

**T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**KÜÇÜK GÜÇLÜ DAİMİ MİKNATISLI BİR FIRÇASIZ DOĞRU  
AKIM MOTORUNUN MODELLENMESİ VE DENEYSEL  
SONUÇLARININ ÇIKARILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammet GÜRÇAY**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**TEMMUZ 2024  
İSTANBUL**

**T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**KÜÇÜK GÜÇLÜ DAİMİ MİKNATISLI BİR FIRÇASIZ DOĞRU  
AKIM MOTORUNUN MODELLENMESİ VE DENEYSEL  
SONUÇLARININ ÇIKARILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammet GÜRÇAY  
(221280001)  
(0009-0001-5404-2228)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

**İstanbul 2024**



**T.C.**  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü**

**Jüri Tez Onay Formu**

01.07.2024

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

Bu çalışma 01.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**TEZ JÜRİSİ**

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Koray ERHAN**

Üye (İmza)

Marmara Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu**

**TEKDEMİR**

Üye (İmza)

Bursa Teknik Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Küçük Güçlü Daimi Mıknatıslı Bir Fırçasız Doğru Akım Motorunun Modellenmesi ve Deneysel Sonuçlarının Çıkarılması” başlıklı tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar geçen bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu onurumla beyan ederim. (01/07/2024)

Muhammet GÜRÇAY

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince, değerli fikirleri ile bana yol gösteren, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam, sayın Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya katkılarından dolayı teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Yine çalışma süresince, büyük desteklerini gördüğüm ve fikirleriyle çalışmalarına katkıda bulunan Yakacık Meslek Lisesi Elektrik/Elektronik Bölümü öğretmenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Hep yanımda olan değerli eşim Meltem GÜRÇAY' a ve sevgili kızım Yasemin GÜRÇAY'a

Desteklerinden ötürü sonsuz şükranlarımı sunarım.

Haziran 2024

Muhammet GÜRÇAY

---

Uzman Elektrik/Elektronik Öğretmeni

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                        | iv        |
| KISALTMALAR .....                                                                 | vii       |
| SEMBOLLER .....                                                                   | viii      |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                              | ix        |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                | x         |
| ÖZET.....                                                                         | xii       |
| ABSTRACT .....                                                                    | xiii      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                                         | 5         |
| <b>2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN YAPISI.....</b>                               | <b>8</b>  |
| 2.1.Mıknatıs ve Manyetizmanın Genel Tanımı.....                                   | 8         |
| 2.1.1 BH Eğrisi (manyetizasyon-demanyetizasyon eğrisi) .....                      | 9         |
| 2.1.2.Curie sıcaklığı.....                                                        | 11        |
| 2.2 Daimi Mıknatıslar .....                                                       | 12        |
| 2.2.1 Daimi mıknatıslarda kayıplar .....                                          | 13        |
| 2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı ve Çeşitleri.....                    | 15        |
| 2.3.1. Dış rotorlu FDAM .....                                                     | 16        |
| 2.3.2 İç rotorlu FDAM.....                                                        | 16        |
| 2.3.3. Disk tipi FDAM.....                                                        | 16        |
| 2.4. FDAM’nun 1 Faz Eşdeğer Devresi .....                                         | 17        |
| 2.5. FDAM’nun Hız ve Moment Karakteristiği .....                                  | 18        |
| 2.6. Daimi Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Çalışması.....                | 18        |
| 2.7. FDAM’nun Tarihsel, Teknolojik Gelişimi ve Uygulama Alanları .....            | 20        |
| 2.8 Küçük Güçlü Referans Motorun ANSYS/MAXWELL Programı ile<br>Modellenmesi ..... | 22        |
| 2.9 Materyal ve Yöntem.....                                                       | 22        |
| 2.10 Stator Oluk ve Rotor Kutup Sayısı Seçimi.....                                | 23        |
| 2.11 Rotorda Daimi Mıknatıs Seçimi.....                                           | 24        |
| 2.12 Analiz ve Bulgular .....                                                     | 25        |
| <b>3. MATLAB/SİMULİNK PROGRAMI İLE FDAM’NUN DİNAMİK MODELİ</b>                    | <b>28</b> |
| 3.1. Motor parametreleri.....                                                     | 28        |
| 3.2. Alan (Hall) Etkili Sensörlerdeki Verinin İşlenmesi .....                     | 28        |

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 PWM Sinyali Üretimi.....                                                            | 30        |
| 3.4. PID Kontrolcüsünün kullanımı .....                                                 | 31        |
| 3.5. Transfer blok dönüşüm formülleri .....                                             | 32        |
| 3.6. FDAM Simulink Benzetiminin Grafiksel Çıktıları.....                                | 33        |
| 3.7. 550Watt gücünde FDAM'nin Laboratuvar Ortamında Yapılan Performans<br>Testleri..... | 36        |
| <b>4. SONUÇLAR .....</b>                                                                | <b>40</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                  | <b>42</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                    | <b>45</b> |



## KISALTMALAR

|               |                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------|
| <b>AA-AC</b>  | : Alternatif Akım                                 |
| <b>d/dk</b>   | : Devir/Dakika                                    |
| <b>DC-DA</b>  | : Doğru Akım                                      |
| <b>DMSM</b>   | : Daimi Mıknatıslı Senkron Motor                  |
| <b>EMK</b>    | : Zıt Elektro Motor Kuvvet                        |
| <b>FDAM</b>   | : Daimi Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru     |
| <b>FEM</b>    | : Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Method) |
| <b>FET</b>    | : Alan Etkili Transistör                          |
| <b>IGBT</b>   | : İzole Edilmiş Kapılı Çift Kutuplu Transistör    |
| <b>MOSFET</b> | : Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör  |
| <b>PID</b>    | : Oransal, İntegral, Türev Denetleyici            |
| <b>PWM</b>    | : Darbe Genişlik Modülasyonu                      |
| <b>Rpm</b>    | : Dakikada Tekrar Sayısı (repeat Per Minute)      |

## SEMBOLLER

|                               |                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Va, Vb, Vc</b>             | : Faz Gerilimleri                   |
| <b>Ra, Rb, Rc</b>             | : Faz Dirençleri                    |
| <b>La, Lb, Lc</b>             | : Faz İndüktansları                 |
| <b>Ea, Eb, Ec</b>             | : Faz Zıt Elektro Motor Kuvvetleri  |
| <b>Ia, Ib, Ic</b>             | : Faz Akımları                      |
| <b><math>\omega</math></b>    | : Açısal Hız                        |
| <b>Te</b>                     | : Elektriksel Moment                |
| <b>TL</b>                     | : Yük Momenti                       |
| <b>J</b>                      | : Atalet Momenti                    |
| <b>H</b>                      | : Elektriksel Manyetik Alan Şiddeti |
| <b>B</b>                      | : Manyetik Akı Yoğunluğu            |
| <b><math>\mu</math></b>       | : Ortamın Manyetik Geçirgenliği     |
| <b><math>\emptyset</math></b> | : Manyetik Akı                      |

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No:

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1: DMSM ve FDAM'nin Uyartım ve Zıt EMK Dalga Şekillerine Göre Karşılaştırılması ..... | 3  |
| Çizelge 1.2: FDAM ve Fırçalı DA Motor Arasındaki Farklar .....                                  | 5  |
| Çizelge 2.1 Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması .....                                       | 9  |
| Çizelge 2.2: Neodimyum Demir Bor Mıknatıslara (NdFeB) Ait Çalışma Sıcaklıkları .....            | 12 |
| Çizelge 2.3: Kalıcı Mıknatısların Karşılaştırılması .....                                       | 13 |
| Çizelge 2.4: Maxwell Programı FDAM Verileri .....                                               | 23 |
| Çizelge 3.1: FDAM Parametreleri .....                                                           | 28 |
| Çizelge 3.2: Elektriksel Açığa Göre Sensörlerden Gelen 6 Farklı Konum Bilgisi ....              | 29 |
| Çizelge 3.3: P, I ve D Denetleyicisinin Sisteme Etkileri .....                                  | 32 |
| Çizelge 3.4: Faz a, Faz b, Elektromanyetik Moment ve Kazanç Grafikleri .....                    | 34 |
| Çizelge 3.5: SIMULINK FDAM Benzetimi .....                                                      | 35 |
| Çizelge 3.6: FDAM etiket değerleri .....                                                        | 36 |
| Çizelge 3.7: Değişik Gerilimlerde Yüksüz Çalışmadaki FDAM Akım-Hız Verileri                     | 38 |
| Çizelge 3.8: Değişik Gerilimlerde Yüklü Çalışmadaki FDAM Hız Verileri .....                     | 38 |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1: Oluk Sayısı 6 ve Kutup Sayısı 4 Olan 3 Fazlı FDA Motor .....                                  | 2  |
| Şekil 1.2: Motorların sektörel olarak harcadığı elektrik enerjisi payları .....                          | 3  |
| Şekil 1.3: Elektrik Motorları Sınıflandırılması AC, DC, Hibrit Motorlar .....                            | 4  |
| Şekil 2.1: BH Eğrilerinin Genel Yapısı .....                                                             | 10 |
| Şekil 2.2: Sac Çelik, Dökme Çelik ve Dökme Demire Ait B-H Eğrisi .....                                   | 10 |
| Şekil 2.3: Daimi Mıknatısların Rotor Sargılarına Bağlı Olarak Oluşturduğu<br>Demanyetizasyon Eğrisi..... | 11 |
| Şekil 2.4: Curie Sıcaklığının Altındayken ve curie Sıcaklığı Üstündeyken Manyetik<br>Moment .....        | 11 |
| Şekil 2.5: Kalıcı Mıknatısların Gelişimsel Tarihi .....                                                  | 13 |
| Şekil 2.6: Eddy Kayıplarının Oluşumu ve Lamine Edilmiş Rotor Stator Sac Çelikleri<br>.....               | 14 |
| Şekil 2.7: FDAM'nun Temel Yapısı.....                                                                    | 15 |
| Şekil 2.8: Mıknatısın Yerleştirilmesine Göre FDAM Yapıları.....                                          | 15 |
| Şekil 2.9: Dış Rotorlu FDAM .....                                                                        | 16 |
| Şekil 2.10: İç Rotorlu FDAM .....                                                                        | 16 |
| Şekil 2.11: Disk Tipi FDAM.....                                                                          | 17 |
| Şekil 2.12: FDAM'nun 3 Faz, Yıldız Bağlı Eşdeğer Elektrik Devresi.....                                   | 17 |
| Şekil 2.13: FDAM Hız-Moment Karakteristiği .....                                                         | 18 |
| Şekil 2.14: MOSFET ile Yapılmış Altı Adımlı Bir Evirici-Sürücü Modeli ve FDAM<br>.....                   | 19 |
| Şekil 2.15: Üç Fazlı FDAM Komütasyon Örnekleme.....                                                      | 19 |
| Şekil 2.16: FDAM'nin Denetleyici ve Sürücü Devresi Blok Şeması .....                                     | 20 |
| Şekil 2.17: FDAM Kontrol Yöntemleri .....                                                                | 20 |
| Şekil 2.18: Piyasa Raporlarına Göre Oluşan FDAM Satış Analizi.....                                       | 21 |
| Şekil 2.19: Üretim Maliyeti Açısından Beş Farklı Motorun Karşılaştırılması .....                         | 21 |
| Şekil 2.20: Sunulan Beş Farklı Motorun Elektrikli Araçlardaki Verim Grafiği .....                        | 22 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.21: FDAM Ansys Çift Katmanlı Sargı Yapısı ve İç Rotorlu Oluk/Kutup Gösterimi.....          | 23 |
| Şekil 2.22: Motorun Katmanlı Sarım Tekniği Oluk Ölçüleri Ansys/Maxwell Gösterimi.....              | 24 |
| Şekil 2.23: Ansys/Maxwell’de İki Boyutlu Motor Kesiti ve Rotor Daimi Mıknatıs Yerleşim Şeması..... | 24 |
| Şekil 2.24: FDAM Hız-Verim Grafiği .....                                                           | 25 |
| Şekil 2.25: Motora Ait Çıkış Momenti Grafiği.....                                                  | 26 |
| Şekil 2.26: Manyetik Akı Yoğunluğunun Vektörel Gösterimi .....                                     | 26 |
| Şekil 2.27: Hava Aralığı Akı Yoğunluğu Grafiği .....                                               | 27 |
| Şekil 3.1: Alan (Hall) Etkili Sensörlerin FDAM’de Yerleşimi.....                                   | 29 |
| Şekil 3.2: MATLAB-Simulink Alan Etkili Sensörlerden Gelen Verinin İşlenmesi..                      | 30 |
| Şekil 3.3: Simulink Alan Etkili Sensörlerden Gelen Dijital 1-0 Verisi Grafiği (Ha, Hb, Hc).....    | 30 |
| Şekil 3.4: Görev Çevriminin (Duty Cycle) PWM Sinyalinde Gösterimi.....                             | 31 |
| Şekil 3.5: MATLAB/Simulink PWM Sinyali Üretimi .....                                               | 31 |
| Şekil 3.6: Simulink’te Üretilen PWM Sinyalinin Grafiği .....                                       | 31 |
| Şekil 3.7: PID Kontrolcüsü Blok Diyagramı .....                                                    | 32 |
| Şekil 3.8: Motorun Kesiti ve Ölçüleri .....                                                        | 36 |
| Şekil 3.9: Laboratuvar Ortamında Yapılan Test Düzeneği .....                                       | 37 |
| Şekil 3.10: FDAM 2 Fazına Ait Sinyal Eğrileri.....                                                 | 37 |
| Şekil 3.11: Güç Kaynağında Oluşan Değerlerin Ölçümü .....                                          | 38 |
| Şekil 3.12: Bir Faza Ait FDAM Yüksek Frekanslı Gerilim Değeri.....                                 | 39 |

# KÜÇÜK GÜÇLÜ DAİMİ MİKNATISLI BİR FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN MODELLENMESİ VE DENEYSEL SONUÇLARININ ÇIKARILMASI

## ÖZET

Daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları (FDAM) günümüzde yüksek hız ve moment ihtiyacı olan uygulamalarda fırçalı doğru akım motorlarının yerini almaktadır. Hız–moment ilişkisinin lineer olması nedeni ile, endüstride kendine geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Fırçalı motorlara nazaran FDAM’nun tercih edilmesinin sebebi, fırça-kollektör düzeneğinin olmaması, bakım gerektirmemesi, çalışırken ark oluşturmaması, korozyon olmaması, elektromekanik açıdan verimli olmasıdır. Kullanım ömrünün uzun olması da önemli avantajlardan birisidir. Bu motorlar 3 faz trapezoidal (düzgün yamuk) adı verilen bir sinyal üreten elektronik motor sürücüleri kullanılarak sürekli tahrikle çalıştırılırlar.

Bu saydığımız özelliklerle beraber verimi düşüren bir takım kayıplar da bulunmaktadır. Mekanik kayıplar, mil ve rulmanlardan kaynaklı sürtünmeye bağlı olarak oluşur. Motoru soğutmak için kullanılan vantilatörler az da olsa ventilasyon güç kayıpları olarak dikkate alınır ve verimin bir miktar düşmesine neden olur. Ayrıca asıl önemli kayıplar motorda kullanılan sargıların faz direncinden dolayı makine yükteyken fazdan geçen akımın karesine bağlı olarak ısı şeklinde açığa çıkan joule kayıpları olarak ortaya çıkar. Motorda N-S kutbu şeklinde sıralanan mıknatısların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunun değişimine bağlı olarak manyetik kayıplar da dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle amaç, ANSYS-MAXWELL programı kullanılarak küçük güçlü fırçasız DC motorun statik davranışı incelenmektedir. Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile motorun hız, moment, verim açısından elde edilen statik verileri elde edilmektedir. Bu çalışmada daimi mıknatıslı fırçasız DC motor, FDAM (Brushless DC Motor-BLDC) stator, rotor ve sabit mıknatısın farklı malzemelerden imal edilmesinin, farklı oluk ölçülerinin, hava aralığı değişiminin, stator boyunduruğu genişliği değişiminin kayıplar ve verim üzerine etkilerinin incelenmesi yer almaktadır. Çalışmanın devamında ise, Fırçasız Doğru Akım Motorunun MATLAB/SIMULINK programı yardımıyla sürücü transfer blokları, denetleyici PWM sinyali gönderimi, alan etkili (hall effect) sensör geri besleme blok şeması, sistemin kapalı çevrim çalışması şeklinde gerilim ve düğüm denklemleri kullanılarak sürekli hal benzetimi yapılarak dinamik karakteristikleri çıkartılmaktadır.

Çalışmanın sonunda Fırçasız DC Motor ve sürücüsü uyartılarak gerçek ortamda ve yüksüz çalışmasına ilişkin deneysel çalışması yapılarak ayrıca gözlemlenmiştir. Osiloskop ve ölçü aletleri yardımıyla çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** *Daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru, Matlab/Simulink, ANSYS –MAXWELL, PID kontrol, PWM(Darbe genişlik modülasyonu), sensörlü kontrol.*

## MODELLING AND EXPERIMENTAL RESULTS OF A SMALL POWER PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR

### ABSTRACT

Permanent magnet brushless direct current motors (FDAM) are now replacing brushed direct current motors in applications requiring high speed and torque. Since the speed-torque relationship is linear, it has found a wide application area in industry. The reason why FDAM is preferred over brushed motors is that it does not have a brush-collector mechanism, does not require maintenance, does not create an arc during operation, does not cause corrosion, and is electromechanically efficient. Long lifespan is also one of the important advantages. These motors are operated with continuous drive using electronic motor drivers that produce a signal called 3-phase trapezoidal.

Along with these features, there are also some losses that reduce efficiency. Mechanical losses occur due to friction caused by shafts and bearings. Fans used to cool the engine are considered as ventilation power losses, even if small, and cause a slight decrease in efficiency. In addition, the most important losses occur as joule losses in the form of heat, depending on the square of the current passing through the phase when the machine is under load, due to the phase resistance of the windings used in the motor. Magnetic losses are also taken into account depending on the change in the magnetic flux density created by the magnets arranged in the form of N-S poles in the motor.

The aim of this study is to examine the static behavior of a small-power brushless DC motor using the ANSYS-MAXWELL program. Static data of the engine in terms of speed, torque and efficiency are obtained with the finite element analysis method. This research includes examining the effects of permanent magnet brushless DC motor FDAM (Brushless DC Motor-BLDC) manufacturing of stator, rotor and permanent magnet from different materials, different slot sizes, air gap change, stator yoke width change on losses and efficiency. In the continuation of the study, the dynamic characteristics of the Brushless Direct Current Motor are simulated by using the driver transfer blocks, controller PWM signal sending, field effect (hall effect) sensor feedback block diagram, voltage and node equations in the form of closed loop operation of the system with the help of MATLAB/SIMULINK program is removed.

At the end of the study, the Brushless DC Motor and its driver were excited and an experimental study was carried out on its operation in a real environment and without load, and it was also observed. The results obtained with the help of oscilloscope and measuring instruments were compared.

**Key words:** *Permanent magnet brushless direct current motor, Matlab/Simulink, ANSYS –MAXWELL, PID control, PWM (Pulse width modulation), sensed control.*

## 1. GİRİŞ

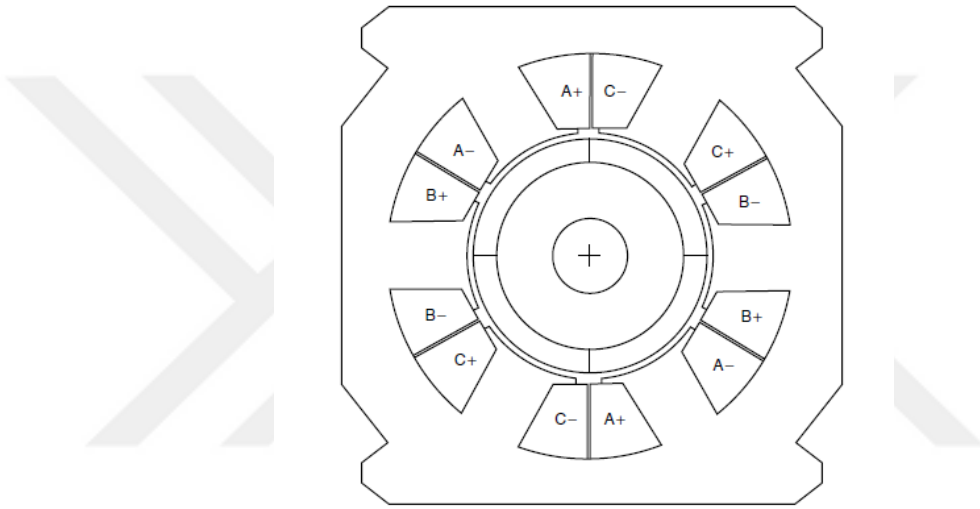
Fırçasız Doğru Akım Motoru (BLDC), asenkron motorlar ile karşılaştırıldığında bazı üstünlüklere sahiptir. Endüvi sargılarının stator üzerinde olması, joule kayıpları nedeni ile açığa çıkan sıcaklığın sargılardan daha iyi iletilmesine yardımcı olur. Rotor üzerinde sargılar olmadığından, rotor içindeki elektriksel kayıplar minimumdur. Aynı güç seviyesi için, daha yüksek verimlilik ve daha iyi güç faktörü değerlerine sahiptir, çünkü uyarma alanı kalıcı mıknatıslar tarafından sağlanır ve uyarma sargısından geçen akım tarafından sağlanmak zorunda değildir. Daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında (FDAM) mıknatıslar rotorda bulunmaktadır ve uyarma, rotordaki mıknatıslarla sağlanır. BLDC motorunun avantajları, elektronik kontrol tarafında ve mil konumunun algılanması ile birlikte oluşmaktadır. Genellikle 20 kW'ın altındaki daha küçük güçlü motorların kalıcı mıknatıs (PM) ile uyarılması maliyet bakımından daha uygundur. Daha büyük güçteki motorlarda, mıknatısların maliyeti ve motorun ağırlığı arttığından, elektromanyetik veya asenkron uyarma yöntemlerinden birini tercih etmek daha mantıklı olabilir. Ancak, yüksek manyetik alan değerlerine sahip kalıcı mıknatıs malzemelerinin geliştirilmesi ile birlikte, birkaç MegaWatt mertebesinde PM motorlar hali hazırda inşa edilmiştir.

Rotor kutup sayısı, maksimum dönme hızına ters orantılıdır ve genellikle üretim kısıtlamalarına göre seçilir. Dört, altı veya sekiz kutuplu motorlar, dört kutuplu olanın en popüler seçenek olduğu anlaşılmaktadır.

BLDC motorlarda stator sargıları, genellikle üç fazlı olduğu kabul edilebilir, ancak bu her zaman geçerli değildir. Hafif soğutma fanları gibi uygulamalar için tasarlanan küçük motorlarda performans gereksinimleri minimal olabilir ve bunları sadece bir veya iki fazlı olarak inşa etmek maliyet bakımından etkili olabilir. Diğer yandan, MegaWatt mertebesinde olan büyük tahrik sistemlerinde, yüksek faz sayısının kullanılması tercih edilebilir. Bu, tek bir fazın güç taşıma kapasitesini azaltır ve aynı zamanda bir dereceye kadar hatayı ihmal edebilmeyi de sağlar. Örneğin, gemi tahrikleri için 15 fazlı makineler inşa edilmiştir. Bunlar özel amaçlı

tasarımlar olmalarına rağmen, gemi sektöründe dört ve beş fazlı motorların kullanımı oldukça yaygındır.

Stator oluk sayısı, rotor kutup yapısına, faz sayısına ve sargı tasarımına bağlı olarak seçilir. Genel olarak, moment salınımlarını minimize etmek için kesirli oluk/kutup tasarımı tercih edilmektedir. Şekil 1.1'deki motor altı adet oluk sayısına sahiptir, bu da kutup sayısının bir katı olmadığı anlamına gelir ve bu nedenle kesirli kutup tasarımına bir örnektir. Sargılar paralel kol veya dağıtılmış sargı olabilir ve bobin açıklığı, istenen zıt EMK'nın tepe genişliğine bağlı olarak tam adım veya kısa adım olabilir.



**Şekil 1.1: Oluk Sayısı 6 ve Kutup Sayısı 4 Olan 3 Fazlı FDA Motor**

Fırçasız DA motoru (FDAM), trapezoidal zıt EMK dalga şekline sahip olup, sürücü teknolojisi kullanılarak zıt EMK ve akım dalga şeklinin istenilen karakteristik değerleri elde edilecek şekilde gerçekleştirilir. Yapısının basit olmasına rağmen düşük devir sayılarında hız ve moment değerleri fırçasız AA motorlarına göre daha dalgalıdır. FDAM konvansiyonel doğru akım motorlarının karakteristiğine benzer performans özelliğine sahip olmalarına karşılık, komütasyonun gerçekleştirilmesi için rotor konum algılayıcılarına gereksinim duyarlar.

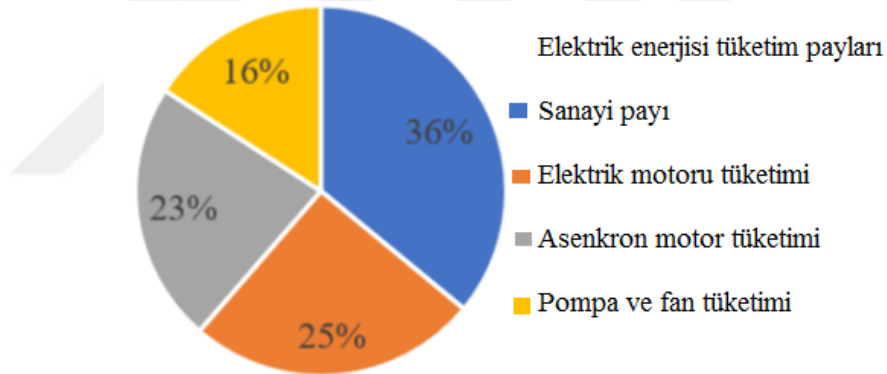
FDAM, aslında daimi mıknatıslı senkron bir motordur (DMSM). Daimi mıknatıslı senkron motordan farkları, sadece hava aralığı akı dağılımı ve zıt emk dalga şeklinin trapezoidal (yamuksal) olmasıdır. Motorda fırça-kollektör yapısının olmaması ark oluşumunu engellemektedir. Bu durum, FDAM'nin ömrünü uzatmaktadır ve bakım maliyetini düşürmektedir. Güç elektroniği devresinde

gerçekleşen ideal olmayan komütasyondan dolayı vuruuntu momenti oluşur. Akustik gürültü ve titreşimler de bu motorların dezavantajlardandır [1].

**Çizelge 1.1: DMSM ve FDAM'nin Uyarıtım ve Zıt EMK Dalga Şekillerine Göre Karşılaştırılması**

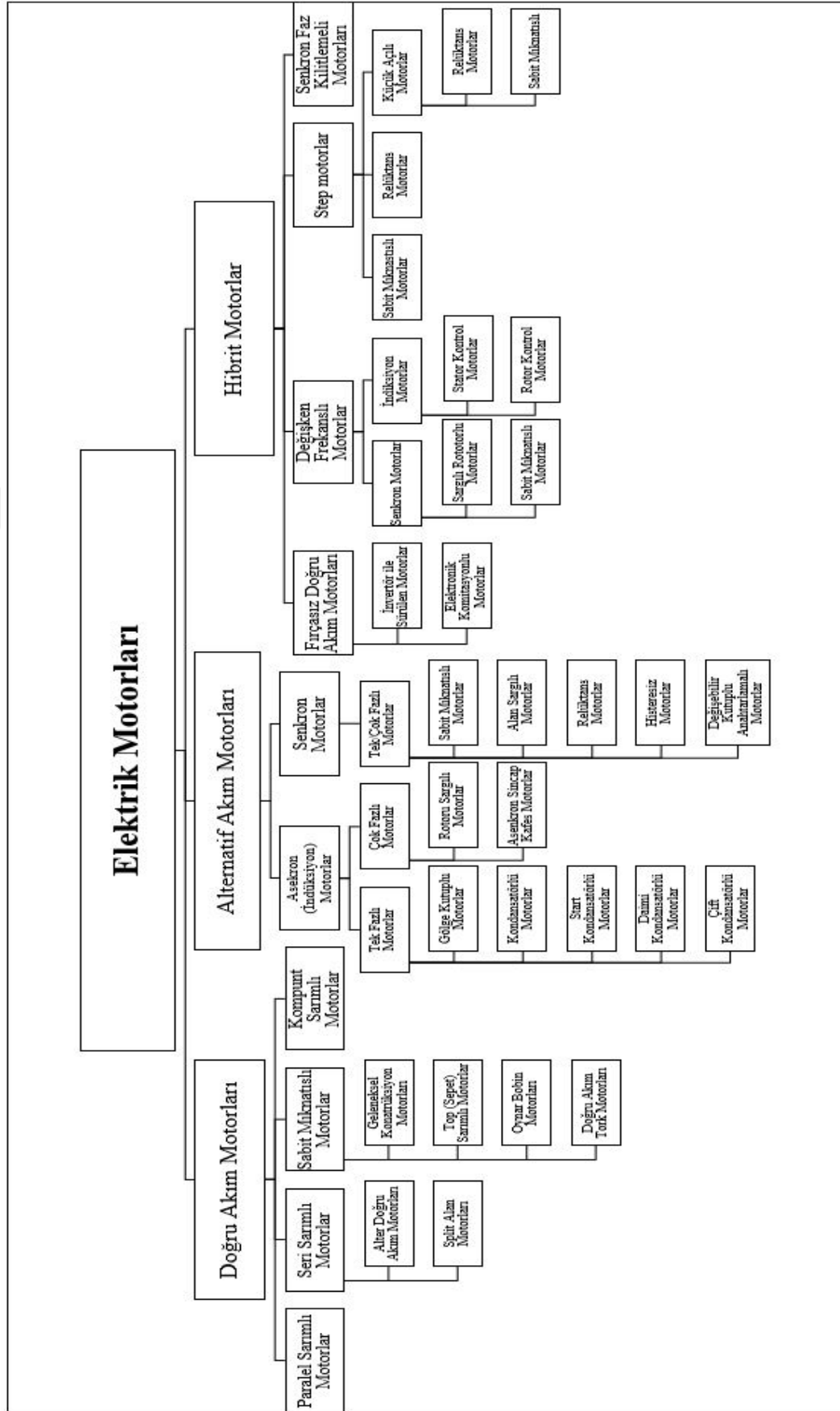
|                                     | DMSM       | FDAM                          |
|-------------------------------------|------------|-------------------------------|
| Kontrol tekniği                     | Sinüsoidal | Trapezoidal (ikizkenar yamuk) |
| Akı yoğunluğu ( Wb/m <sup>2</sup> ) | Sinüsoidal | Trapezoidal                   |
| EMK                                 | Sinüsoidal | Trapezoidal                   |
| Güç ve moment                       | Sabit      | Sabit                         |

Ülkemizde, endüstride kullanılan motorların yüzde 22'si sirkülasyon-fan motorları, yüzde 29'u pompa motorları, yüzde 7'si kompresör motorları ve yüzde 42'si diğer (taşıma, talaşlı imalat, eklemeli imalat, enjeksiyon, konveyör, vinç vb.) kullanım alanı olmak üzere dörde ayrılmaktadır [2]. Şekil 1.2'de motorların sektörlere göre harcadığı elektrik enerjisi tüketim payları verilmektedir.



**Şekil 1.2: Motorların Sektörel Olarak Harcadığı Elektrik Enerjisi Payları**

Türkiye'de hali hazırda kullanılan motorların yaklaşık %80'ini asenkron motorlar oluşturmaktadır. Bu motorlar düşük enerji verimliliği sınıfında yer almaktadır. Yüksek verimli motorlar kullanmak; daha uzun ömür, daha az enerji kaybı ve daha az ısı ve titreşim demektir. Yüksek verimli motorların seçimi, değişken hızlı sürücü ile çalıştırma, uygun sistem modeli, doğru çalıştırma, bakımların doğru yapılması gibi önlemler alındığında, dünya çapında %10'luk bir enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir [3].



Şekil 1.3: Elektrik Motorları Sınıflandırılması AC, DC, Hibrit Motorlar

Şekil 1.3.’te motorların genel bir sınıflandırmasına yer verilmektedir. Bu sayede FDAM’larının elektrik motor yapıları içinde nerede bulunduğu hakkında bir fikir verebilir. Fırça ve kollektör yapısı nedeni ile, korozyon ve arklara maruz kalan DC motorlar yerini verimi yüksek, performanslı, gürültüsüz fırçasız tipte DC motorlara bırakmaktadır.

### **Çizelge 1.2: FDAM ve Fırçalı DA Motor Arasındaki Farklar**

#### **Fırçalı Ve Fırçasız DC Motorlar Arasındaki Fark:**

| <b>ÖZELLİK</b>                             | <b>FIRÇASIZ DC MOTOR</b> | <b>FIRÇALI DC MOTOR</b>           |
|--------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Komütasyonlar<br>(Anahtarlama mekanizması) | Elektronik Komütasyon    | Mekanik Komütasyon                |
| Bakım                                      | Az                       | Sürekli                           |
| Verim                                      | Yüksek                   | Düşük-Orta                        |
| Termal performans                          | Daha iyi                 | Kötü (düşük)                      |
| Hız sınırı                                 | Yüksek                   | Düşük                             |
| Elektrik gürültü                           | Düşük                    | Yüksek                            |
| Hız / Moment<br>karakteristikleri          | doğrusal                 | Yüksek hızlarda<br>momenti azalır |
| Çıkış gücü                                 | Yüksek                   | (Orta-Düşük)                      |
| Ömür                                       | Uzun                     | Kısa                              |
| Üretim Maliyeti                            | Pahalı                   | Fırçasız'a göre ucuz              |
| Kontrol                                    | Karmaşık ve pahalı       | Basit ve ucuz.                    |

### **1.1 Literatür Özeti**

Daimi mıknatısın ve doğru akım motorunun birleştirilmesi ile ilgili yapılan ilk çalışmalardan biri 1985’de Kenjo T. ve Nagamori S.’nin “Sabit Mıknatıs ve Fırçasız Doğru Akım Motoru” başlıklı makalesidir.

Endüstriyel anlamda ilklerden olan fırçasız doğru akım motorunun, mikrodenetleyici yardımı ile sensörsüz kontrolünün uygulanması çalışmasıyla Jianwen Shao 2005’te makalesini yayınlamıştır. Yayınladığı “Gelişmiş Mikrodenetleyici Tabanlı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ” başlıklı makalesinde FDAM sensörsüz çalışma esaslarını incelemektedir.

2005 yılında YILMAZ, FDAM'nun tasarımında sonlu elemanlar analizini kullanarak; sensörsüz kontrolcüde sıfır geçiş noktası yöntemini uyguladığı doktora tezi olan” Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması” başlıklı makalesi ile FDAM ‘nin yeni bir yaklaşımla kontrolü konusunun incelendiği anlaşılmaktadır.

FDAM’da kullanılan daimi mıknatısların üretim aşamaları ve sınıflandırılması metalürji ve malzeme bilimi açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Enerji verimliliği yüksek, hafif, sağlam bir mıknatısın tasarımını ele alan, 2010 yılında Gutfleisch O., Willard A.M., Brück E., Ping Liu J. tarafından yazılan “21.Yüzyılda Manyetik Malzemeler ve Cihazlar” başlıklı makalede iyi bir daimi mıknatısın üretim aşamaları ele alınmaktadır.

Vuruntu momentinin en aza indirilmesi FDAM için önemli bir konudur. PWM tekniği kullanılarak vuruntu momentinin en aza indirilebileceğini uygulama üzerinden gösteren makale olan “Fırçasız Doğru Akım Motorunda PWM Anahtarlama Stratejisi Kullanarak Vuruntu Momentinin Minimize Edilmesi” başlıklı çalışma 2011 yılında Salah W. A. ve Ishak K . J. tarafından yazıldı.

PID kontrolcüsünün FDAM’de etkin kullanımını ve olası hataların en aza indirildiğini gösteren çalışmalardan biri de A. TABAK’ ın 2020’de Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi’nde yayımladığı “Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID/PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi” başlıklı makalesidir.

Toz halindeki materyalden daimi mıknatısların üretiminin ele alındığı “Permanent magnets and its production by powder metallurgy “ başlıklı makalesiyle E. LALANA daimi mıknatısların üretim aşamalarını ele almaktadır.

B. AKIN ve M. BHARDWAJ’ ın “Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors” başlıklı makalesi, alan etkili sensör ile tasarlanmış fdam’ nin trapezoidal sinyal ile kontrolüne yönelik bir çalışmadır.

E. TACER’ in “Elektromekanik Enerji Dönüşümü ” isimli kitabı elektrik motorları için bir çok tanımlama ve formülleri içermektedir.

Bu tez çalışmasında, küçük güçlü FDAM’nun yapısal modeli referans alınarak sonlu elemanlar analizi yapıldı. Ele alınan motorun değerleri dikkate alınarak MATLAB/SIMULINK ortamında model çalışması gerçekleştirildi. Sanal

ortamda elde edilen statik ve dinamik sonuçlar verim bakımından irdelendi. Motor parametrelerinin aynen korunarak gerçek bir seri üretim daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun laboratuvar ortamında test edilmesi ile pratikte elde edilen sonuçlar ile model çalışmalarından çıkartılan sonuçların kıyaslanmasını bu tez çalışmasında gözlemlemek mümkün olmaktadır.



## 2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN YAPISI

Fırçasız doğru akım motorlarının bütün kısımları bu parça altında ele alınacaktır. Manyetizmanın gelişimi, malzemelerin sınıflandırılması, motorun yapısı ve kullanım alanlarına göre motor yapıları bu kısımda ele alınacaktır. FDAM' nun çalışma karakteristiği ,küresel market değerleri de ele alınacaktır. Ayrıca elektrikli araç piyasasında kullanılan diğer motorlarla FDAM' nin verim -fiyat karşılaştırılması yapılacaktır.

### 2.1.Mıknatıs ve Manyetizmanın Genel Tanımı

Tarihsel olarak manyetizma bundan yaklaşık 2500 yıl önce şimdiki Türkiye'de Manisa'da (Magnesia) magnetite ( $Fe_3O_4$ ) adı verilen madde sayesinde keşfedilmiştir. Magnetite erken tarihi belirsizdir. Ancak demirin çekme gücü o zamanlar kesinlikle biliniyordu. Antik dünyada en bol yataklar, günümüzün modern Türkiye'sinde bulunan Magnesia'nın geniş bölgesinde bulunuyordu ve magnetite kelimesi, bu bölgenin adından geldiği söylenen benzer bir Yunanca kelimeden türetilmiştir. Yunanlılar, bir demir parçasına dokunulduğunda veya manyetite ile ovulduğunda kendisinin manyetik hale geleceğini de biliyorlardı. Antik Yunan'daki sözcük günümüze magnet olarak gelmiştir [4]. Türkçe'de ise mıknatıs anlamında kullanılmaktadır.

Manyetizmayla ilgili ilk gerçek bilimsel çalışma, 1600 yılında klasik kitabı Mıknatıs Üzerine'yi yayınlayan İngiliz William Gilbert (1540-1603) tarafından yapıldı. Mıknatıs taşları ve demir mıknatıslarla deneyler yaptı, Dünya'nın manyetik alanının net bir resmini oluşturdu ve konuyu bulanıklaştıran birçok batıl inancı ortadan kaldırdı. Gilbert'ten sonraki bir buçuk yüzyıldan fazla bir süre boyunca, mıknatısların üretiminde birçok pratik gelişme olmasına rağmen, temel öneme sahip keşifler 19.yüzyıl başlarına kadar maalesef yapılmadı[5].

Malzemelerin manyetik alan geçirgenliğine göre sınıflandırılması ve tepkileri Çizelge 2.1'de verilmektedir.

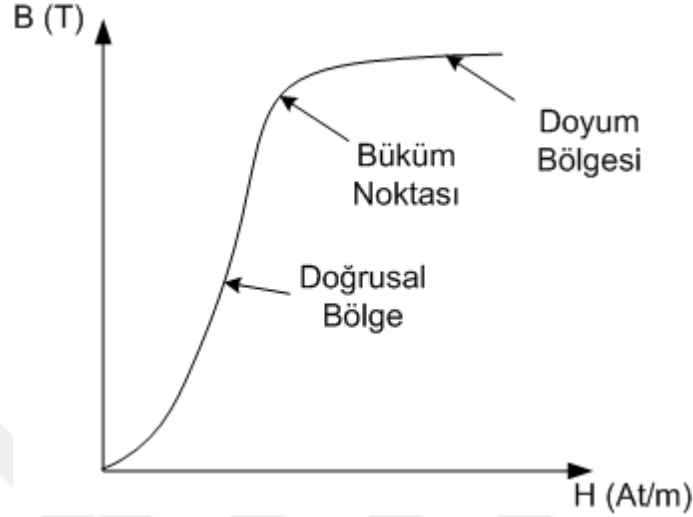
**Çizelge 2.1 Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması**

| Manyetik malzeme sınıfı | Özelliği                                                                                                                                                                                                          | Manyetik alan kuvvet çizgileri                                                         | Malzeme                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diyamanyetik malzeme    | Cisme manyetik alan uygulandığında elektronların hareketine etki eder. Manyetik alanın tersi yönünde alan oluşur. Geçirgenlikleri 1'e yakın ve küçüktür.                                                          | Zıt yöndedir. Manyetik alanı zayıflatırlar.                                            | Bakır, gümüş, kalay.                                                                                                                                                                    |
| Paramanyetik malzeme    | Cisme manyetik alan uygulandığında elektronların hareketine etki eder. Manyetik alanın aynı yönünde oluşur. Geçirgenlikleri 1'den büyük ve yakındır.                                                              | Aynı yöndedir. Manyetik alanı kuvvetlendirirler. Sıcaklık ile manyetik vektör bozulur. | Alüminyum, kalsiyum, platin.                                                                                                                                                            |
| Ferromanyetik malzeme   | Birçok farklı yönde manyetik bölgeleri vardır. Manyetik alana maruz kaldıklarında manyetik alanla aynı yönetime geçerler. Manyetik alan kalktığında mıknatıslanma özelliği devam eder. Geçirgenlikleri yüksektir. | Aynı yöndedir. Mıknatıslanma oluşur. Sıcaklık ve darbeler ile manyetik alan değişir.   | Sert ferromagnetler daimi mıknatıslardır. AlNiCo, FeCrCO, NdFeBo, SmCo alaşımlarından oluşur.                                                                                           |
|                         |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                        | <u>Yumuşak ferromagnetler</u> , elektrik motorları, trafolar ve bobinlerin nüvelerinde bulunur. Kolay mıknatıslanır ve çözülürler. Saclar sert haddeleme ile üretilirler. Fe-Si, çelik. |

### 2.1.1 BH Eğrisi (manyetizasyon-demanyetizasyon eğrisi)

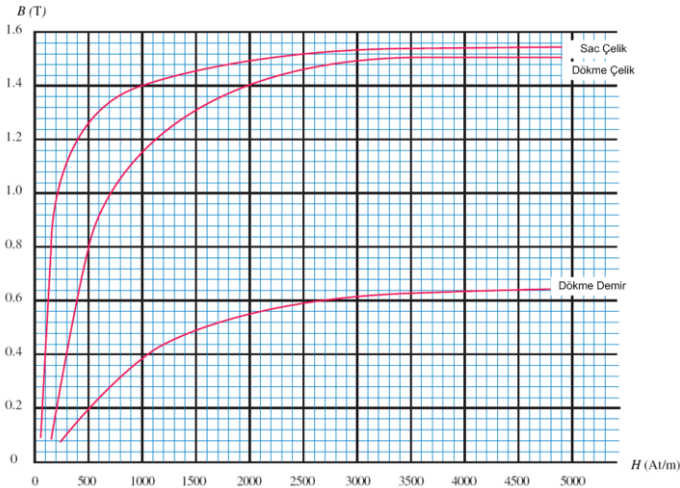
Bir cisim manyetik alan şiddetine maruz kaldığında (H) oluşan manyetik akı yoğunluğunun(B) değişimini gösteren grafik BH grafiği olarak adlandırılır. Şekil 2.1

incelendiğinde B ve H'nin eşit olarak arttığı bölge doğrusal bölgedir. Manyetik akının ve kuvvetin az artış gösterdiği bölge dirsek (büküm) bölgesidir. Ferromanyetik malzemenin doyuma ulaştığı bölgede H değeri ne kadar arttırılırsa da B değerinde değişim olmaz [6].



**Şekil 2.1: BH Eğrilerinin Genel Yapısı**

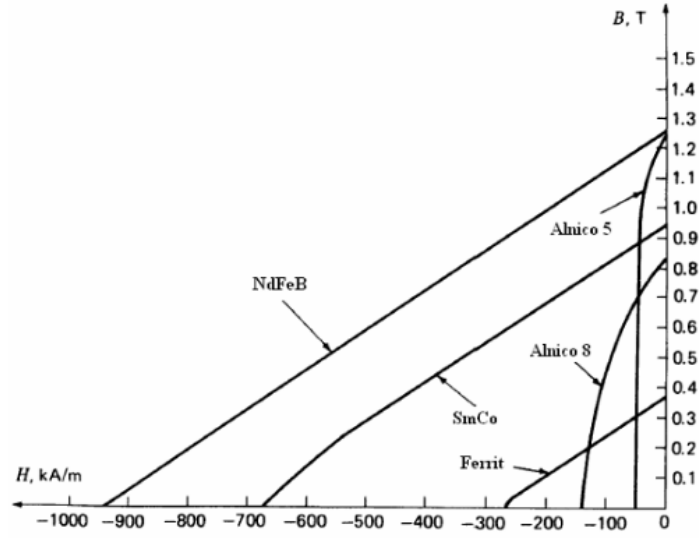
Manyetik geçirgenliği yüksek, ferromanyetik bir malzeme olan demir manyetik bir alana maruz kaldığında manyetik alan kuvvet çizgileriyle aynı yönlü bir dizilim gösterir. Şekil 2.2'deki işlenmiş çelik malzemelerin, işlenmiş demir malzemeden daha iyi bir manyetizasyona sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 2.2: Sac Çelik, Dökme Çelik ve Dökme Demire Ait B-H Eğrisi**

FDAM'da demanyetizasyon, rotordaki daimi mıknatısların oluşturduğu akının stator sargılarındaki akının etkisiyle var olan manyetik alanı azaltması durumudur. Daimi mıknatıs malzemelerin demanyetizasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.3' de verilmektedir. Özellikle elektrikli araçlarda bu etkiyi azaltmak

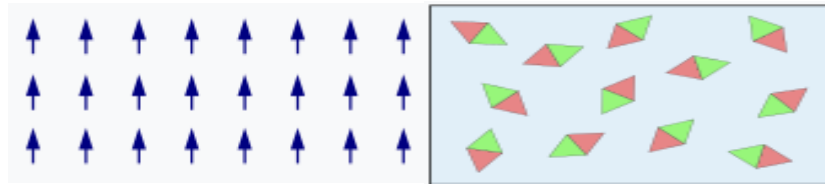
için sargılardaki endüvi akımını maksimum akım değeri altında sınırlamak gerekir [7].



**Şekil 2.3: Daimi Mıknatısların Rotor Sargılarına Bağlı Olarak Oluşturduğu Demanyetizasyon Eğrisi [8]**

### 2.1.2. Curie sıcaklığı

1832'de Pouillet nikel, demir ve kobalt gibi ferromanyetik maddelerin belirli bir sıcaklıktan sonra manyetik geçirgenliğinin sınırlandığını keşfetmiştir. 1895'te Pierre Curie “ferromanyetik malzemenin belirli bir sıcaklıktan sonra paramanyetik malzeme gibi davrandığı” fenomenini öne sürmüştür. Curie sıcaklığından sonra cismin manyetik momentinde rastgele yönelmeler gerçekleşir. [9]



**Şekil 2.4: Curie Sıcaklığının Altındayken ve curie Sıcaklığı Üstündeyken Manyetik Moment**

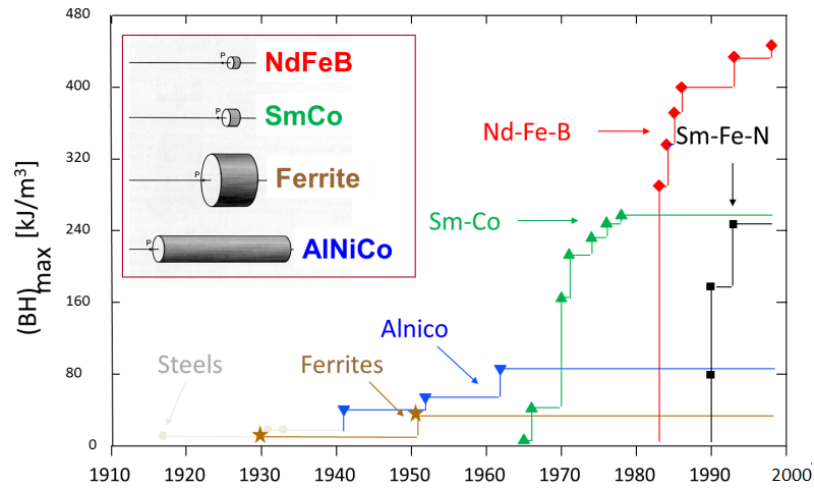
**Çizelge 2.2: Neodimyum Demir Bor Mıknatıslara (NdFeB) Ait Çalışma Sıcaklıkları [10]**

| Neodimyum Mıknatıs Sınıfı | Max. Çalışma sıcaklığı | Curie Sıcaklığı |
|---------------------------|------------------------|-----------------|
| N                         | 80°C                   | 310°C           |
| M                         | 100°C                  | 340°C           |
| H                         | 120°C                  | 340°C           |
| SH                        | 150°C                  | 340°C           |
| UH                        | 180°C                  | 350°C           |
| EH                        | 200°C                  | 350°C           |
| AH                        | 230°C                  | 350°C           |

## 2.2 Daimi Mıknatıslar

Geçici mıknatıslar, daimi mıknatıslar ve elektromıknatıslar da dahil olmak üzere birden fazla mıknatıs türü vardır. Daimi mıknatıslar günlük yaşam uygulamalarında önemli bir rol oynar ve yaygın olarak kullanılır. Çok düşük maliyetleri, erişilebilirliği ve yüksek kimyasal stabiliteleri nedeniyle tercih edilirler. Sert ferritlerin nispeten kırılganlık özelliklerine sahip olmaları bir dezavantaj olmasına rağmen, daimi mıknatısların endüstride kullanımı baskındır [11].

FDAM'lerde kullanılan sert ferromanyetik malzeme olan daimi mıknatıslar nadir toprak elementleri ve nadir olmayan toprak elementleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Samaryum kobalt (SmCo) ve neodimyum demir bor (NdFeB) nadir toprak elementleri sınıfındadır. Alüminyum nikel kobalt (AlNiCo) ve sitronsiyum ferrit (seramik) ise nadir olmayan daimi mıknatıs sınıfındandır. Şekil 2.5 bu elementlerin tarihsel gelişimini göstermektedir [12].



**Şekil 2.5: Kalıcı Mıknatısların Gelişimsel Tarihi**

İyi bir daimi mıknatıs üretmek için çeşitli yöntemler vardır. Toz metalurjisi işlemlerinin çoğu, elementlerin saf formlarında veya bileşikler halinde karıştırılmasıyla başlar. Bu durumda, tanımlanan bileşime ulaşmak için elementler gerekli yüzdelerde eklenir. Alüminyum-nikel-kobalt (Al-Ni-Co) mıknatıslar ve seramik mıknatıslar için durum budur. Ancak hem nadir toprak mıknatısları samaryum-kobalt (Sm-Co) hem de neodimyum-demir-bor (Nd-Fe-B) bazılarının yüksek reaktivitesi nedeniyle saf elementlerden üretilebilir. Bu nedenle, bir külçenin dökümü ardından mekanik kırma veya hidrojenin zayıflatılması gerekir ve daha sonra elde edilen tozların manyetik olarak aynı yönde hizalanması ve preslenmesi ile üretilir. Daimi mıknatıs yoğunluğunu arttırmak ve boşlukları önlemek için ısı ve elektrik akımı yardımıyla sinterleme işlemi yapılır. [13]

**Çizelge 2.3: Kalıcı Mıknatısların Karşılaştırılması [20]**

|                         | En düşük                          | Düşük  | Yüksek                            | En yüksek                         |
|-------------------------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Maliyet                 | Ferrit                            | Alnico | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | SmCo                              |
| Enerji üretimi          | Ferrit                            | Alnico | SmCo                              | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> |
| Çalışma sıcaklığı       | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | Ferrit | SmCo                              | Alnico                            |
| Korozyon direnci        | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | SmCo   | Alnico                            | Ferrit                            |
| Demanyetizasyon direnci | Alnico                            | Ferrit | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | SmCo                              |
| Mekanik mukavemet       | Ferrit                            | SmCo   | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | Alnico                            |
| Isı katsayısı           | Alnico                            | SmCo   | Nd <sub>2</sub> FeB <sub>14</sub> | Ferrit                            |

### 2.2.1 Daimi mıknatıslarda kayıplar

Çelik, Nikel, Demir gibi ferromanyetik özellik gösteren bazı maddeler dışardan manyetik alana sokulduğunda geçici ya da kalıcı olarak mıknatısiyet sergilemektedirler. Bu durum mevcut manyetik alana ters bir şekilde gerçekleştiğinden ötürü FDAM üzerinde moleküler düzeyde sürtünme, kendisini ısı,

yani joule kaybı olarak gösterir. Histerezis kaybı olarak adlandırılan bu durum pratikte FDAM'nin verimini düşürmektedir [14]. Sırası ile histerezis kaybı ve fuko kayıpları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$P_h = G \cdot k_h \cdot B_m^n \cdot f^2 \quad (2.1)$$

$$P_f = G \cdot k_h \cdot B_m B_m^2 \cdot f^2 \quad (2.2)$$

$P_h$ : kütle başına düşen histerezis güç kaybı (W/kg)

$G$ : malzemenin kg cinsinden ağırlığı

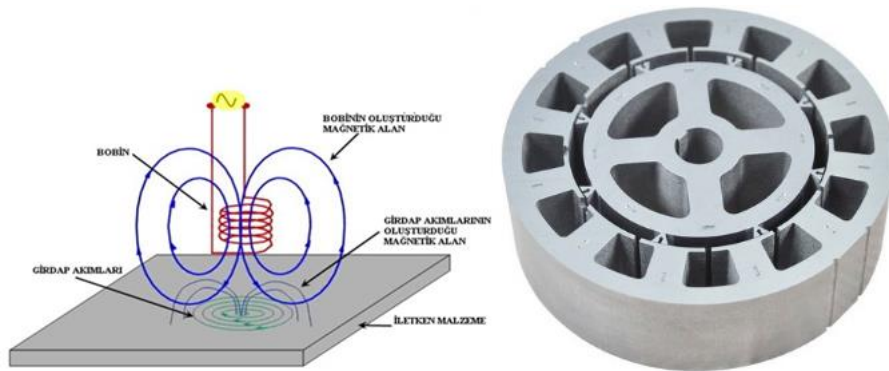
$k_h$ : malzemenin kalınlığı ve cinsine göre değişen katsayı

$B_m$ : manyetik alanın en yüksek değeri (T)

$n$ : malzemenin cinsine göre 1,5 ila 1.8 arasında değişen sabit katsayı

$f$ : frekans (Hz)

FDAM 3 faz stator sargılarında değişken alternanslı akıma bağlı olarak; iletken malzemede manyetik alana dik oluşan bir manyetik alan akısı meydana gelir. Eddy (girdap) akım kaybı olarak adlandırılan bu kayıp rotorda kendini ısınma olarak gösterir. Rotor dönüşü nedeniyle, zamana bağlı bu manyetik akı yoğunluğu, iç rotor yüzeyine monte edilmiş daimi mıknatistaki eddy akım kayıplarının kaynağıdır. Bu kayıpları en aza indirmek için rotor ve statorda ince yalıtılmış çelik sac malzeme kullanılmalıdır. Bu saclar yalıtkan bir malzeme ile kaplandıktan (laminasyon) sonra presleme yapılarak monte edilmelidir. [15-16].



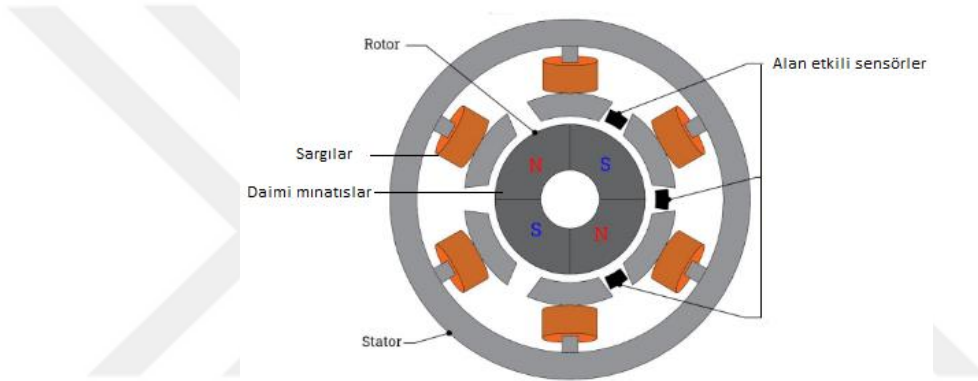
**Şekil 2.6: Eddy Kayıplarının Oluşumu ve Lamine Edilmiş Rotor Stator Sac Çelikleri**

Eddy akım kayıpları hesaplanırken manyetik alan, frekans, malzemenin kütlesi, cinsi, direnci gibi parametreler göz önüne alınmaktadır [17]. Yukarıda

tanımlanan kayıpların dışında rotor hareketi esnasında yatak, rulmanlardan kaynaklı sürtünme kayıpları oluşur. Dengesiz yüklerde titreşim ve ısı artabilir. Soğutma amaçlı kullanılan vantilatörler de ayrıca yük gibi çalıştığından bir miktar sürtünme kayıplarına neden olmaktadır.

### 2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı ve Çeşitleri

FDAM stator yapısında 3 adet eşit dirence ve endüktansa sahip sargılardan oluşmaktadır. Bu sargılar genellikle yıldız olarak bağlanmıştır. Rotorda ise preslenmiş ince sac bir materyalin etrafında sıralanmış daimi mıknatıslar bulunur. Herhangi iki fazın enerjilendirilmesi rotorun anlık hareketi için yeterlidir [22].



Şekil 2.7: FDAM'nun Temel Yapısı

Ayrıca iç rotorlu FDAM'nin mıknatıs yerleşimine göre çeşitleri de Şekil 2.8.'de gösterilmektedir.

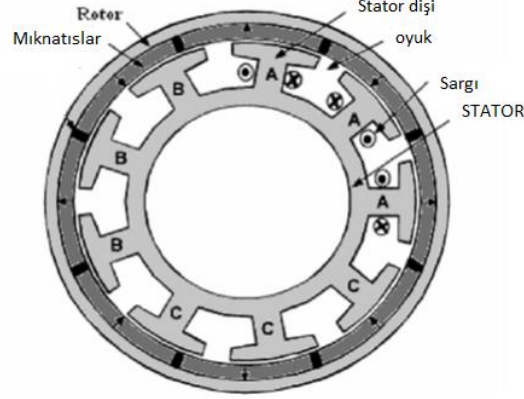


Şekil 2.8: Mıknatısın Yerleştirilmesine Göre FDAM Yapıları

Daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları üç farklı tipte incelenmektedir: Dış rotorlu, iç rotorlu, disk tipi FDAM yapıları şeklindedir.

### 2.3.1. Dış rotorlu FDAM

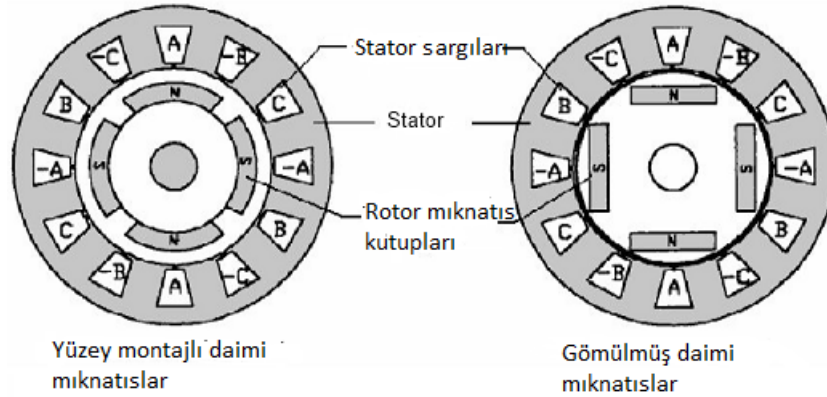
Motorun stator sargıları çekirdekte yani iç kısımda bulunur. Rotor üzerindeki daimi mıknatıslar, stator sargılarını çevrelemiştir. Bu daimi mıknatıslar rotora gömülüdür. Stator ve rotor yapısı fırçalı DC motorun yapısına benzer. Bu motorlar yüksek ataletle sahiptir ve iç rotorlu yapıya nazaran stator sargılarının soğutulması daha kolaydır [26]. Şekil 2.9.'da dış rotorlu FDAM yapısını gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Dış Rotorlu FDAM

### 2.3.2 İç rotorlu FDAM

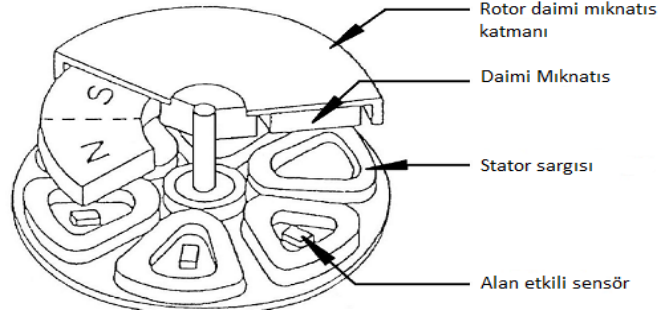
Şekil olarak temelde senkron ve asenkron motorlarına benzemesine rağmen sargı yapısı farklıdır. Dış rotorlu FDAM'dan daha verimlidir ancak momenti daha düşüktür, belirli hızlardan sonra momentleri düşmektedir.



Şekil 2.10: İç Rotorlu FDAM

### 2.3.3. Disk tipi FDAM

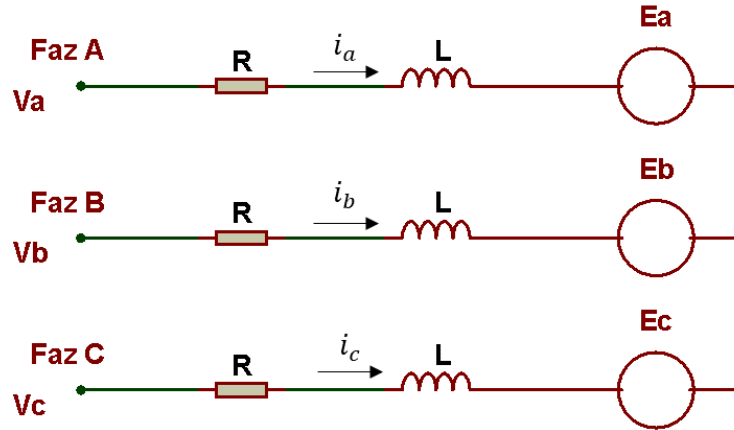
Disk tipi FDAM düşük güç ve düşük hız istenilen uygulamalarda kullanılır. Düşük hız yüksek moment istenildiğinde motor oldukça verimlidir. 1000devir/dakika değerinden sonra soğutma problemleri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.11: Disk Tipi FDAM

#### 2.4. FDAM'nun 1 Faz Eşdeğer Devresi

Şekil 2.12 incelendiğinde bu devrede  $V_a$  faz gerilimini (V),  $i_a$  (A) devrenin faz akımını,  $R_a$  ( $\Omega$ ) faz direncini ve  $L_a$  (H) faz endüktansını göstermektedir.  $E_a$  (V) ters EMK gerilimini,  $T_{em}$  elektromanyetik momenti (Nm),  $J$  rotor atalet momentini ( $\text{kg.m}^2$ ),  $B$  motor sürtünme katsayısını ( $\text{kg.m.s / rad}$ ),  $w$  (rad/s) açısal hızı,  $p$  motorun kutup sayısını göstermektedir.



Şekil 2.12: FDAM'nun 3 Faz, Yıldız Bağlı Eşdeğer Elektrik Devresi

Sargı dirençlerinin, öz endüktansının, ortak endüktansının her bir fazda eşit ve sabit olduğunu kabul edersek formül aşağıdaki şekildedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad (2.4)$$

$$T_{em} = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_L \quad (2.5)$$

$$Ea=K_e.w \quad (2.6)$$

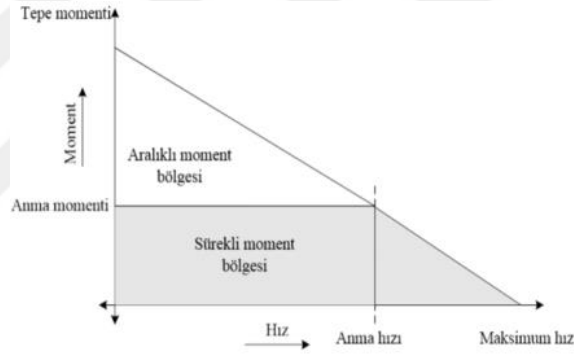
$$Tem=K_t.i_a \quad (2.7)$$

$$P\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.8)$$

Burada  $Ke$  zıt EMK sabitini,  $Kt$  motorun moment sabitini göstermektedir. Bu değerler FDAM'nun manyetik alan kuvveti ve bobin sarım sayısı gibi fiziksel özelliklerini barındırır [19].

## 2.5. FDAM'nun Hız ve Moment Karakteristiği

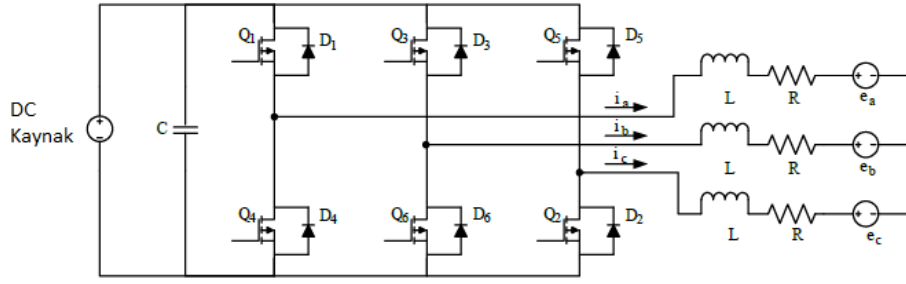
FDAM doğrusal bir hız-moment karakteristiğine sahiptir. Nominal hıza kadar daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motorundan sabit bir moment alınabilir. Bunun üstünde bir moment almak istendiğinde motor, kesintili moment üretme bölgesine geçer. Nominal hızın üstüne çıkıldıkça üretilen moment sabit bir şekilde azalır.



**Şekil 2.13: FDAM Hız-Moment Karakteristiği**

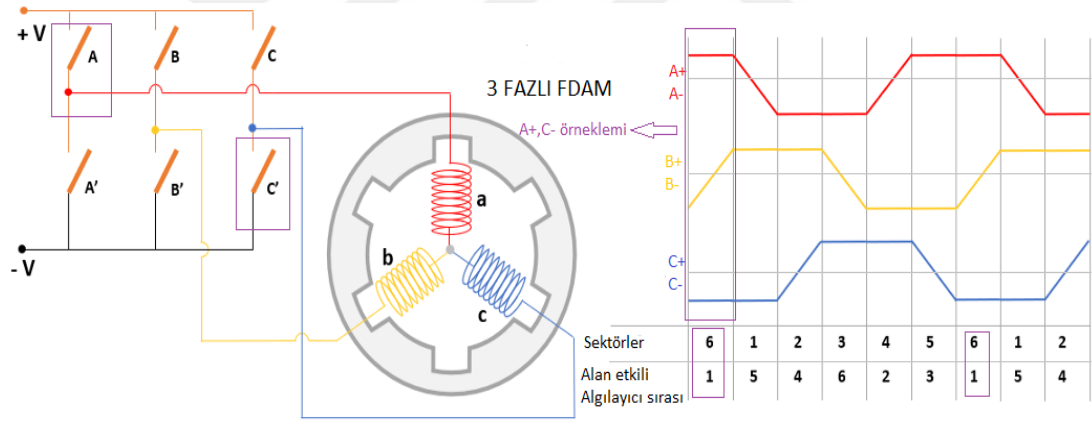
## 2.6. Daimi Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Çalışması

Pozisyon (konum) algılayıcı olarak kullanılan sensörlerden alınan konum verileri bir denetleyici yardımıyla karşılaştırılarak; anahtarlama elemanlarının sıralı bir şekilde motoru sürmesiyle komütasyon işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.14.'de bir güç elektroniği devresiyle fırçasız doğru akım motorunun sürülmesine ilişkin bir devre yapısı gösterilmektedir.



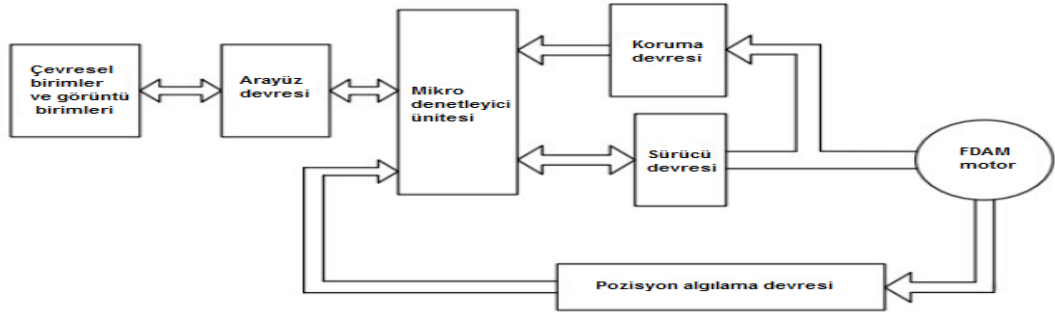
**Şekil 2.14: MOSFET ile Yapılmış Altı Adımlı Bir Evirici-Sürücü Modeli ve FDAM**

Motorun herhangi iki sargısına sıralı bir şekilde yapılan komütasyon örneğinde A fazının + alternansında oluşturulan evirici sinyali ile beraber C fazının (-) alternansında oluşturulan evirici sinyal aynı anda sargılara uygulanmaktadır. Daimi mıknatısların N-S kutupları sayesinde itme-çekme hareketi eş zamanlı olarak devam etmektedir. Alan etkili pozisyon algılayıcılarından alınan bilgilere göre bu komütasyon devam etmektedir [25].



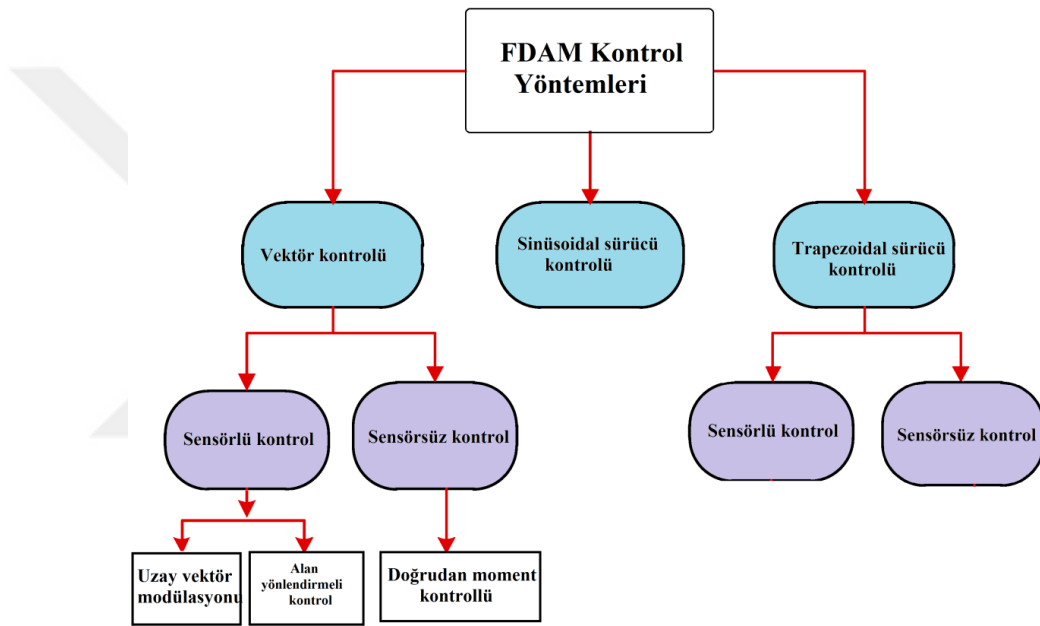
**Şekil 2.15: Üç Fazlı FDAM Komütasyon Örnekleme**

FDAM'lar klasik fırçalı DA motorlarına kıyasla uyartım için elektronik komütasyona ihtiyaç duyarlar. Burada komütasyon rotorun hareketi için yamuksal (trapezoidal) bir faz uyartımıdır. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte FDAM komütasyonunda güç elektroniği anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Bunlara birkaç örnek vermek gerekirse MOSFET, FET, IGBT gibi yarı iletken devre elemanlarıdır [23].



**Şekil 2.16: FDAM'nin Denetleyici ve Sürücü Devresi Blok Şeması**

FDAM kontrolünde kullanılan birçok yöntem vardır. Yaygın olarak kullanılan yöntem ise sensörlü trapezoidal sürücü kontrollü olanıdır.



**Şekil 2.17: FDAM Kontrol Yöntemleri [24]**

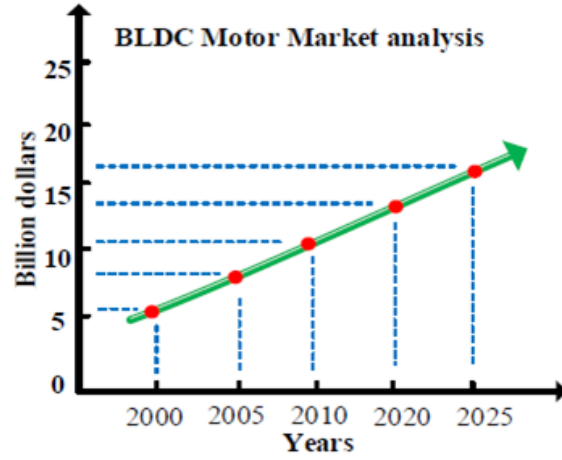
## 2.7. FDAM'nun Tarihsel, Teknolojik Gelişimi ve Uygulama Alanları

50 yıl önce T. G. Wilson ve P.H. Trickey FDAM motorlarını çalıştırmak için çeşitli deneyler gerçekleştirdi. 1983'de Demerdash farklı kalıcı mıknatıslar (Samaryum-Kobalt ve Ferrit) kullanarak aynı güçlü iki FDAM motor gerçekleştirmiştir. 1985'de Iizuka bir bilgisayar yardımıyla evirici devresi kullanarak geri besleme olmadan FDAM'nu çalıştırmıştır.

Son yıllarda FDAM motorların yoğun araştırılmaları sayesinde birçok alanda kullanıldığı görülmektedir. Bu motorlar aç, hız ve pozisyon istenilen yerlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Otomobil endüstrisi, insansız kara-hava-deniz araçları, otomasyon endüstrisi, savunma sanayii başlıca kullanım alanları sayılabilir [18].

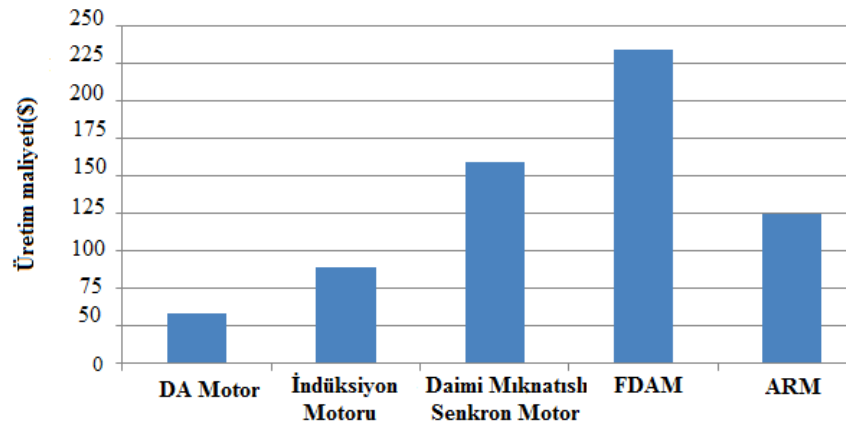
FDAM'na olan talebin önümüzdeki yıllarda daha da artacağı öngörülmektedir. Başta elektrikli araçlar olmak üzere pek çok uygulama alanında motorun hayati bir rol oynaması beklenmektedir. FDAM motorları küresel pazarda 2020 yılında tahmini olarak 10 milyar dolarlık bir hacme sahip olduğu bilinmektedir. Bu rakamın 2025 yılında 15,2 milyar dolara kadar çıkacağı tahmin edilmektedir [20].

FDAM yıllara göre satış grafiği Şekil 2.18' de gösterilmektedir. Bu grafiğe bakarak FDAM'nun dünya çapında endüstride değişken hız kontrol uygulamalarında kullanım alanı bulacağını söylemek kaçınılmazdır.



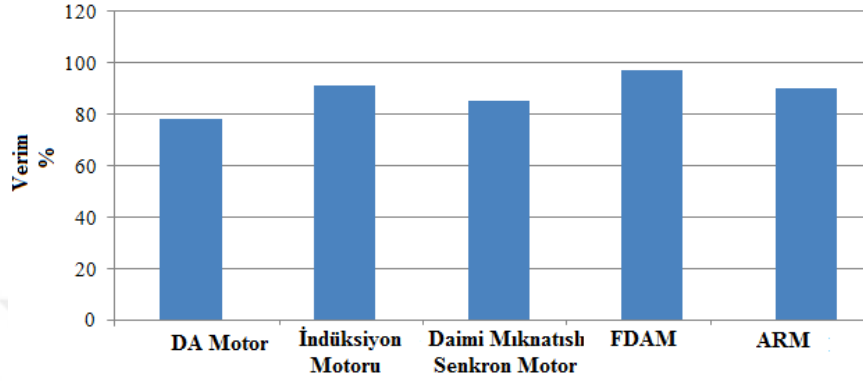
**Şekil 2.18: Piyasa Raporlarına Göre Oluşan FDAM Satış Analizi**

Elektrikli araçlarda kullanılan beş farklı motor için döviz cinsinden üretim maliyeti şekil 2.19.'da sunulmaktadır. Verilen şekilde üretim maliyeti en az olan motor doğru akım motorudur ve onu sırasıyla asenkron (indüksiyon) motoru, anahtarlamalı relüktans motoru, daimi mıknatıslı senkron motor izlemektedir. Verilen motorlar arasında üretim maliyeti en yüksek olan FDAM'dur.



**Şekil 2.19: Üretim Maliyeti Açısından Beş Farklı Motorun Karşılaştırılması**

Elektrikli araçlarda kullanılan farklı motor tipleri, verim açısından düşünüldüğünde FDAM en verimli motor olduğu şekil 2.20.'de verilmektedir. Boyut bakımından kıyaslandığında yüksek güç yoğunluğu üreten bu motor, verimli olmasına karşın elektronik olarak kontrol edilmesi ilave maliyet oluşturmaktadır [21].



**Şekil 2.20: Sunulan Beş Farklı Motorun Elektrikli Araçlardaki Verim Grafiği**

## **2.8 Küçük Güçlü Referans Motorun ANSYS/MAXWELL Programı ile Modellenmesi**

Sonlu elemanlar analizi (FEM) bir birimi daha küçük parçalara ayırarak daha detaylı ve daha büyük ölçekli bir çalışma imkanı sunar. Ansys /Maxwell programı yardımıyla FEM analizi yapılarak FDAM için daha kesin sonuçlar elde etmek mümkündür. Fiziksel parametrelerin değiştirilebilir olması, Ansys /Maxwell programını teknik anlamda çok pratik kılmaktadır.

## **2.9 Materyal ve Yöntem**

Bu kısımda referans olarak seçilen küçük güçlü seri üretim bir FDAM, Ansys /Maxwell programı yardımıyla sonlu elemanlar analizi kullanılarak, birebir ölçülerde fiziksel olarak modellenerek, belirli girdiler yardımıyla performans çıktıları gözlenmektedir. Giriş parametreleri güç, gerilim, motor dış ölçüleri, rotor daimi mıknatıs ölçüleri, sargı ölçüleri gibi değerler Ansys-Electronics Desktop 2019.R2 programı yardımıyla tanımlanmıştır. Referans motorun bütün ölçüleri ayrıca motorun deneysel olarak çalıştırılması kısmında ele alınacaktır.

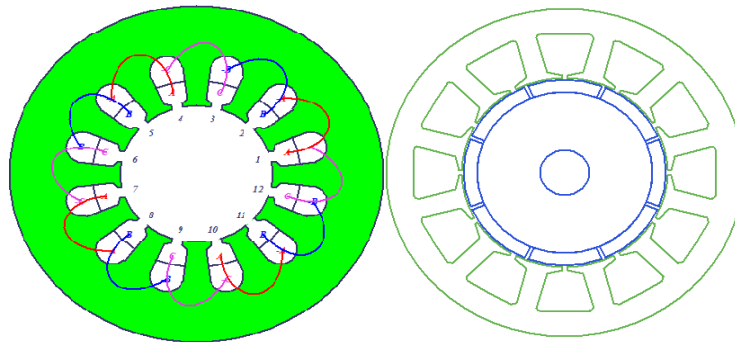
Aşağıdaki FDAM verileri, modelini yaptığımız gerçek motorun verileriyle aynıdır.

**Çizelge 2.4: Maxwell Programı FDAM Verileri**

| FDAM Fiziksel özellikleri             |             |
|---------------------------------------|-------------|
| Rotor mil uzunluğu (mm)               | 80mm        |
| Rotor çapı (mm)                       | 52.2 mm     |
| Rotor mil çapı(mm)                    | 15mm        |
| Stator dış çap uzunluğu(mm)           | 104.5 mm    |
| Motor gövde yüksekliği(mm)            | 55.2 mm     |
| Sargı oluk katman sayısı              | 2           |
| Rotor daimi mıknatıs kutup sayısı     | 8           |
| Stator sargı oluk sayısı              | 12          |
| Mıknatıs kalınlığı (mm)               | 3.8 mm      |
| Giriş gerilimi (v)                    | 40volt      |
| Rotor tipi                            | İç rotorlu  |
| Diyot ve transistor başına gerilim(v) | 2 volt      |
| Sürtünme ve vantilator kaybı (w)      | 12 watt     |
| Referans hız değeri (dev/dk)          | 3000 dev/dk |
| Çalışma sıcaklığı (C)                 | 75 °C       |
| Stator sargı çapı (mm)                | 0.92        |
| Daimi mıknatıs malzeme                | NdFe35      |
| Sargı bağlantısı                      | Yıldız      |
| Rotor İstifleme faktörü               | 0,97        |

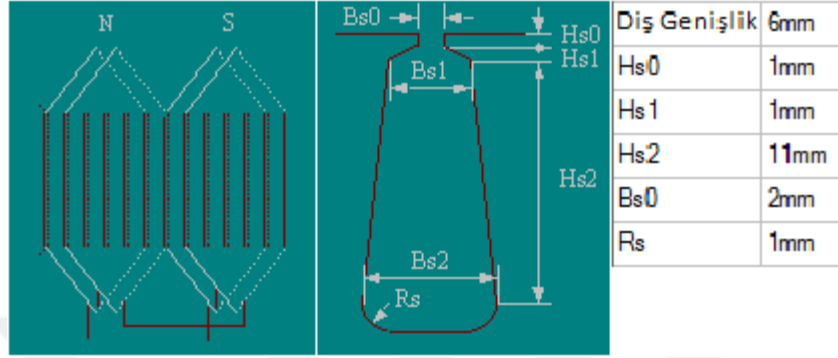
### 2.10 Stator Oluk ve Rotor Kutup Sayısı Seçimi

Verimi yüksek bir FDAM tasarlanmak isteniyorsa oluk/kutup kombinasyonu çok önemli bir faktördür. Hava aralığı akısı, vuruntu moment, elektromanyetik moment gibi motorun verimini etkileyen değerler optimum bir oluk/kutup kombinasyonunu zorunlu kılmaktadır [27]. Oluk-kutup seçimi bu kısımda referans motora sadık kalınarak 12/8 olarak seçildi. Faz sargıları çıkış uçları birleştirilerek yıldız bağlantı yapıldı. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi sargılar bir olukta 2 katman olarak sarılmaktadır.



**Şekil 2.21: FDAM Ansys Çift Katmanlı Sargı Yapısı ve İç Rotorlu Oluk/Kutup Gösterimi**

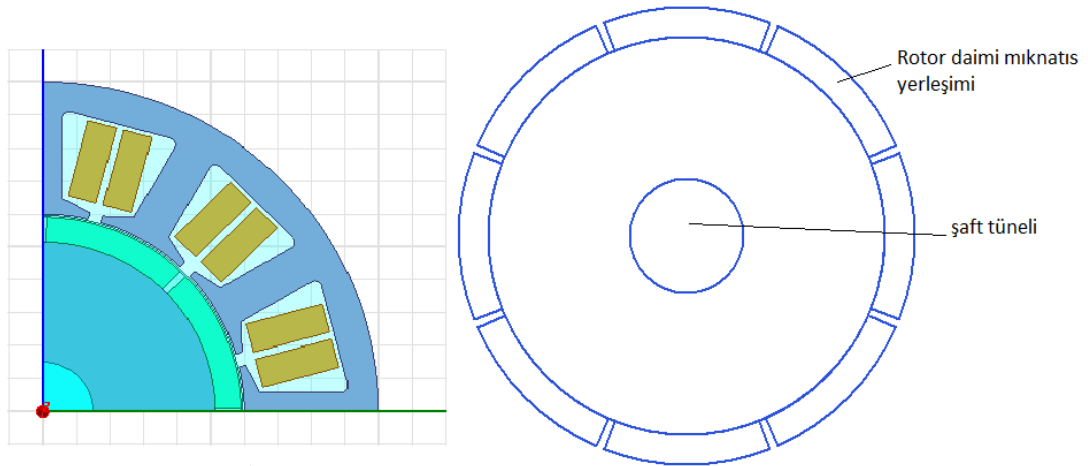
Motor iç rotorlu olarak tasarlanmaktadır. Motorun, rotor stator arası hava aralığı mesafesi 1mm olarak seçilmektedir. Her oluğa 0.92 mm çapında sargılar 17 kez sarılmıştır. Bir olukta N kutbu diğer olukta S kutbu oluşturacak şekilde sarım yapılmıştır. Stator oluk ölçüleri ve katmanlı sarım tekniği Şekil 2.22’de verilmektedir.



**Şekil 2.22: Motorun Katmanlı Sarım Tekniği Oluk Ölçüleri Ansys/Maxwell Gösterimi**

### 2.11 Rotorda Daimi Mıknatıs Seçimi

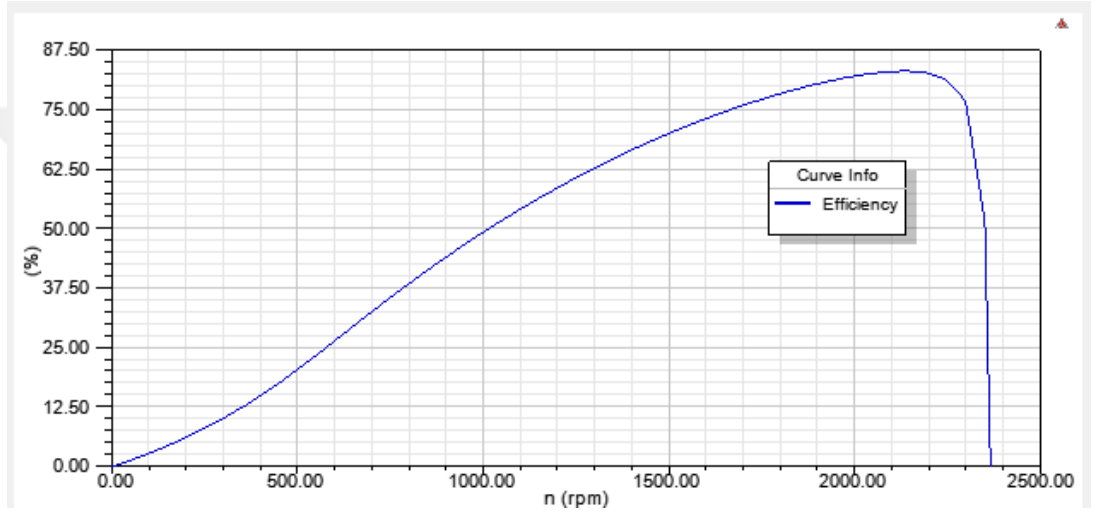
Daimi mıknatıs olarak yüksek akı yoğunluğuna sahip sıcaklığa ve demanyetizasyona karşı dayanıklı NdFe35 tipi mıknatıs seçilmiştir [28]. Stator boyunca uzanan 3.8 mm kalınlığında 8 adet daimi mıknatıs motora yerleştirilmektedir. Şekil 2.23’te Ansys/Maxwell programında rotor daimi mıknatıs yerleşim şeması gösterilmektedir.



**Şekil 2.23: Ansys/Maxwell’de İki Boyutlu Motor Kesiti ve Rotor Daimi Mıknatıs Yerleşim Şeması**

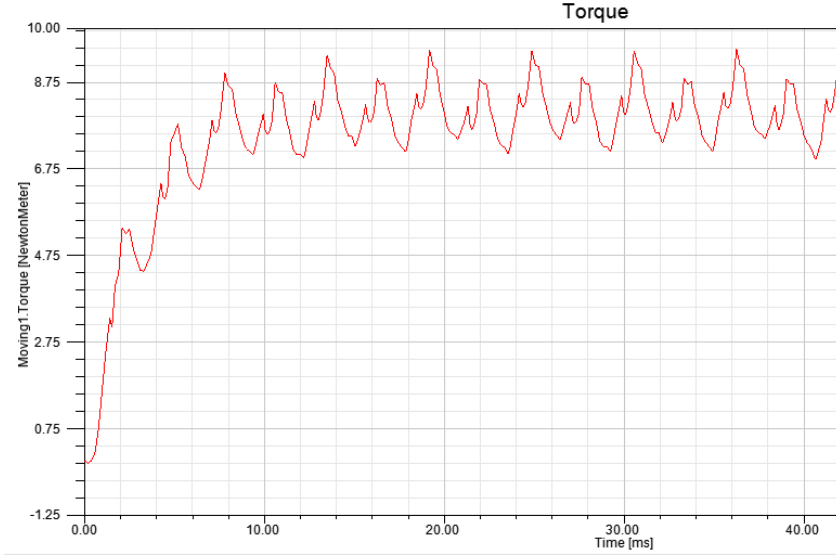
## 2.12 Analiz ve Bulgular

Ansys'te Rmxprt ekranı, sisteme girilen FDAM verilerinin analiz edilerek anlamlı grafikler haline dönüştürüldüğü kısımdır [29]. Gerçek motordaki gibi anma gerilimi 40 volt olan, 3000 d/d referans hızı olan bir FDAM analiz sonuçları Rmxprt ara yüzü yardımıyla elde edilmiştir. Bu program yardımıyla vektörel akı dağılımı, akı yoğunluğu değerleri ve 550 Watt'lık motorun performans değerleri incelenmektedir. Şekil 2.24'te referans motora ait verim hız grafiği sunulmaktadır. Grafiğe göre 2400 d/dk hızında oluşan verim %84'e karşılık gelmektedir.



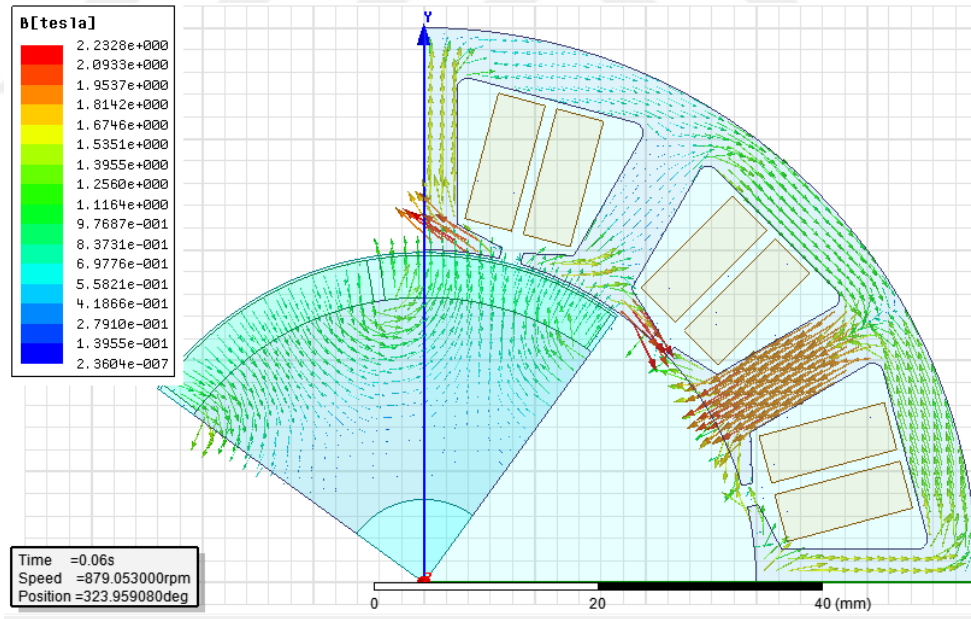
Şekil 2.24: FDAM Hız-Verim Grafiği

Motora ait çıkış moment grafiği Şekil 2.25 incelendiğinde 7 Nm ile 9 Nm arasında değişen moment değerleri, sabit güçlü yük altında alındığı gözlenmektedir. Yüksek hızlarda FDAM'nun eylemsizlik momentine bağlı olarak vuruntu momentleri pek etki etmese de düşük hızlarda ciddi problem yaratmaktadır. Sargıların yerleşimi, mıknatıs kalınlığı ve açıları, laminasyon yöntemi, anahtarlama frekansı, sargıların oluklara yerleşim açıları gibi birçok faktörün iyileştirilmesi daha az vuruntu momentinin oluşmasına etki ettiği gözlenmektedir [30].



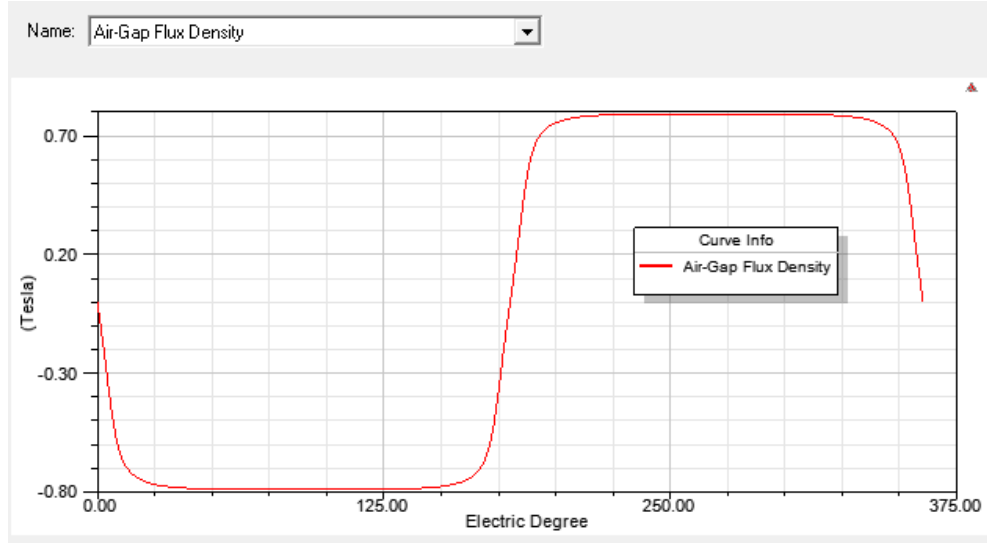
**Şekil 2.25: Motora Ait Çıkış Momenti Grafiği**

Programın çıktılarından oluşan manyetik akı yoğunluğunun vektörel olarak gösterimi Şekil 2.26’da verilmektedir. 60 milisaniyelik örnekleme ile manyetik akı vektörel çizgileri incelendiğinde B endüksiyon değeri 0.139 tesla ila 2.23 tesla arasından değerler aldığı gözlenmektedir.



**Şekil 2.26: Manyetik Akı Yoğunluğunun Vektörel Gösterimi**

Hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun rotor açısına bağlı değişimi Şekil 2.27’deki gibi değişmektedir. 360 derecelik elektrik açısında B’nin 0.7 tesla ila -0.8 tesla arasında değişen değerler aldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.27: Hava Aralığı Akı Yoğunluğu Grafiği

### 3. MATLAB/SİMULİNK PROGRAMI İLE FDAM’NUN DİNAMİK MODELİ

MATLAB, matematiksel hesaplama yazılım paket programlarından en yaygın kullanılanıdır. Yüksek performanslı hesaplama rutinleri vardır ve kullanımı kolaydır. C benzeri bir kodlama dili sağlayan etkileşimli bir ortamdır [31].

MATLAB-Simulink alt programı hazır fonksiyon blokları içermesi, bağlantı kolaylığı ve grafiksel sonuçlar içermesi bakımından teknik olarak büyük kolaylık sağlamaktadır. FDAM’nun PWM kontrol tekniğiyle, sabit bir yük altında, sensörlü çalışmasına ilişkin dinamik model çalışması bu kısımda yapılmaktadır.

#### 3.1. Motor parametreleri

Kullanılan FDAM’nun EMK sabiti, stator direnci, faz sayısı, referans hızı, uygulanacak gerilim değerleri bu kısımda tanımlanmaktadır.

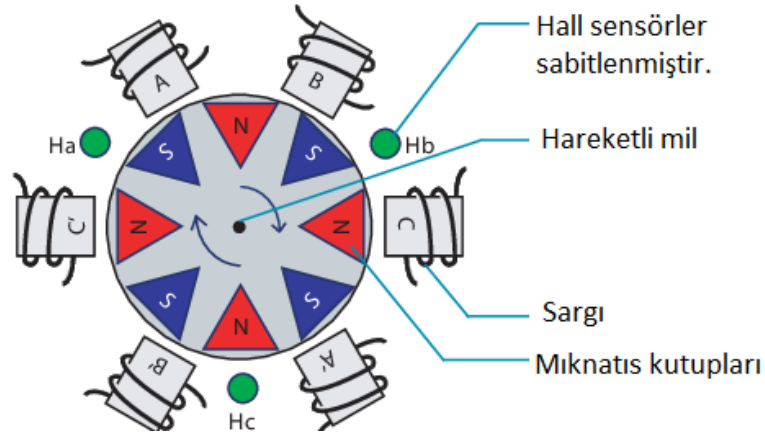
**Çizelge 3.1: FDAM Parametreleri**

| Parametre     | Sembol            | Değer  | Birim             |
|---------------|-------------------|--------|-------------------|
| Direnç        | R                 | 0.485  | Ohm               |
| indüktans     | L                 | 8.5    | mH                |
| EMK sabiti    | $k_e$             | 0.0055 | V/rad/s           |
| Moment sabiti | $k_t$             | 0.0055 | N-m/A             |
| Rotor ataleti | J                 | 0.0027 | Kg-m <sup>2</sup> |
| Kutup sayısı  | P                 | 4      | kutup             |
| Faz sayısı    | $L_1, L_2, L_3$   | 3      | faz               |
| Anma gerilimi | U                 | 40     | Volt              |
| Referans hız  | $\text{min}^{-1}$ | 1000   | dev/dk            |

#### 3.2. Alan (Hall) Etkili Sensörlerdeki Verinin İşlenmesi

FDAM doğru komütasyon için rotor konum verilerine gereksinim duyar. FDAM sensörlü veya sensörsüz olarak kontrol etmek mümkündür. Bu yöntemlerden en basit olanı sensörlü kontroldür [32]. Bu sensörler bir mıknatıs ve manyetizmaya

göre çıkış veren elektronik devre elemanından oluşur. Bu dijital çıkış veren sensörler eşit aralıklarla rotora yerleştirilerek ardışık bir şekilde sinyal üretirler.



**Şekil 3.1: Alan (Hall) Etkili Sensörlerin FDAM'de Yerleşimi**

Şekil 3.1'de alan etkili sensörler eşit aralıklarla sabit olarak stator civarında yerleştirilmektedir. Eşit zamanda manyetik kutupların değişim sinyalleri izlenerek konum bilgisi bulunur. Karşılaştırmacı-dönüştürücü entegreler (enkoder) yardımıyla kodlanır. Elde edilen veri denetleyici tarafından karşılaştırılarak sürücü güç devresinde sırasıyla hangi anahtarlama elemanın çalıştırılacağı tayin edilir.

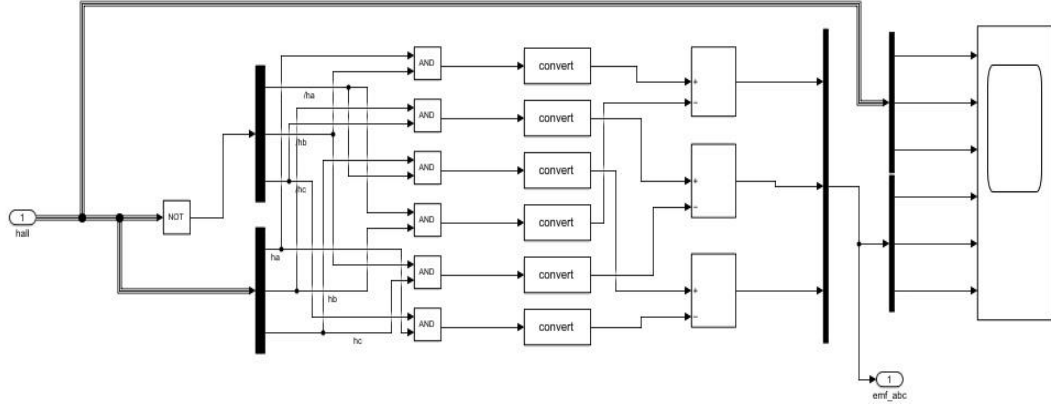
**Çizelge 3.2: Elektriksel Açıya Göre Sensörlerden Gelen 6 Farklı Konum Bilgisi**

| Theta <sub>elec</sub><br>( $\theta_r$ ) | Ha | Hb | Hc | Konum |
|-----------------------------------------|----|----|----|-------|
| 0° - 60°                                | 1  | 0  | 1  | 5     |
| 60° - 120°                              | 1  | 0  | 0  | 4     |
| 120° - 180°                             | 1  | 1  | 0  | 6     |
| 180° - 240°                             | 0  | 1  | 0  | 2     |
| 240° - 300°                             | 0  | 1  | 1  | 3     |
| 300° - 360°                             | 0  | 0  | 1  | 1     |

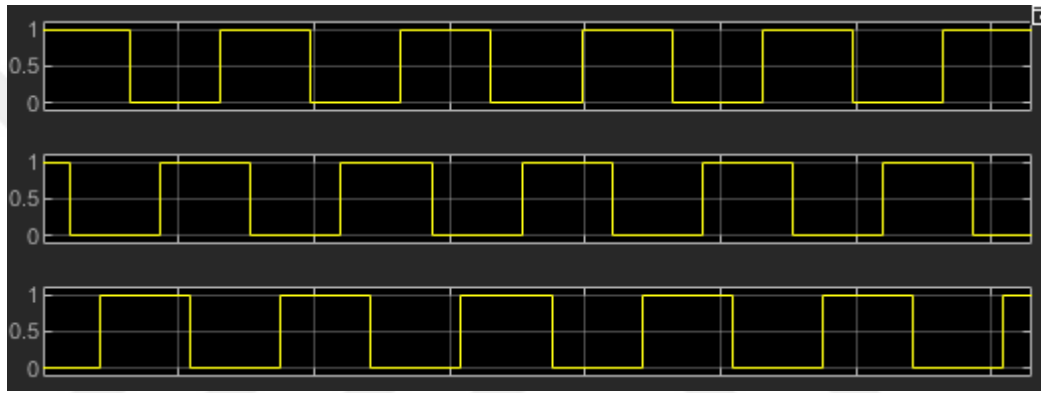
Alan etkili sensörlerden gelen veriler her faz için düzenlenirse; karnaugh haritası yardımıyla sadeleştirildiğinde fazların artı ve eksi alternanslarında oluşan lojik anahtarlama durumları:

|             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|
| A fazı için | $A- = A'.B$ | Denklem 3.1 |
|             | $A+ = A.B'$ | (3.2)       |
| B fazı için | $B- = B'.C$ | (3.3)       |
|             | $B+ = B.C'$ | (3.4)       |
| C fazı için | $C- = A.C'$ | (3.5)       |
|             | $C+ = A'.C$ | (3.6)       |

Şeklinde düzenlenmiş hali şekil 3.2'de verilmektedir.



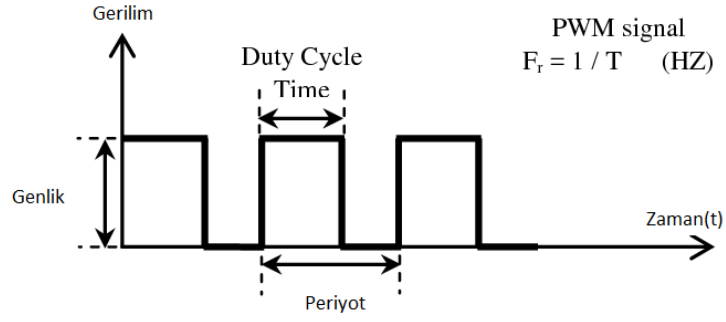
**Şekil 3.2: MATLAB-Simulink Alan Etkili Sensörlerden Gelen Verinin İşlenmesi**



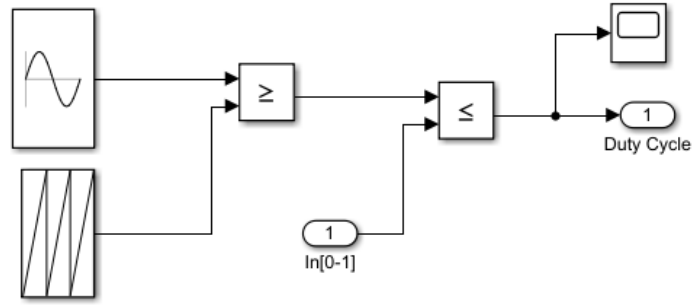
**Şekil 3.3: Simulink Alan Etkili Sensörlerden Gelen Dijital 1-0 Verisi Grafiği (Ha, Hb , Hc)**

### 3.3 PWM Sinyali Üretimi

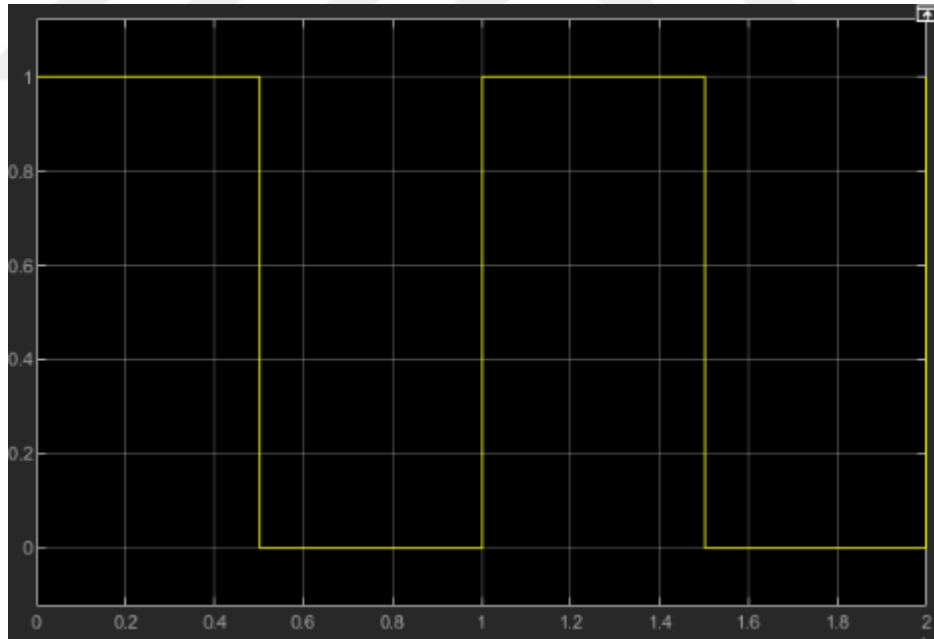
Özellikle yarı iletken anahtarlama elemanlarında kullanılan PWM (darbe genişlik modülasyonu) tekniği endüstriyel uygulamalarda karşımıza sıklıkla çıkmaktadır. PWM yani darbe genişlik modülasyonu, genliği belli olan bir sinyalin periyoduyla oynayarak istenilen devrelere darbe sinyali oluşturmaktadır. Darbenin sıklığıyla oynayarak FDAM hızı kontrol edilebilir [28]. Motor sürücü devrelerinde, PWM tekniği uygulanırken görev döngüsünü (duty cycle) belirlemek için istenilen hızın frekansı bulunarak yapılır. PWM tekniğinde kullanılan yarı iletken işlem elemanının (clock generator, pulse generator, mikrokontrolör vb. entegreler) çalışma frekansına bağlı olarak bir kare dalga üretebildiği bilinmektedir. Kıyıcı miktarı ne kadar yüksek ise sinyalin çözünürlüğü de o denli artmaktadır [33].



**Şekil 3.4: Görev Çevriminin (Duty Cycle) PWM Sinyalinde Gösterimi**



**Şekil 3.5: MATLAB/Simulink PWM Sinyali Üretimi**

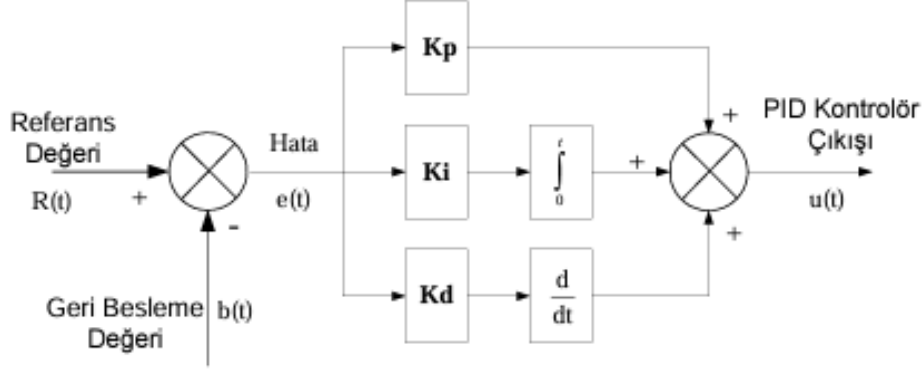


**Şekil 3.6: Simulink'te Üretilen PWM Sinyalinin Grafiği**

### 3.4. PID Kontrolcüsünün kullanımı

PID kontrolör devrelerindeki amaç kontrol edilecek sistemin istenmeyen hatalardan arındırılarak düzgün bir çalışma çıktısı elde etmektedir. Bu bahsettiğimiz

hataları azaltmak için PID kontrolcüsünde sabit katsayılar kullanılır.  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  sabit katsayıları sistemde sırasıyla oransal kazanç, integral alıcı ve türev alıcı katsayılarından oluşur [34].



**Şekil 3.7: PID Kontrolcüsü Blok Diyagramı**

Ayrık zaman domeninde sistemimize en uygun kazanç parametresi PI kontrolcüsü olduğu için sırasıyla oransal ve integral kazancı 1, türevsel kazancı 0 olarak alındı. Seçilen örnekleme zamanı da 1.0000e-05 olarak alınmaktadır.

**Çizelge 3.3: P, I ve D Denetleyicisinin Sisteme Etkileri**

| Kontrolör Türü | Kapalı Çevrim Cevabı | Yükseliş Zamanı      | Aşım   | Yerleşim Zamanı    | Sürekli Rejim Hatası |
|----------------|----------------------|----------------------|--------|--------------------|----------------------|
| Oransal        | $K_p$                | Azalır               | Artar  | Küçük oranda artar | Azalır               |
| İntegral       | $K_i$                | Küçük oranda azalır  | Artar  | Artar              | Büyük oranda azalır  |
| Türev          | $K_d$                | Küçük oranda değişir | Azalır | Azalır             | Önemsiz değişim      |

PID kontrolcüsü transfer fonksiyonu denklem (3.7)'de gösterilmektedir. Denklemde  $e(t)$  hata değerini ifade etmektedir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.7)$$

### 3.5. Transfer blok dönüşüm formülleri

FDAM 6 sıralı komütasyonunda her fazdan geçen akım denklemleri ele alındığında durum-uzay formları denklem (3.8), (3.9), (3.10)'daki gibidir.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_s} [V_{an-e_a-R_{ia}}] \quad (3.8)$$

$V_{an}$ : stator faz gerilimi,  $e_a$ : zıt emk,  $R$ :stator faz direnci,  $L$ :Faza ait öz indüktans

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_s} [V_{bn} - e_b - R i_b] \quad (3.9)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_s} [V_{cn} - e_c - R i_c] \quad (3.10)$$

Bu denklemler  $L_s=L-M$  Laplace dönüşümü uygulandığında

$$I_a = \frac{1}{L_s s + R} [V_{an} - e_a] \quad (3.11)$$

$$I_b = \frac{1}{L_s s + R} [V_{bn} - e_b] \quad (3.12)$$

$$I_c = \frac{1}{L_s s + R} [V_{cn} - e_c] \quad (3.13)$$

$$P \omega_m = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.14)$$

Denklemleri bulunur. Bu formüller sırasıyla 3 faz inverter modeli blok diyagramlarında kullanılır. Motor hızını bulmak için denklem (3.14)'den faydalanılmıştır. Denklem (3.14)'e Laplace dönüşümü uygulandığında elde edilen eşitlik denklem (3.15)'de verilmektedir.

$$w_m = \frac{1}{J_s + B} (T_e - T_L) \quad (3.15)$$

$w_m$  : açısal hız rad/sn

$J$ : rotor ataleti

$B$ :motor sürtünme katsayısı

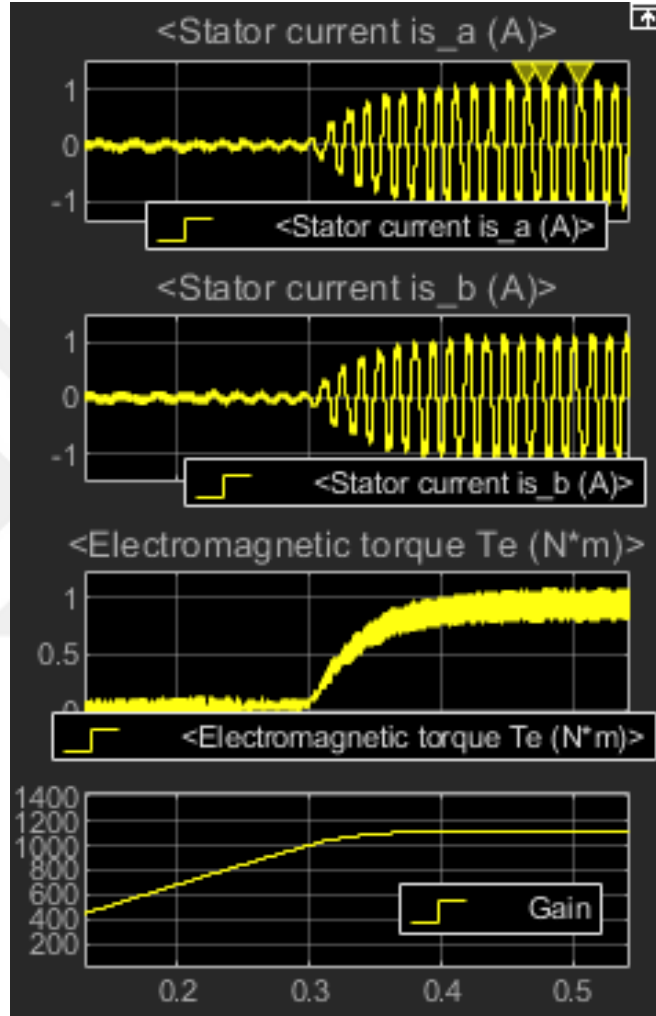
$T_e$  : elektromanyetik moment

$T_L$ : Yük moment

### 3.6. FDAM Simulink Benzetiminin Grafiksel Çıktıları

Matlab /simulink benzetiminde referans hız sabiti 1000 dev/dk olarak, motorun yük moment

formu seçilerek daimi mıknatıslı senkron tipinde olan motor, fırçasız doğru akım motoruna dönüştürüldü. Motor Sürücü devresi olarak universal Mosfet köprüsü seçildi. Ayrık zamanda örnekleme zamanı  $1e-05$  saniye olarak ayarlandı. Çıkış kazanç değeri 1039 olarak bulundu. Şekil 3.8’de iki faza ait akım değeri, elektromanyetik moment değeri ve kazanç değerleri aşağıdaki grafiklerde görülmektedir.



Çizelge 3.4: Faz a, Faz b, Elektromanyetik Moment ve Kazanç Grafikleri



### 3.7. 550Watt gücünde FDAM'nin Laboratuvar Ortamında Yapılan Performans Testleri

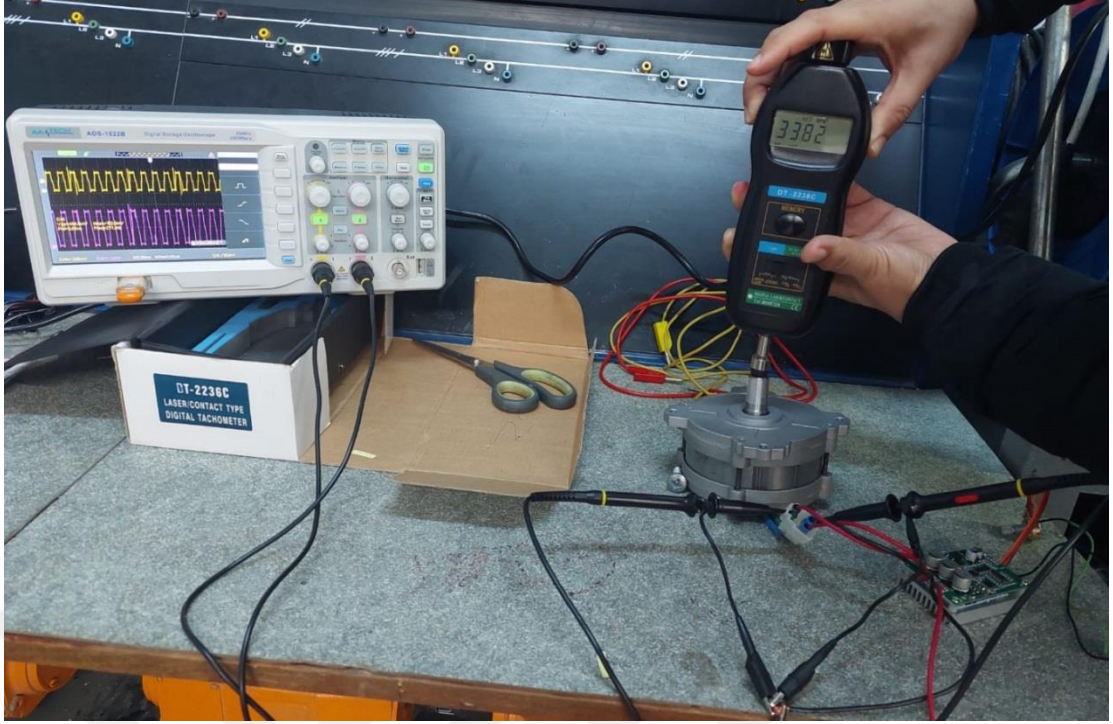
Küçük güçlü FDAM'nun laboratuvar ortamında çalışma testi yapılmıştır. 3 fazından herhangi ikisi için osiloskop yardımı ile voltaj genliği ve frekans ölçümü yapılmıştır. Turmetre yardımı ile motorun devri ölçülmüştür. Fabrikasyon üretilen MOSFET tabanlı bir elektronik sürücü kartı ToolBro-500W(Çin) yardımı ile sensörsüz çalıştırılması sağlanmıştır. Avometre yardımı ile güç kaynağından gelen gerilim ve akım değerleri ölçülmüştür. Çizelge 3.4.'de seri üretim bir FDAM'nin etiket değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.6: FDAM Etiket Değerleri

| FDAM Etiket Değerleri |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| Rotor yapısı          | iç rotorlu               |
| Stator yapısı         | yıldız bağlı, 2 katmanlı |
| Sargı Bakır çapı      | 0.9 mm                   |
| Anma Akımı(A)         | 1.9A                     |
| Anma Gerilimi(V)      | 40V                      |
| Maksimum Güç (W)      | 550W                     |
| Nominal Hız(d/d)      | 3200 d/d                 |
| Model İsmi ve Menşei  | W5225Gcb ÇİN             |
| Daimi mıknatıs çeşidi | NdFeB                    |

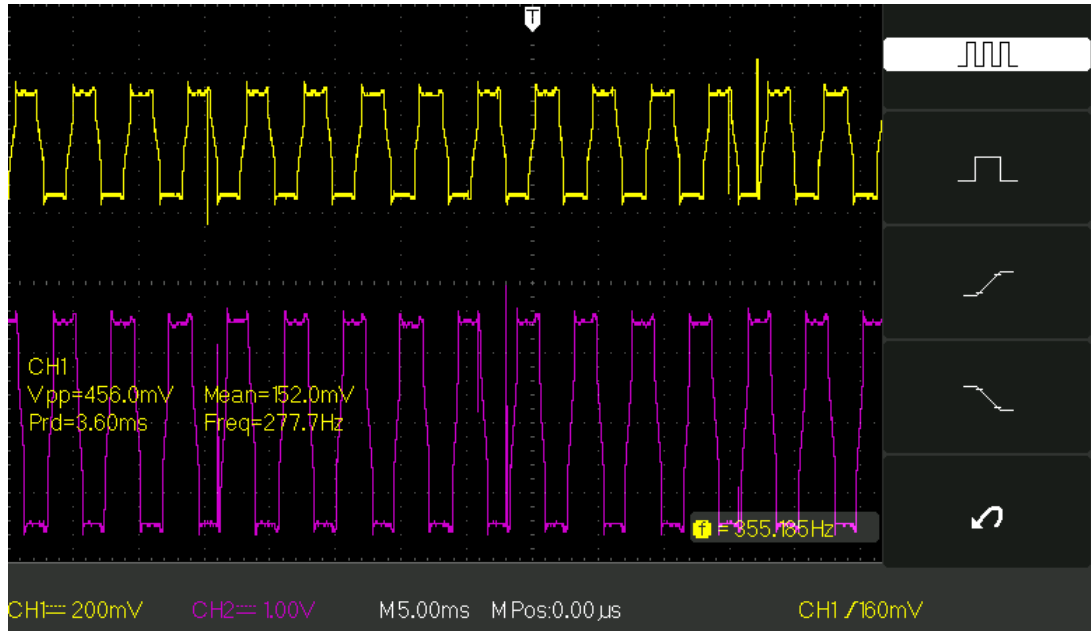


Şekil 3.8: Motorun Kesiti ve Ölçüleri



**Şekil 3.9: Laboratuvar Ortamında Yapılan Test Düzeneği**

Osilaskop ile yapılan ölçümlerde 2 kanal kullanılmış olup, motor sürücü devresinde 2 faza ait uyartım sinyalleri incelenmektedir. İkinci kanal incelendiğinde X10'a ayarlanmış probunda, 1 volt kademesinde 30 volt geldiği gözlenmektedir. Osilaskobun otomatik sıgdırma özelliği kullanılarak A ve B fazlarına ait trapezoidal çıkış sinyalleri 355 hertz frekans değerinde olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 3.10: FDAM 2 Fazına Ait Sinyal Eğrileri**

Motorun çalışması esnasında sırasıyla güç kaynağında 20 volt, 30 volt ve 40 volt gerilim değerlerinde çekilen akımlar ise Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.11: Güç Kaynağında Oluşan Değerlerin Ölçümü**

Turmetre, avometre yardımı ile yapılan ölçümlerde gerilim değerleri arttıkça yüksek frekanslı ve yüksek devirli bir çalışma gözlenmiştir. Farklı gerilim değerlerinde, yüksüz çalışmada yapılan ölçümler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

**Çizelge 3.7: Değişik Gerilimlerde Yüksüz Çalışmadaki FDAM Akım-Hız Verileri**

| FDAM              |                         |                   |
|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Gerilim değeri(V) | Yüksüz çalışma akımı(A) | Çalışma hızı(d/d) |
| 20 V              | 0.5 A                   | 1550 d/d          |
| 30V               | 1.7A                    | 3043 d/d          |
| 40V               | 2.0 A                   | 4417 d/d          |

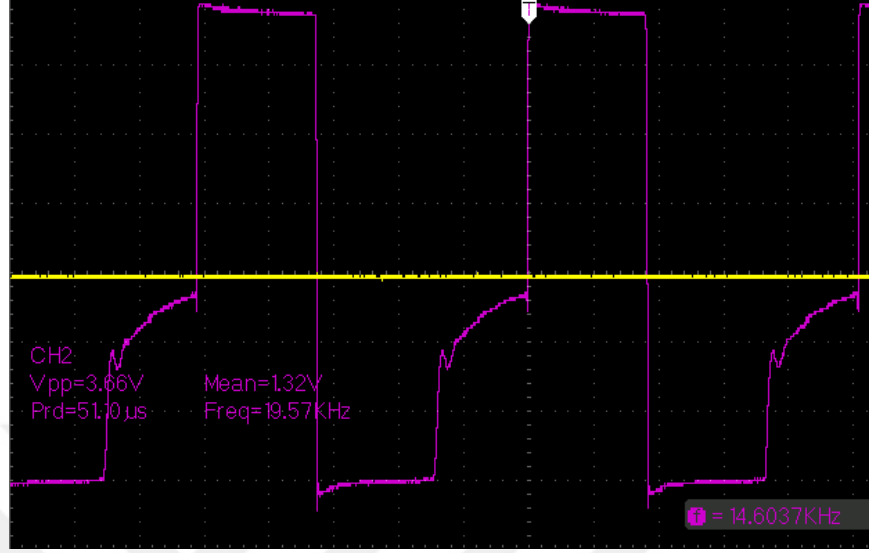
FDAM'nin 40 volt ile beslenirken ulaşılan 4417 d/d değeri; bu motorların yüksek anahtarlama olarak sürüldüğünde ne kadar hızlı olabileceğini göstermektedir.

**Çizelge 3.8: Değişik Gerilimlerde Yüklü Çalışmadaki FDAM Hız Verileri**

| FDAM              |                        |                   |
|-------------------|------------------------|-------------------|
| Gerilim değeri(V) | Yüklü çalışma akımı(A) | Çalışma hızı(d/d) |
| 20 V              | 0.65 A                 | 1400 d/d          |
| 30V               | 1.89A                  | 2917 d/d          |
| 40V               | 2.33 A                 | 3989 d/d          |

Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6 incelendiğinde motor yükte çalıştırıldığında faz sargılarında oluşan akımda kısmi bir artış olmaktadır. Motor farklı devir değerleri ve akım değerleri incelendiğinde motor kararlı çalışmasını sürdürmektedir. Şekil 3.14.

incelendiğinde motorun çalışma frekansının 19.57 kHz olduğu gözlenmiştir. Anahtarlama devresinin yüksek frekanslı çalışma esnasında sinyalin bozulmaya uğradığı görülmektedir.



**Şekil 3.12: Bir Faza Ait FDAM Yüksek Frekanslı Gerilim Değeri**

#### 4. SONUÇLAR

FDAM'nu daha iyi anlamak için kullanılan 3 farklı yöntemde de istenilen çıkış sinyallerine, moment değerlerine, hız değerlerine ulaşılmıştır. Güç elektroniği içeren sürücü devreleri, motoru doğrudan çalıştırmayı engellese de ulaşılan yüksek hız değerleri tatmin edici seviyededir. Daimi mıknatıslı senkron motorlara nazaran FDAM yüksek frekanslı, değişken devirli, nispeten yüksek momentli bir çalışma sunmaktadır. Yarı iletken anahtarlama elemanlarının gelişmesi, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun uyarımında ne kadar etkili olduğu gözlenmektedir.

Sürtünme kayıpları, vantilasyon kayıpları, sürücü elektroniğindeki yarıiletken malzemelerde oluşan güç kayıpları, manyetik kayıpları, üretim ve sürücü maliyetleri FDAM'nu dezavantajlı gibi gösterse de klasik fırçalı DA motorlara nazaran bakım, gürültüsüz çalışma, yüksek devir ve moment kararlılığı daha iyi seviyededir. Küçük boyutlarda elde edilen güç yoğunluğu FDAM'nu verim olarak üst sıralara taşımaktadır.

MATLAB/Simulink programında sanal, matematiksel blok girdileri sayesinde oluşturulan grafiksel çıktılar anlamlı bir çalışma hakkında ön fikir oluşturmuştur. Olası giriş parametrelerinin değiştirilmesi ile gözlenen çıktılar, Ansys/Maxwell programında yapılmış olan motor tasarımı için iyi bir zemin oluşturmaktadır. Gerçek ortamda temin edilen daimi mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru etiket değerleri ve fiziksel ölçüleri de gerçeğine uygun bir tasarım için büyük kolaylık sağlamaktadır.

Laboratuvar ortamında test edilen FDAM, bilgisayar üzerinde yapılan simülasyonlara nazaran daha iyi tepkiler vererek yüksek frekanslı, yüksek devirli bir çalışma sunmaktadır.

Düşük devirlerde hissedilen vuruğu momenti, elektromanyetik momentteki verimi ve kararlı çalışmayı olumsuz etkilemektedir. Vuruğu momenti için yapılacak iyileştirmeler FDAM'nun pazar payını endüstriyel anlamda yükseltecektir. Günümüzde elektriksel ve otonom çalışan cihazlara, makinelere olan ilginin artmış

olması havada, karada, suda ve uzayda çalışabilen FDAM'nu çok değerli kılmaktadır.

Bu tezin amacı, fırçasız doğru akım motorunun çalışma esaslarını saptamak, kontrolünde kullanılan elektronik sürücü devrelerinin önemini vurgulamaktır. FDAM üretiminde kullanılan fiziksel parametrelerin hepsinin ortaya konulmasının ve deneysel çalışma test verilerinin literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan MATLAB 2021 ve Ansys-Electronics Desktop 2019.R2 programları Gedik Üniversitesi bilişim kütüphanesi lisanslı programları tarafından sağlanmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1.] Panchal T.H. , Patel A.N. ve Patel R.M. (2022). Reduction of cogging torque of radial flux permanent magnet brushless DC motor by magnet shifting technique. *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, s. 15-20.
- [2.] Akgün, E., (2018). Motor Kullanılan Sistemlerde Enerji Verimliliği, 9. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, 29-30 Mart .
- [3.] Hassanpour, I., A. ve Vaez-Zadeh, S. (2009). Line Start Permanent magnet Synchronous Motors: Challenges And Opportunities. *Energy*, 34(11), 1755-1763.
- [4.] Cullity, B. D. ve Graham, C. D. ( 2008). *Introduction to Magnetic Materials - Definitions and Units*. Kitap-IEEE PRESS.
- [5.] Mills A. ( 2011 ). William Gilbert and Magnetization by Percussion, *Notes and Records of The Royal Society*, 411-416.
- [6.] Bal G. (2016). *Elektrik Makinaları I*, Seçkin Yayınevi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [7.] Kenjo T. ve Nagamori S. ( 1985). *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*, Clarendon Press, Oxford.
- [8.] Lipo, T.A. (2010) Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in the Slotted Air Gap of a Surface PM Motor Using Complex Relative Air Gap Permeance. Wisconsin.
- [9.] Buschow K.H.J. (1997). *Handbook of Magnetic Materials*, Vol.10, North-Holland, Amsterdam, p. 463.
- [10.] Legendre B. ve Sghaier M. ( 2011). Curie temperature of nickel, *Akademiai Kiado, Budapest, Hungary*.
- [11.] Shrivastava N. ve Brahmin A. ( 2014 ). Design of 3-Phase KMFDC Motor for Electric Vehicle Application by Using Finite Element Simulation, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 4, Issue 1.
- [12.] Gutfleisch O., Willard A.M., Brück E., Ping Liu J. ( 2010). Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, 821-42, Weinheim.
- [13.] Herraiz Lalana, E. (2018) Permanent magnets and its production by powder metallurgy. *Rev. Metal.* 54(2): e121.
- [14.] Pyrhönen J., Jussila H., Alexandrova Y., Rafajdus P. ve Nerg J. (2012). Harmonic loss calculation in rotor surface permanent magnets - New analytic approach,, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 8, pp. 2358–2356.
- [15.] Nair S., Wang J., Chen L., Chin R., Manolas I., ve Svehkarenko D. (2016). Computationally efficient 3-D eddy current loss prediction in magnets of

- interior permanent magnet machines, IEEE Trans. Magn., vol. 52, no.10, pp. 1–10.
- [16.] Miliavec D. ( 2007). Eddy current losses in permanent magnets of the BLDC machine, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol.26 No.4, s.1095-1104.
- [17.] Fiorillo F. (2004). Measurement and characterization of magnetic materials, Elsevier Academic Press, ISBN 0-12-257251-3, p:31.
- [18.] Shao J. (2006). An Improved Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 5, pp:1216–1221.
- [19.] Shao J. (2005). An improved microcontroller-based sensor less brushless DC (BLDC) motor drive for automotive applications, Fourteenth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference.
- [20.] Çelikel R. (2016). Uydular İçin Volanlı Enerji Depolama sistemlerinde Kullanılabilecek Yüksek Hızlı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Genetik Algoritma Tabanlı Akım Kontrolü, ELAZİĞ.
- [21.] Bhatt P. N., Mehar H. ve Sahavani M. (2019). Electrical Motors for Electric Vehicle-A Comaparative Study.International Conference on Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications. 452010, India.
- [22.] Tabak, A. (2020). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID/PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (19), s.145-155.
- [23.] Salah W. A. ve Ishak ,K. J. (2011). Hammadi PWM Switching Strategy For Torque Ripple Minimization In BLDC Motor. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 62, NO. 3, pp.141–146.
- [24.] Sayed K., El-Zohri H., Ahmed A. ve Khamies M. (2024). Application of Tilt Integral Derivative for Efficient Speed Control and Operation of BLDC Motor Drive for Electric Vehicles. Faculty of Engineering, Sohag University, Fractal and fractional 8,61. Sohag. 82524.
- [25.] Tacer E.( 2004). Elektromekanik enerji dönüşümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [26.] Yılmaz, M.(2005). Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması, İTÜ.
- [27.] Adnan, A. ve Ishak, D.( 2009). Finite Element Modeling and Analysis of External Rotor Brushless DC Motor for Electric Bicycle , Proceedings of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd'09), s. 376-379.
- [28.] Carraro, E., Bianchi, N., Zhang, S., Koch, M. (2018). Design and Performance Comparison of Fractional Slot Concentrated Winding Spoke Type Synchronous Motors With Different Slot-Pole Combinations, IEEE Transactions on Industry Applications, 54, pp. 2276-2284.
- [29.] Kurtuluş C. ve Inalhan G. (2008). Analysis of İTÜ NXG I Next Generation Technology Demonstrator from a Controls Perspective, Proc. of 7th

International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, Tralee, Ireland.

- [30.] Afsari S. A., Heydari H. ve Dianati B. ( 2015) Cogging torque minimization in double sided axial flux magnetic gear, The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015), Tahrán, pp.71-76. DOI: 10.1109/PEDSTC.2015.7093252.
- [31.] Akın B. ve Bhardwaj M. (2015). Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors , C2000 Systems and Applications Team, Texas Instruments.
- [32.] Li B. ve Wang C. (2016). Comparative Analysis on PMSM Control System Based on SPWM and SVPWM, Chinese Control and Decision Conference (CCDC), IEEE.
- [33.] Bektaş Y. ve Serteller N.F.O. (2010). Fırçasız DA Motorun Kontrolünde PWM ve Histerezis Bant Tekniğinin Karşılaştırılması , SDU International Journal of Technologic Sciences, pp. 31-45.
- [34.] Ang K.H ve Chong G. (2005). PID Control System Analysis, Design and Technology, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.13, No.4.

## ÖZGEÇMİŞ

Muhammet GÜRÇAY

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : (2010) Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi
- Yüksek Lisans : (2024) İstanbul Gedik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

### MESLEKİ DENEYİM:

- Yakacık Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi ,Elektrik/Elektronik Bölümü Endüstriyel Bakım, Onarım Dalı Şefliği (2017, .....)

### Katıldığı Proje ve Ödüller

- Tübitak 4006 bilim fuarı destekleme programı 2017-2018 organizatörlüğü, 380879 nolu proje
- Tübitak 4006 bilim fuarı destekleme programı 2018-2019 organizatörlüğü, 413987 nolu proje
- Erasmus Job shadowing öğretmen eğitimi (Almanya,2023-1-TR01-KA121-VET- 000163808-16197-78958)
- Milli Eğitim Bakanlığı Üstün Başarı Belgesi (2020)