklık değerleri Şekil 6.18’ deki gibidir.



**Şekil 6.19.** Akış hacminin dış yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımı

Zamana bağlı olmayan denge halinin oluşmasını sağlayacak sayıda işlem aşaması gerçekleştirilmiş olup, başlangıçta Ansys Fluent yazılımında 26°C olarak gözlemlenen motor sıcaklığı analiz sonunda 40°C’ ye kadar çıktığı görülmüştür. Hava ile motor yüzeyleri arasında doğal konveksiyon ile ısı transferi söz konusudur. Hava akım çizgileri de ayrıca incelenmiştir.

Şekil 6.19’ da analizde kullanılan malzemelerin ve çevresinde bulunan akış hacminin ısı dağılımı gözlemlenmiştir.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında parçacık sürü optimizasyon tekniği kullanılarak sürekli mıknatıslı senkron motorların yapısal parametrelerine dayalı ısınma sorununu çözmek için motorun sargı yapısında iyileştirmeler yapılmıştır. Tasarım optimizasyonunda giriş parametresi olarak bakır sargının kesit alanı, bakır telin uzunluğu belirlenmiştir ve bu parametrelerin değişimine bağlı olarak motor performansı değerlendirilmiştir. Motor optimizasyonu için belirlenen giriş parametrelerinin toplam manyetomotor kuvvetini değiştirmemesine dikkat edilmiştir. Amper.Sarım oranının korunabilmesi için gerekli parametrelerin sınır şartları belirlenmiştir. Ancak burada Amper.Sarım değerinin doğru hesaplanabilmesi için sonlu elemanlar yönteminden alınan sonuçlar kullanılmıştır. Sargı indüktanslarının hesabı 3D-sonlu elemanlar yöntemi ile en doğru şekilde yapılmaktadır. Optimizasyon algoritmalarının güvenilirliğini ispatlamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Maxwell-2D yazılımı, motor tasarım kriterleri göz önüne alınarak kullanılmıştır. Ayrıca motor tasarım denklemleri açıklanmıştır. Tasarım optimizasyonu gerçekleştirilen motorun kutup dağılımının düzenli olduğu kabul edilerek sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Maxwell programı ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir

Elde edilen sonuçlarda, başlangıçta motor sargısında kullanılan  $0,35 \text{ mm}^2$  bakır telin kesit alanı  $0,37 \text{ mm}^2$  olarak değiştirilmiştir. Motorun bakır kayıplarının  $4,9368 \text{ W}$  tan  $2,4945 \text{ W}$  a düşmesi sağlanmıştır. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motor için ön analitik tasarım ve optimizasyon tasarımı sonrasında motorun çıkış gücü, giriş gücü, faz akımının etkin değeri ve stator sargılarında indüklenen zıt-EMK geriliminin etkin değeri, bakır kaybı, akı bağlantıları gibi parametreler incelenmiştir.

Motor tasarımının ve optimizasyonunun ardından ısınma testi için ANSYS Fluent programı yardımıyla ısı analizler gerçekleştirilmiştir. Motor ısı analiz için belirli bir iterasyonda motorun sıcaklığının  $26^\circ\text{C}$  den  $40^\circ\text{C}$  ye kadar ısındığı gözlemlenmiştir. Bu durumda motorda herhangi bir ısı problem oluşmadığı tespit edilmiştir. Optimizasyondan önce ısınmadaki artış miktarı  $27^\circ\text{C}$  olan motorun, optimizasyondan sonra ısınma miktarı  $14^\circ\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Bu durumun neticesinde, sonuçların doğrulanması için motor

gerçek hayatta test edilerek, ısınma probleminin çözüldüğü tespit edilmiştir. Motor nominal değerlerinde, ısınma problemi olmadan çalışmıştır. Test sonuçları Tablo 8.1’ de mevcuttur.

**Tablo 7.1.** Motor Tasarım Sonuçları

| <b>Parametreler</b>                           | <b>Optimizasyondan önce</b> | <b>Optimizasyondan sonra</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <b>Bakır tel kesit alanı (mm<sup>2</sup>)</b> | 0.35                        | 0.37                         |
| <b>Maksimum hız (d/d)</b>                     | 7000                        | 6995                         |
| <b>Akım (yüksüz) (A)</b>                      | 0.16                        | 0.08                         |
| <b>Akım (Yükte) (A)</b>                       | 0.55                        | 0.45                         |
| <b>Akım (Max.) (A)</b>                        | 2.07                        | 2.03                         |
| <b>Frenleme Akımı (A)</b>                     | 1.98                        | 1.75                         |
| <b>Sıcaklık Artışı (°C)</b>                   | 27                          | 14                           |

## 8.ÖNERİLER

Motor tasarımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. ANSYS Maxwell programı sonlu elemanlar yöntemini kullanan gelişmiş bir programdır. Motorun elektromanyetik analizleri bu program yardımıyla incelenebilir.

Bir elektrik motoruna ait problemin çözümünde optimizasyon algoritmaları kullanılabilir. Parçacık sürü optimizasyonu yöntemiyle bir problemin en iyi çözümü bulunabilir. Bu yöntem motor geometrisi, motor sargısı gibi parametrelere uygulanabilir.

ANSYS Fluent yazılımı ile ısı analizleri yapılabilir. Elektrikle çalışan motor gibi elektrikli makinelerin performansları, elektriğe bağlı olarak oluşan manyetik alanın görüntüsü, elektriksel ısınma analizleri, manyetik kuvvetlere bağlı oluşan etkilerin analizleri de ANSYS programı ile gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Preeti Singh, Bhupal Singh.**, 2013, Direct Torque Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Two Level Inverter, *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, Ghaziabad, India.
- [2] **Pragasen Pillay, Ramu Krishnan.**, 1989, Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives , Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive, *Ieee Transactions On Industry Applications*.
- [3] <http://www.nkfu.com/optimizasyon-nedir-nerelerde-kullanilir/>
- [4] [https://www.yeniakit.com.tr/kimdir/Alessandro Volta](https://www.yeniakit.com.tr/kimdir/Alessandro_Volta)
- [5] <http://m.tr.hanzelmotor.org/news/a-fast-high-tech-low-cost-electric-motor-const-11001997.html>
- [6] **E. Öksüztepe**, 2008, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Algılayıcısız Kontrolü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [7] **Demirbaş, Ş.**, 2001, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Denetimi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [8] **Heikkilä, J.**, 2002, from Supply to Demand Chain Management Efficiency and Customer Satisfaction, *Journal of Operations Management*, 20, 747-767.
- [9] **T. Miller**, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, New York: OXFORD University Press, 1989.
- [10] **Salminen, P.**, 2004. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motor For Low Speed Applications, Lappeenranta University, *PhD Thesis*, Finland.
- [11] **Hakan Çelik.**, 2004, Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu İle Üç Fazlı Asenkron Motorun Hız Kontrolü, Fırat Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ
- [12] **D. D. Hanselman.**, 2003, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Orono: Electrical and Computer Engineering University of Maine.
- [13] **Ramu Krishnan.**, 2009, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Page 52.

- [14] **Shahrzad Ahmadi, Saman Hassanzadeh Amin.,** 2019, An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection, Canada.
- [15] **Armin Cheraghalipour, Mostafa Hajiaghaei-Keshteli, Mohammad Mahdi Paydar.,** 2017, Tree Growth Algorithm (TGA): A Novel Approach For Solving Optimization Problems, Iran.
- [16] **Samira Sadeghi-Moghaddam, Mostafa Hajiaghaei-Keshteli, Mehdi Mahmoodjanloo.,** 2017, New Approaches In Metaheuristics To Solve The Fixed Charge Transportation Problem In A Fuzzy Environment, *The Natural Computing Applications Forum 2017*.
- [17] **Eberhart Russell C. Eberhart.,** 1995, Particle Swarm Optimization, Department of Electrical and Computer Engineering Purdue School of Engineering and Technology at IUPUI, Indianapolis, Indiana, USA.
- [18] **Mohammad Khajehzadeh M R., Taha A., El-shafie Mahdiyeh Eslami.,** 2010, Economic Design Of Retaining Wall Using Particle Swarm Optimization With Passive Congregation, 5500-5507.
- [19] **Yrd. Doç. Dr. İlhan AYDIN.,** Metasezgisel Yöntemler, Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.
- [20] **Derviş Karaboğa.,** 2006, Yapay zeka algortimaları Kitabı, Parçacık Sürü Optimizasyonu Teknikleri.
- [21] ANSYS Fluent User Guide.
- [22] <http://www.teknikicerik.com/ansys-fluent-nedir.html>

## ÖZGEÇMİŞ

| ÖZNUR DAL                                                                                                                                                         |                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>KİŞİSEL BİLGİLER</b>                                                                                                                                           |                                                                                                                 |
| <b>ADRES :</b>                                                                                                                                                    | <i>Fırat Üniversitesi,<br/>23119 – Elazığ</i>                                                                   |
| <b>TELEFON :</b>                                                                                                                                                  | <i>+90 ( 543 ) 887 77 01</i>                                                                                    |
| <b>EPOSTA :</b>                                                                                                                                                   | <i>oznurklncc@gmail.com</i>                                                                                     |
| <b>DOĞUM YERİ/TARİHİ:</b>                                                                                                                                         | <i>ELAZIĞ/ 23.07.1993</i>                                                                                       |
| <b>MEDENİ HALİ:</b>                                                                                                                                               | <i>Evli</i>                                                                                                     |
| <b>EĞİTİM BİLGİLERİ</b>                                                                                                                                           |                                                                                                                 |
| <b>LİSANSÜSTÜ</b>                                                                                                                                                 |                                                                                                                 |
| <b>LİSANS :</b>                                                                                                                                                   | <i>2015, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ/TÜRKİYE</i> |
| <b>LİSE :</b>                                                                                                                                                     | <i>2011, Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi, Elazığ</i>                                                              |
| <b>İŞ DENEYİMİ</b>                                                                                                                                                |                                                                                                                 |
| <b>2018 – 2018</b>                                                                                                                                                | <i>Fırat Elektrik/Aksa, Elazığ</i>                                                                              |
| <b>2017 – 2018</b>                                                                                                                                                | <i>Müşteri Operasyonları Uzmanı<br/>ZCM Enerji Sistemleri, Elazığ<br/>Ar-ge Müdürü</i>                          |
| <b>BİLDİĞİ YABANCI DİLLER</b>                                                                                                                                     |                                                                                                                 |
|                                                                                                                                                                   | <i>İngilizce ( C2),<br/>Almanca(B1)</i>                                                                         |
| <b>ARAŞTIRMA DENEYİMİ</b>                                                                                                                                         |                                                                                                                 |
| <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Ansys Maxwell,</li><li>✓ Ansys Fluent</li><li>✓ Solidworks</li><li>✓ Autocad</li><li>✓ Matlab</li><li>✓ Proteus</li></ul> |                                                                                                                 |
| <b>İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER</b>                                                                                                                                 |                                                                                                                 |
| <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Resim, Yabancı Dil, Tenis.</li></ul>                                                                                      |                                                                                                                 |