

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU DOĞRUDAN  
YOL VERMELİ SENKRON MOTOR TASARIMI, ANALİZİ VE  
SÜRÜLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**MUSTAFA TÜMBEK**

**DENİZLİ, KASIM - 2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU DOĞRUDAN  
YOL VERMELİ SENKRON MOTOR TASARIMI, ANALİZİ VE  
SÜRÜLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**MUSTAFA TÜMBEK**

**DENİZLİ, KASIM - 2019**

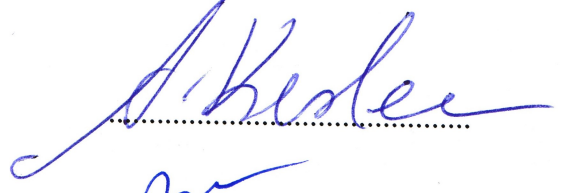
## KABUL VE ONAY SAYFASI

Mustafa Tümbek tarafından hazırlanan “Elektrikli Araçlar için Dış Rotorlu Doğrudan Yol Vermeli Senkron Motor Tasarımı, Analizi ve Sürülmesi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.


Jüri Üyeleri

İmza

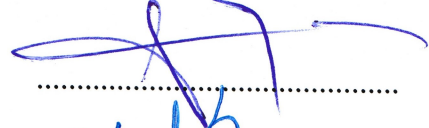
Danışman  
Doç. Dr. Selami KESLER



Üye  
Prof. Dr. Selim BÖREKCI  
Akdeniz Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Yüksel OĞUZ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Yusuf ÖNER



Üye  
Doç. Dr. Selim KÖROĞLU



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11.12.2019 tarih ve 49/09..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**Mustafa Tümbek**

## ÖZET

### ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU DOĞRUDAN YOL VERMELİ SENKRON MOTOR TASARIMI, ANALİZİ VE SÜRÜLMESİ

DOKTORA TEZİ

MUSTAFA TÜMBEK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. SELAMİ KESLER)

DENİZLİ, KASIM - 2019

Günümüzde elektrikli araçlarda doğru akım motoru, asenkron motor, senkron motor ve fırçasız doğru akım motorları ile çalışmalar yürütülmektedir. Elektrik motorları, elektrikli araç üzerindeki yerleşimine bağlı olarak içten rotorlu ve dıştan rotorlu motorlar olmak üzere iki kısımda incelenebilir. İçten rotorlu motorların kullanıldığı sistemlerde dişliler, dişli kutusu ve mekanik diferansiyel bulunur. Ancak bu bileşenler aracın verimliliğini olumsuz yönde etkiler ve sürüş menzilini azaltır. Diğer taraftan dıştan rotorlu motorlar teker içine yerleştirilerek verim ve menzilde artış sağlarken sürüş konforunu da iyileştirebilir.

Literatürde, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere geleneksel motorlar ve karma motorlar üzerine çalışmalar vardır. Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere senkron motor ve asenkron motorun avantajlarını bir araya getiren doğrudan yol vermeli senkron motor, dıştan rotorlu motor olarak tasarlanmıştır. Öncelikle araç kısıtları göz önüne alınarak, istenilen güç ve boyutlarda motor genel geometrisi belirlenmiş ve elektrik motorunun stator ve rotor parametreleri geleneksel asenkron motora benzer olarak hesaplanmıştır. Karma motor yapısı oluşturmak için rotora dört farklı mıknatıs yerleşimi önerilerek ANSYS Maxwell yazılımı ile iki boyutlu analizi gerçekleştirilmiş ve motor karakteristikleri incelenmiştir. Aynı zamanda motor parametrelerinin motorlar üzerindeki etkileri sunulmuştur. Önerilen motor tasarımlarından en uygun olanı prototip üretimi için seçilmiştir.

Prototipi üretilen motorun sürüş testlerini gerçekleştirmek üzere sürücüyü ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla üç fazlı gerilim kaynaklı evirici tasarlanmıştır. Bu sayede hem doğrudan sürüş hem de kontrollü sürüş testleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarını doğrulayan deneysel sonuçlarla, önerilen motorun senkron ve asenkron motorun avantajlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Önerilen motor kalkış anında asenkron motor karakteristiği sayesinde doğrudan başlayabilmekte ve motor kararlı hale ulaştığında ise senkron sürüş gerçekleştirildiğinden motorda rotor bakır kayıpları olmamaktadır. Ayrıca, ani yüklenmelerde ve aşırı yüklenmelerde senkron motorun kopma açısı, senkron altı hızlarda asenkron sürüş nedeniyle önemsiz hale gelmiştir. Ek olarak, motor gücünden feragat etmeden dış rotor geometrisi sayesinde eksenel boy kısa olmasına rağmen geniş radyal boyut nedeniyle yeterli moment sağlanabilmiştir. Sonuç olarak, önerilen motor modelinin elektrikli araçlarda kullanılmak üzere geleneksel motorlara göre daha uygun olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Dıştan rotorlu motor, Sonlu elemanlar yöntemi, Motor tasarımı, Elektrikli araç, Doğrudan yol vermeli senkron motor

## ABSTRACT

### AN OUTER ROTOR LINE-START SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN, ANALYSIS AND DRIVE FOR THE ELECTRICAL VEHICLES

PH.D THESIS

MUSTAFA TÜMBEK

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. SELAMİ KESLER)

DENİZLİ, NOVEMBER 2019

Nowadays, studies on electric vehicles are carried out using direct current motor, induction motor, synchronous motor, and brushless direct current motors. Electric motors can be classified into two parts as inner and outer rotor motors depending on the placement on the electric vehicle. Gears, gearbox, and mechanical differential are used in the systems with the inner rotor motors. However, these components adversely affect the efficiency of the vehicle and reduce the driving range. On the other hand, outer rotor motors can be placed into the wheel to increase efficiency and range while also improving driving comfort.

In the literature, there are several studies on conventional and hybrid motors used in electric vehicles. In this thesis, a line starting synchronous motor which combines the advantages of synchronous motor and asynchronous motor for use in electric vehicles is designed as an outer rotor motor. First of all, considering the constraints of the vehicle, the general geometry of the motor is determined at the desired power and dimensions. Also, stator and rotor parameters of the electric motor are calculated similar to the conventional asynchronous motor. In order to design a hybrid motor structure, four different magnet placements on rotor are proposed and two-dimensional analysis is performed with ANSYS Maxwell software to investigate motor characteristics. At the same time, the effects of the motor parameters on the motors are presented. The most suitable motor design is selected for an implementation.

A motor driver is required to perform the driving tests of the prototype motor. For this purpose, a three-phase voltage source inverter is designed. In this way, both line start and controlled driving tests are performed. It is concluded that the proposed motor has the advantages of a synchronous and an asynchronous motor by the experimental results verifying the simulation results. The proposed motor can start directly with thanks to asynchronous motor characteristic at the start and when the motor reaches a stable state, there is no loss in the rotor copper since synchronous driving is performed. In addition, in sudden loads and overloads, the maximum load angle of a synchronous motor has become insignificant due to asynchronous driving at sub-synchronous speed. Moreover, thanks to the outer rotor geometry, although the axial length is short, required torque is achieved due to the large radial dimension with the same motor power. As a result, the proposed motor model is found to be more suitable than conventional motor for use in electric vehicles.

**KEYWORDS:** Outer rotor motor, Finite element method, Motor design, Electric vehicle, Line start synchronous motor

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|   |           |
|---|-----------|
| ÖZET.....   | i         |
| ABSTRACT .....  | ii        |
| İÇİNDEKİLER .....   | iii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....  | v         |
| TABLO LİSTESİ .....   | viii      |
| KISALTMALAR LİSTESİ.....  | ix        |
| ÖNSÖZ.....  | x         |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Genel Bilgiler .....  | 1         |
| 1.2 Literatür Özeti .....   | 3         |
| 1.3 Tezin Amacı .....   | 11        |
| 1.4 Yöntem ve Materyal .....  | 11        |
| 1.5 Tezin Kapsamı.....  | 12        |
| <b>2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR .....</b>  | <b>14</b> |
| 2.1 Elektrikli Araç Model ve Dinamikleri.....   | 15        |
| 2.2 Tahrik Yapıları .....   | 18        |
| 2.3 Motor Sürücüsü .....  | 19        |
| 2.4 Elektrik Motorları.....   | 19        |
| 2.4.1 İç Rotorlu Motorlar .....   | 20        |
| 2.4.2 Dış Rotorlu Motorlar .....  | 24        |
| <b>3. DIŞTAN ROTORLU KARMA SENKRON MOTOR MODELİ .....</b>                             | <b>25</b> |
| 3.1 Motor Dinamik Modeli .....  | 25        |
| 3.2 Eksen Dönüşümleri .....   | 27        |
| 3.2.1 Clark ( $\alpha\beta$ ) Dönüşümü .....  | 28        |
| 3.2.2 Park (dq) dönüşümü.....   | 29        |
| 3.3 Motorun d-q Eşdeğer Devresi .....   | 30        |
| 3.4 Çıkış Momenti .....   | 32        |
| 3.5 Sürekli Durum Analizi .....   | 33        |
| 3.6 Analitik Modelin Sayısal Çözümü .....   | 34        |
| 3.7 Modelin Matlab/Simulink Benzetimi .....   | 36        |
| <b>4. DIŞTAN ROTORLU KARMA SENKRON MOTOR TASARIMI,<br/>BENZETİMİ VE İMALATI .....</b> | <b>38</b> |
| 4.1 Motor Tasarımı.....   | 39        |
| 4.1.1 Motor Gücünün Hesaplanması .....  | 40        |
| 4.1.2 Motor Geometrisinin Tespiti .....   | 41        |
| 4.1.3 Motor Boyutunun Belirlenmesi .....  | 41        |
| 4.1.4 Stator Parametrelerinin Belirlenmesi.....                                       | 43        |
| 4.1.5 Rotor Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                       | 43        |
| 4.2 Farklı Rotor Geometrilerinin İki Boyutlu Modelleri.....                           | 45        |
| 4.2.1 SEY Analiz Sonuçları .....  | 47        |
| 4.2.2 Parametrik Analiz .....   | 48        |
| 4.2.2.1 Doğrudan Kalkış Performansı ve Senkronizasyon Kabiliyeti                      | 49        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.2.2.2    | Asenkron Çalışma Durumu ve Moment Dalgalanması .....              | 52         |
| 4.2.3      | Önerilen Motor Geometrisi.....                                    | 57         |
| 4.3        | Prototip Motor İmalatı .....                                      | 58         |
| 4.3.1      | Stator İmalatı.....   | 58         |
| 4.3.2      | Rotor İmalatı .....   | 62         |
| 4.3.3      | Mekanik Parçaların Tasarımı.....                                  | 65         |
| 4.3.4      | Tamamlanmış Prototip.....   | 66         |
| 4.4        | Tasarımı Yapılan Motorun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi..... | 67         |
| <b>5.</b>  | <b>SÜRÜCÜ TASARIMI VE İMALATI .....</b>                           | <b>70</b>  |
| 5.1        | Besleme Devresi.....  | 71         |
| 5.2        | IGBT IPM Blok Tetikleme Devresi .....                             | 71         |
| 5.3        | Motor Faz Akımı ve DA Bara Gerilimi Ölçme Devresi .....           | 73         |
| 5.4        | Ölü Zaman Devresinin Gerçekleştirilmesi .....                     | 75         |
| 5.5        | Kullanıcı Paneli .....  | 77         |
| 5.6        | Mikrodenetleyici .....  | 78         |
| 5.7        | Sürücü Prototipinin İmalatı .....                                 | 80         |
| <b>6.</b>  | <b>DENETLEYİCİ TASARIMI.....</b>                                  | <b>82</b>  |
| 6.1        | Skalar Kontrol Yöntemleri .....                                   | 82         |
| 6.2        | Vektör Tabanlı Kontrol Yöntemleri .....                           | 83         |
| 6.2.1      | Alan Yönlendirmeli Kontrol Yöntemi (FOC, AYK).....                | 84         |
| 6.2.2      | Doğrudan Moment Kontrolü .....                                    | 84         |
| <b>7.</b>  | <b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....</b>                       | <b>88</b>  |
| 7.1        | Test Sisteminin Hazırlanması.....                                 | 88         |
| 7.2        | Zıt-EMK Tespiti .....   | 89         |
| 7.3        | Doğrudan Sürüş Testi .....  | 91         |
| 7.3.1      | Boşta Çalışma .....   | 91         |
| 7.3.2      | Yükte Çalışma.....  | 92         |
| 7.4        | Değişken Yük Altında V/f-tabanlı Sürüş Testi .....                | 93         |
| <b>8.</b>  | <b>SONUÇLAR.....</b>  | <b>100</b> |
| <b>9.</b>  | <b>KAYNAKLAR.....</b>   | <b>105</b> |
| <b>10.</b> | <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>  | <b>110</b> |



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 1.1: Elektrikli araçlarda moment-güç gereksinim diyagramı<br>(Zhu 2007).....  | 6  |
| Şekil 2.1: Elektrikli araç bileşenleri .....  | 14 |
| Şekil 2.2: Elektrikli araç sisteminin alt bileşenleri .....   | 15 |
| Şekil 2.3: Elektrikli araca etki eden kuvvetler .....   | 16 |
| Şekil 2.4: Elektrikli araçlarda güç aktarım modellerinin farklı<br>konfigürasyonları .....  | 18 |
| Şekil 2.5: Elektrik motor sürücü devresi.....   | 19 |
| Şekil 2.6: Elektrikli araçta kullanılan motor türleri .....   | 20 |
| Şekil 2.7: Senkron motorun yapısı .....   | 22 |
| Şekil 2.8: Asenkron motor yapısı.....   | 23 |
| Şekil 2.9: Anahtarlamalı relüktans motor yapısı.....  | 23 |
| Şekil 2.10: FDAM motorun yapısı.....  | 24 |
| Şekil 3.1: Karma motorun geliştirilmiş devre modeli .....   | 25 |
| Şekil 3.2: Clark dönüşümü.....  | 28 |
| Şekil 3.3: Park dönüşümü .....  | 30 |
| Şekil 3.4: Motor d-q eşdeğer devresi .....  | 31 |
| Şekil 3.5: Analitik modelin sayısal çözümünde hız ve moment değişimi<br>a) Yüksüz ve yüklü hız değişimi, b) Yüksüz ve yüklü moment<br>değişimi .....  | 35 |
| Şekil 3.6: Karma motor modelinin asenkron ve senkron momentlerinin<br>ayrıştırılması.....   | 36 |
| Şekil 3.7: Tasarımı yapılan DRKSM için Matlab/Simulink benzetim modeli .  | 37 |
| Şekil 3.8: Motorun çıkış dinamik karakteristiği benzetim sonucu.....  | 37 |
| Şekil 4.1: Motor tasarım aşamaları .....  | 39 |
| Şekil 4.2: Rotor üzerinde mıknatıs yerleşimi.....   | 45 |
| Şekil 4.3: Rotor mıknatısları ve kafes yerleşimine göre dört farklı motor<br>tasarım modeli a) A tipi motor geometrisi, b) B tipi motor<br>geometrisi, c) C tipi motor geometrisi, d) D tipi rotor geometrisi . | 46 |
| Şekil 4.4: DRKSM tasarımı a) Motor mesh modeli, b) Rotor mıknatıs<br>yerleşimi .....  | 48 |
| Şekil 4.5: Motorda oluşturulan çeşitli mıknatıs geometrisinin senkronizasyon<br>etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi.....  | 51 |
| Şekil 4.6: Motor tiplerinin çeşitli mıknatıs geometrisi ile yüklü çalışmasındaki<br>moment etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi.....   | 53 |
| Şekil 4.7: Motor tiplerinin çeşitli mıknatıs geometrisi ile yüklenme anının<br>hız üzerindeki etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi .....   | 55 |
| Şekil 4.8: Yüklü (10Nm) yol alma durumunda mıknatıs boyutunun D tipi<br>motor üzerindeki etkisi.....  | 57 |
| Şekil 4.9: DRKSM Motor genel geometrisi.....  | 57 |
| Şekil 4.10: Stator geometrisi .....   | 58 |
| Şekil 4.11: Slot geometrisi (ANSYS Maxwell) .....   | 59 |
| Şekil 4.12: Stator saclarının dizilmesi.....  | 60 |
| Şekil 4.13: 24-slot, 8-kutup için yarım kalıp sargı düzeni .....  | 61 |
| Şekil 4.14: Paketlenmiş stator sac levhalarına sarımın başlanması .....   | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.15: Stator sargılarının tamamlanmış durumu.....   | 62 |
| Şekil 4.16: Rotor geometrisi .....  | 63 |
| Şekil 4.17: Dış rotor çubukları ve mıknatıs oyuklarının geometrisi .....  | 64 |
| Şekil 4.18: Dış rotor saclarının paketlenmesi .....   | 64 |
| Şekil 4.19: Dış rotor çubukları ve mıknatısın yerleştirilmesi .....   | 65 |
| Şekil 4.20: Dış rotor imalatının tamamlanmış durumu.....  | 65 |
| Şekil 4.21: Tümüleşik motor parçaları.....  | 66 |
| Şekil 4.22: Statorun dış rotor içine yerleştirilmesi a) Ön görünüş,<br>b) Arka görünüş c) Tamamlanmış motor prototipi .....                                 | 67 |
| Şekil 4.23: Hız – Zaman Grafiği (0-0,75sn yüksüz kalkış; 0,75-1,5sn 10Nm<br>sabit yüklü; 1,5-2,25sn 15Nm sabit yük;2,25-3sn yüksüz).....                    | 68 |
| Şekil 4.24: Tasarlanan motorun akı yoğunluğu dağılımı .....   | 69 |
| Şekil 4.25: Tasarlanan motorun manyetik vektör potansiyel grafiği .....   | 69 |
| Şekil 5.1: Üç faz evirici genel şeması .....  | 70 |
| Şekil 5.2: Azaltan tip DA dönüştürücü (5V).....   | 71 |
| Şekil 5.3: IPM modül anahtarlama devresi .....  | 72 |
| Şekil 5.4: IPM blok ve IGBT sürücü devresi .....  | 73 |
| Şekil 5.5: Eviricide sensör yerleşimi ve kartı.....   | 73 |
| Şekil 5.6: Akım okuma devre çizimi.....   | 74 |
| Şekil 5.7: Akım sinyali (a) Sensör çıkışı, (b) Filtre çıkışı.....   | 74 |
| Şekil 5.8: Gerilim okuma devre çizimi .....   | 75 |
| Şekil 5.9: Gerilim sinyali (a) Kaynak gerilimi, (b) Filtre çıkışı.....  | 75 |
| Şekil 5.10: Sürücüye ait ölü zaman ve alarm kontrol devresi.....  | 76 |
| Şekil 5.11: Sürücüye ait ölü zaman devresi ve sinyal çıkışı a) Prototip devre,<br>b) Sinyal görüntüsü .....   | 77 |
| Şekil 5.12: Sürücü kullanıcı arayüzü prototipi.....   | 78 |
| Şekil 5.13: Mikrodenetleyicinin devre kartı üzerinde gösterimi.....   | 79 |
| Şekil 5.14: Mikrodenetleyicinin devre kartı üzerinde gösterimi<br>(a) Deney ortamı, (b) PWM sinyali.....  | 80 |
| Şekil 5.15: Evirici/Sürücü prototipi a) IGBT sürücü 3d modeli, b) kullanıcı<br>arayüzü, c) Sürücünün yandan görünüşü, d) Sürücünün üstten<br>görünüşü ..... | 81 |
| Şekil 6.1: Sinüs Darbe Genişlik Modülasyonu .....   | 83 |
| Şekil 6.2: Alan Yönlendirmeli Kontrol Yöntemi.....  | 84 |
| Şekil 6.3: Klasik Doğrudan Moment Kontrolü.....   | 85 |
| Şekil 6.4: Doğrudan moment kontrolünde a) Gerilim vektör uzayı b) Sektör<br>diyagramı.....  | 86 |
| Şekil 6.5: Akı ve moment histerezis kontrolörleri .....   | 87 |
| Şekil 7.1: Denetimli sürüş için hazırlanan deney düzeneği ilkesel modeli.....   | 88 |
| Şekil 7.2: Deney seti .....   | 89 |
| Şekil 7.3: 380 rpm hızdaki Zıt-EMK değerinin a) SEY analiz sonucu,<br>b) Deneysel sonuç .....   | 90 |
| Şekil 7.4: Boşta çalışmada indüklenen momentin değişimi.....  | 91 |
| Şekil 7.5: Boşta çalışmada yol alma durumundaki hız değişimi .....  | 92 |
| Şekil 7.6: Boşta çalışmada stator faz akımı değişimi.....   | 92 |
| Şekil 7.7: Yük altında motor davranışı, moment ve hız değişimi.....   | 93 |
| Şekil 7.8: Motorun sürücü ile denetimli kalkışı ve duruşu arasında yüklenme<br>durumları .....  | 94 |
| Şekil 7.9: Motorun yükleme anındaki hız moment değişimi .....   | 94 |
| Şekil 7.10: Motorun yüklü duruma geçişi anı için hız moment değişimi .....  | 95 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 7.11: Motorun yüklü durumuna ilişkin harmonik bileşenleri a) Gerilim<br>b) Akım .....  | 95 |
| Şekil 7.12: Motorun yüksüz ve yüklü duruma ilişkin stator akımı ve<br>geriliminin değişimi a) Yüksüz durum, b) Tam yüklü durum ..... | 96 |
| Şekil 7.13: Motor güç katsayısının boştta çalışmada besleme gerilimine göre<br>değişimi .....  | 97 |
| Şekil 7.14: Sabit oranlı V/f ile motor yüklendikçe güç katsayısı değişimi .....  | 98 |
| Şekil 7.15: Motorun aşırı yüklenmesi durumunda hız ve momentin asenkron<br>davranışı .....   | 98 |
| Şekil 7.16: Motorun aşırı yüklenmesi durumundaki asenkron davranışı<br>(Hız/Akım Gerilim).....                                       | 99 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Tablo 4.1: Araç tasarım parametreleri .....   | 40 |
| Tablo 4.2: Elektrikli araca etki eden kuvvetler ve güç değerleri .....                      | 40 |
| Tablo 4.3: Tasarlanan DRKSM parametreleri .....   | 46 |
| Tablo 4.4: Parametrik analizde kullanılan mıknatıs boyutları .....                          | 48 |
| Tablo 4.5: Motorların yüksüz yol almaki performans sıralaması .....                         | 51 |
| Tablo 4.6: Motorların ani yükleme durumundaki performans sıralaması .....                   | 56 |
| Tablo 4.7: Stator geometri ölçüleri .....   | 59 |
| Tablo 4.8: Slot geometri ölçüleri .....   | 59 |
| Tablo 4.9: Standart sacların manyetik özellikleri .....                                     | 60 |
| Tablo 4.10: Rotor geometri ölçüleri.....  | 63 |
| Tablo 6.1: Gerilim vektörlerinin akı konumuna göre akı ve moment<br>üzerindeki etkisi ..... | 87 |
| Tablo 6.2: Doğrudan moment kontrolü vektör tablosu.....                                     | 87 |
| Tablo 7.1: DRKSM'nin çeşitli hızlardaki Zıt-EMK değerleri.....                              | 90 |
| Tablo 7.2: DRKSM ile geleneksel motorlar ile karşılaştırılması.....                         | 99 |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|              |   |  |
|--------------|---|--|
| <b>AA</b>    | : | Alternatif Akım                        |
| <b>ASM</b>   | : | Asenkron Motor                         |
| <b>ASRM</b>  | : | Anahtarlamaalı Senkron Relüktans Motor |
| <b>DA</b>    | : | Doğru Akım                             |
| <b>DRKSM</b> | : | Dıştan Rotorlu Karma Senkron Motor     |
| <b>DTK</b>   | : | Doğrudan Tork Kontrolü                 |
| <b>AYK</b>   | : | Alan Yönlendirmeli Kontrol             |
| <b>EAM</b>   | : | Eksenel Akılı Motor                    |
| <b>EMK</b>   | : | Elektromanyetik Kuvvet                 |
| <b>FDAM</b>  | : | Fırçasız Doğru Akım Motoru             |
| <b>OECD</b>  | : | Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü |
| <b>SEY</b>   | : | Sonlu Elemanlar Yöntemi                |
| <b>SMAM</b>  | : | Sabit Mıknatıslı Anahtarlamaalı Motor  |
| <b>SMSM</b>  | : | Sabit Mıknatıslı Senkron Motor         |
| <b>SMVM</b>  | : | Sabit Mıknatıslı Vernier Motor         |
| <b>UVDMK</b> | : | Uzay Vektörü Doğrudan Moment Kontrolü  |

## ÖNSÖZ

Günümüzde fosil yakıt rezervlerinin azalmasıyla birlikte, alternatif enerji kaynağı arayışları hızla sürmektedir. Her geçen gün artan enerji talebini karşılamak için çeşitli santraller kurulmaktadır. Fosil yakıtların tüketilmesinde büyük rol oynayan ulaşım sektöründe de fosil yakıt ihtiyacını en aza indirmek ya da bağımlılığı tamamen ortadan kaldırmak için elektrikli araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ek olarak, elektrikli araçlar fosil yakıtların tüketiminden ortaya çıkan karbon salınımlarının azaltılmasında da büyük öneme sahiptir. İçten yanmalı motorlarda enerjinin geri dönüşümü olmamasına karşın elektrik motorlarında frenleme esnasında enerjinin geri dönüşümü de mümkündür. Sürüş konforu bakımından sabit tork (moment) ve düşük hızlarda elde edilen düzgün artış eğilimli ivme, elektrik motorlarıyla sağlanabilmektedir. İçten yanmalı motorların ucuzluğu kullanıcılarını teşvik ediyor olsa da gelecekte fosil yakıtların arzında meydana gelecek düşüş nedeniyle kullanıcıların tümüyle elektrikli araçlara yöneleceği açıktır. Yakın gelecekte ülkemizde olduğu gibi dünyada da artan eğilimle birlikte birçok firma elektrikli araçları piyasaya sürecektir. Elektrikli arabaların kullanımını yaygınlaştırmak için alt yapı çalışmalarına günümüzde büyük önem verilmektedir.

Bir elektrikli aracın üç önemli bileşeni vardır. Bunlar, elektrikli motoru, batarya ve güç aktarım organıdır. Elektrikli araçlar tahrik bakımından da iki kısımda incelenebilir. Bunlar, içten yanmalı motorların tahrik sistemiyle aynı olanlar ve doğrudan tahrik sistemiyle çalışanlardır. Doğrudan tahrikli sistemlerde elektrik motorları gücü doğrudan tekerleklere aktarır. Böylece aynı güçteki içten rotorlu motorlara göre verim artışı sağlanabilmektedir. Diğer taraftan, aktarım organlarının olmaması aracın dönel eylemsizliğini azaltmaktadır. Üstelik elektrik motorlarının doğrudan tekerlek içine yerleştirilmesi sayesinde motorun ağırlık merkezi dağıtılır ve hareketli parça sayısı azaltılmış olur. İstenildiği takdirde her bir tekere elektrik motorunun yerleştirilmesi de bu sistemin bir diğer avantajıdır.

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlar için yeni bir dıştan rotorlu karma senkron motor çalışması hedeflenmiştir. Önerilen motorun tasarımı, optimizasyonu ve sürülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım ile mevcut arabaların da elektrikli araçlara dönüştürülmesi mümkündür.

Doktora çalışması süresince desteklerini esirgemeyen ailem ve eşime, değerli danışmanım Doç. Dr. Selami KESLER'e, tecrübelerinden istifade ettiğim Prof. Dr. Yusuf ÖNER'e, çalışmalarımındaki ölçüm ve test cihazlarını temin eden Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na, bu tezin şekillenmesinde her zaman yol gösteren Prof. Dr. Selim BÖREKÇİ'ye, her an desteğini yanımda hissettiğim Arş. Gör. Akif DEMİRÇALI'ya ve bugüne kadar emeği geçen bütün değerli hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, Elektrikli Araçlar Test Laboratuvarı'na KRM004 numaralı proje kapsamında çok büyük destek veren Pamukkale Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Hüseyin BAĞ'a kendim ve bölüm adına teşekkür ve saygılarımı sunarım.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Genel Bilgiler

Günümüzde fosil yakıt rezervlerinin azalmasına karşın gelişen endüstri ve ulaşım sektörünün enerji ihtiyacı artmaktadır. Bunun sonucunda alternatif enerji kaynağı arayışları hızla sürmektedir. Ayrıca, fosil yakıtların tüketilmesinde büyük rol oynayan ulaşım sektöründe de fosil yakıt ihtiyacını en aza indirmek ya da bağımlılığı tamamen ortadan kaldırmak için elektrikli araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ek olarak fosil yakıtların tüketiminden ortaya çıkan karbon salınımlarının azaltılmasında sıfır emisyonlu elektrikli araçların büyük payı vardır. Elektrikli araçların diğer avantajı ise elektrikli motorlar frenleme esnasında enerjinin tekrar depolanmasına olanak sağladığı için içten yanmalı motorlara göre verimli olmasıdır. Sürüş konforu bakımından ise sabit tork (moment) ve düşük hızlarda elde edilen düzgün artış eğilimli ivme elektrik motorlarıyla sağlanabilmektedir. Şu an içten yanmalı motorların ucuzluğu kullanıcıları teşvik ediyor olsa da gelecekte fosil yakıtların arzında meydana gelecek düşüş nedeniyle maliyetlerde aşırı artış meydana gelecek ve kullanıcıların büyük kısmı elektrikli araçlara yönelecektir (Larminie ve Lowry 2012).

2019 yılı verilerine göre, 2050 yılına kadar Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (OECD) ülkelerinde ulaşımda kullanılacak enerji ihtiyacı yatay seyrederken OECD'ye üye olmayan ülkeler için enerji talebinde %77 artış görülmektedir. 2050 yılında ise bu enerji ihtiyacının yaklaşık %30'u yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması beklenmektedir. Toplam enerjinin büyük kısmı endüstri ve ulaşım sektörü tarafından tüketilmektedir. 2019 yılında ulaşım sektöründe araçların %59'u sıvı yakıtlar kullanmaktadır. Ancak, Kyoto Antlaşması kapsamında emisyon kısıtlamalarından dolayı dizel kullanımının giderek azalması beklenmektedir. Günümüzde ulaşımda kullanılan doğalgaz ve elektrik ise diğer yakıtlara göre düşük olsa da önümüzdeki 30 yılda yüksek artış potansiyeli bulunmaktadır (Administration 2019).

İçten yanmalı motorların tüm olumsuzluklarını azalmak için petrol türevli yakıtlar ve katkılı yakıtlar gibi alternatif enerji yakıtların kullanılmasına yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Ancak, petrole benzer bu yakıtlar ortaya çıkan zararlı atıkları azaltmasına rağmen sifira düşürememektedir. Otomotiv sektöründe mevcut araç sistemlerine elektrikli motorlar eklenerek hibrit (karma) araç ya da içten yanmalı motor çıkartılarak tamamı elektrikli araç olan modeller üretilmektedir. Günümüz elektrikli araçları, içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında en büyük problem aracın sürüş menzili olarak görülmektedir. Yakın gelecekte bu problemin üstesinden gelmek üzere tasarlanan hibrit elektrikli araçlar ise uzak gelecekte yeterli olmayacaktır. Tamamı elektrikli araca olan ihtiyaçlar doğrultusunda, yapılan son araştırmalar çeşitli yapısal iyileştirmelere yönelmiştir.

Modern elektrikli araçlar, enerji kaynağı olarak kullanılan batarya, elektrik enerjisini harekete dönüştüren elektrik motoru ve güç aktarım organları olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Ek bileşenler olarak, elektrikli sistemleri destekleyen güç dönüştürücüleri, batarya şarj sistemleri, motor sürücüleri, sensörler ve kullanıcı isteklerini sisteme ileten kullanıcı arayüzü, koruma birimleri ve araç görsel uyarıları gibi yardımcı sistemler bulunmaktadır. Elektrikli araçlarda hareketi sağlayan motorlar içten rotorlu ve dıştan rotorlu olarak iki kısımda incelenebilir. İçten rotorlu motorların kullanıldığı sistemlerde genellikle mekanik diferansiyel ve dişliler kullanılır. Buna karşın dıştan rotorlu elektrikli motorların kullanıldığı sistemlerde, gücü doğrudan tekerleklere aktarması nedeniyle aynı güçteki içten rotorlu motorlara göre verim ve moment artışı sağlanabilmektedir. Diğer taraftan, aktarım organlarının olmaması aracın dönel eylemsizliğini azaltmaktadır. Üstelik elektrik motorlarının doğrudan tekerlek içine yerleştirilmesiyle motorun ağırlık merkezi daha iyi hale gelir ve hareketli parça sayısı da azaltılmış olur. İstenildiği takdirde her bir tekere elektrik motorunun yerleştirilmesi de mümkündür. Bir diğer avantajı ise mevcut fosil yakıtlı araçların elektrikli araca dönüştürülmesinde kolaylık sağlamasıdır.

Kısaca, yakın gelecekte fosil yakıtlı araçların çevreye verdiği zararlar, fosil yakıtların arzında meydana gelecek düşüş sonucunda tüketiciye yansıtacak maliyet ve sürüş konforu göz önüne alındığında elektrikli araca olan ihtiyaç büyük bir artış gösterecektir. Bu süreçte elektrikli araçlarda kullanılan motorların, kolay kontrol edilebilir, sürüş konforuna uygun ve güvenilir olması gerekmektedir. Bu tez çalışması



kapsamında, elektrikli araçlarda kullanılan geleneksel motorların yerine kullanılacak dıştan rotorlu karma bir motorun tasarımına yer verilmiştir. Bu karma motor, her devirde moment üretebilen, senkron hızda rotor bakır kayıplarını elimine eden, aşırı yük altında asenkron toparlama sayesinde senkron hızı kopma yaşamadan tekrar sağlayabilen özelliklerde gerçekleştirilmiştir.

## 1.2 Literatür Özeti

Elektrik motorunun icadı, Michael Faraday'ın 1821 yılındaki çalışmalarından sonraki yıllarda gerçekleştirilmiştir. 10 yıl sonra Joseph Henry elektrikli araca hareket sağlayacak ilk makineyi elektromıknatıs kullanarak icat etmiştir. İlk döner elektrik makine olan doğru akım (DA) motoru 1832 yılında İngiliz bilim adamı William Sturgeon tarafından icat edilmiştir. Aynı yıllarda içten yanmalı motorun temel prensipleri ortaya çıkarken Robert Anderson yeniden şarj edilemeyecek batarya kullanarak elektrikli motorların gündelik hayatta kullanılabileceği elektrikli araç ile yeni bir ufuk göstermiştir. 1837 yılında tekrar şarj edilemeyen pillerden gücünü sağlayan elektrikli lokomotif, kimyager Robert Davidson tarafından üretilmiştir. Çok geçmeden Thomas Davenport ABD'de lokomotif benzeyen elektrikli araç patentini almıştır. 1854 yılında Wilhelm J. Sinsteden şarj edilebilir bataryayı icat etmesi ve 5 yıl sonra Fransız Fizikçi Gaston Plante ve Camille Faure'nin bataryanın akım besleme kapasitesini arttırması, elektrikli araçların önünü açmıştır. 1880 yılında deneysel olarak Rusya'da elektrikli tramvay kullanılmıştır. İlk ticari elektrikli sokak arabası Magnus Volk tarafından tasarlanan Brighton Electric Railway, İngiltere'de açılmıştır. 1885 yılının sonlarına doğru ise yolcu taşımak amacıyla Britanya'da Blackpool Tramway hizmete girmiştir. Osmanlı Devleti'nde ise ilk elektrikli otomobil II. Abdülhamit tarafından İngiltere'den 1888 yılında sipariş edilmiştir. Şirketin mühendisleri özel olarak hazırladıkları bu otomobilin ön kısmında tek bir büyük teker yerine birbirine yakın iki küçük teker kullanmışlardır. Bu aracın bir beygirlik motorunu 20 Amper 48 Volt olan batarya beslemekteydi. Abdülhamit bu otomobilden çok memnun kalmış, bu iki mühendisi ödüllendirmiş ve bu sayede mühendisler uluslararası bir üne kavuşmuşlardı. Baker Runabout 1893 yılında Amerika'da Varta Piller'inin kurucusu tarafından üretilerek Almanya'ya ithal edilmiştir. Baker Runabout

ile ulaşılan en yüksek hız olan 97 km/sa rekoru, 1899 yılında La James Contente ile 106 km/sa olarak yenilenmiştir.

19. yy. sonlarına doğru fosil yakıt tüketen motorlar manuel olarak alıştırılırdı. Ayrıca motorun çıktısı olan egzoz dumanı ve güvensiz olması diğer dezavantajlarıydı. Bundan dolayı o yıllarda elektrikli araçlar geleceğin taşıma araçları olarak yerini almıştır. Birçok elektrikli araç otomobil, taksi ve otobüs olarak üretilmiştir. 1896 yılına kadar süre gelen şarj etme altyapısındaki eksikliği aşmak için getirilen çözümlerden biri değiştirilebilir batarya hizmeti Hartfor Electric Light Company tarafından elektrikli kamyonlar için ilk defa uygulamaya konulmuştur. Araç sahibi, aracını bataryasız olarak General Electric şirketinden satın alıyordu ve elektriği de Hartfor Electric'ten değiştirilebilir bataryalar vasıtasıyla satın alıyordu. Araç sahibi, değişken bir mil başına şarj creti ve kamyon depolama ve bakımını kapsayan aylık bir hizmet creti ödüyordu. İlerleyen yıllarda Thomas Edison elektrikli araçların parlak geleceği olması düşüncesiyle pil teknolojisi üzerine çalışmıştır. Fakat fosil yakıtların fiyatının pillerin değiştirilmesine göre ucuz olması ve fosil yakıtlara ulaşılabilirliğin daha kolay olması nedeniyle elektrikli araçlara olan talep azalmıştır. Ek olarak pillerin şarj edilme sorunu ve fosil yakıt ile karşılaştırıldığında birim ağırlıkta alınan enerjinin çok az olması, elektrikli araçlara olan talebi olumsuz etkilemiştir. Bu süreçte, elektrikli araçların kullanım alanı toplu taşıma araçlarıyla sınırlı kalmıştır.

1908 yılında Henry Ford dünyayı değiştirecek bir fikirle ortaya çıkmıştır. Üretim bandı fikri ile içten yanmalı motorlar çok hızlı üretilerek birim maliyeti dşrmştir. Bunu retim aşamalarını bir işçinin kolaylıkla altından kalkabileceği iş parçacıklarına bölmesiyle sağlamıştır. Ford markası altında üretilen Model T aracından bu fikirle günde 4-5 tane üretmek mümkündü. Ayrıca petrol bazlı yakıtla daha hızlı ve uzun mesafeli sürüş yapılabilirdi. Böylece elektrikli araçların geleceğine büyük darbe vurulmuştur. Bir darbede Charles Kettering içten yanmalı motorların ilk hareketini veren manivela yerine marş motorunu üretmesiyle gelmiştir.

20. yy. ortalarında DA ve alternatif akım (AA) sistemlerin gelişmesiyle elektrikli trenler kullanılmaya başlanmıştır. Fakat elektrikli otomobiller ile fosil yakıt tüketen otomobiller karşılaştırıldığında, elektrikli olanların birçok avantajının olmasına rağmen rotalarının üzerinde şarj istasyonlarının bulunmaması ve pillere olan güvenin yetersiz olması nedeniyle elektrikli trenlerin başarısını yakalayamamıştır.

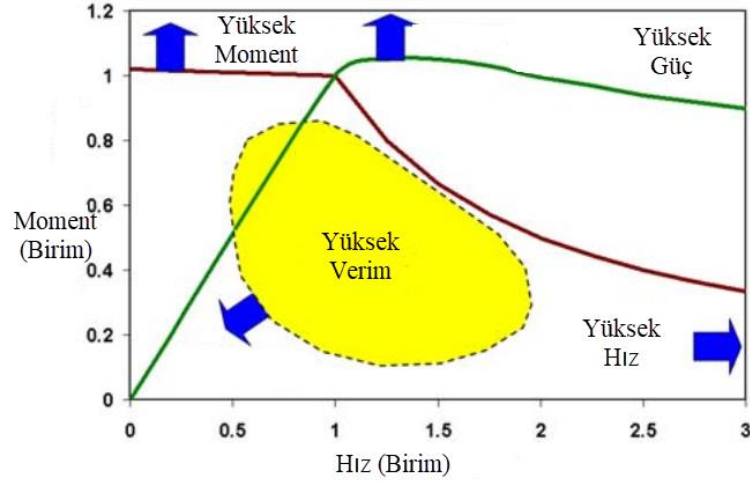
1966 yılına gelindiğinde Amerikan şehirleri hava kirliliğiyle boğuşuyordu. Dönemin ABD başkanı Lyndon B. Johnson çocuklarda artan kurşun zehirlenmesine sessiz kalmamış ve senatoya hava kirliliğiyle ilgili çözüm önerileri sunulmuştu. Önerilerden biri, elektrik motorlu arabaların yeniden gündeme getirilmesiydi. Yapılan kamuoyu araştırması sonucunda 33 milyon Amerikalı, bu öneriye evet demiş ve elektrikli araba hayalleri yeniden dirilmeye başlamıştır. Ekim 1973'te Amerika'ya petrol ihraç eden Arap ülkeleri, 1973 Arap- İsrail savaşında İsrail'i destekleyen ABD'ye petrol ambargosu uygulamaya başladı. Buna dönemin çevreci hareketlerinin baskısı da eklenince, yenilenebilir enerjiye ilgi artmış, elektrik motorlu arabalara hem tüketiciler hem de üreticiler yeniden sıcak bakmaya başlamıştır. 20. yy. sonları ile 21. yy. başları arasında fosil yakıtların rezervinin yakın gelecekte tükeneceği endişesiyle elektrikli araçların tümünde artan bir talep olmuştur. Elektrikli motorun menzil ve pillerin şarj problemini aşmak için birçok otomobil firması hibrit olarak bilinen iki farklı yakıt türüyle çalışan otomobilleri üretmişlerdir (Larminie ve Lowry 2012).

Literatürde, elektrikli araç teknolojisinin içinde bulunan batarya, elektriksel sistemler, elektrik motorları ve yardımcı bileşenler incelenmiştir. En yeni elektrikli araç teknolojileri, gelişmiş güç dönüştürücülü ve denetleyicili AA motor sürücülerini ve gelişmiş piller karşılaştırılmıştır. Güvenilir ve enerji tasarruflu hafif araçların gelecekte büyük pazara sahip olacağı vurgulanmıştır (Chan 1993). Elektrikli araçlarda sistem bileşenleri, literatürde farklılık göstermekte olup güç aktarım organları ile elektrik motoru yerleşimine göre altı farklı sistem önerilmiştir (Ehsani ve diğ. 2005). Tek motorlu sistemlerde farklı hız seçeneklerini uygun dönüşümlü moment ile tekerlere aktaran vites-kavrama kutusu bulunabileceği gibi vites kutusu olmadan mekanik diferansiyelli ya da doğrudan teker mili bağlantılı modeller de uygulamada mevcuttur.

Doğrudan ya da bir dişli kutusu üzerinden teker bağlantısı olan çift motorlu sistemlerde, yazılım tabanlı güç elektroniği sürücülerini üzerinden elektronik diferansiyel sağlamak mümkündür. Elektronik diferansiyel; yolun dönüş açısına, araç hızına ve dingil mesafesine bağlı olarak dönüşlerde tekerlerin farklı hız ve momentler ile sürülmesi demektir. Bu amaçla, araç sürücüsünün doğrusal hız talebine uygun olarak yolun dönüş açısı dikkate alınıp aracın dönemeçte savrulması engellenir. Diğer taraftan, elektrikli araç için tasarlanmış motorun yalın hızı izin verilen doğrusal hızdan

çok yüksek ise motor ile teker arasına yerleştirilen bir tür redüktör bazlı dişli takımı kullanılarak uygun teker hızı elde edilmiştir. Bu modellerin en farklı olanı ise aracın tahrik elemanı olan motorun teker içine doğrudan yerleştirilmesidir (Xue ve diğ. 2008).

Teker içi doğrudan tahrikli motor yapısında fırçasız doğru akım motorları (FDAM) tercih edilse de son yıllarda sensörsüz ve sorunsuz doğrudan yol alabilen bir motor arayışı baş göstermiştir. Elektrikli araçlarda gerekli olan moment-güç eğrisi Şekil 1.1’de verilmiştir. Burada, aracın başlangıçtan nominal hıza ulaşana kadar sabit momente, nominal hızın üzerinde ise sabit güce ihtiyacı olduğu görülmektedir. Geleneksel elektrikli motorlara baktığımızda da bu iki çalışma bölgesi yer almaktadır.



Şekil 1.1: Elektrikli araçlarda moment-güç gereksinim diyagramı (Zhu 2007)

Elektrikli araçların moment-hız ve güç-hız karakteristiği elektrik motorları ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, elektrik motorları her hızda yüksek moment ve ivmelenmeyi sağlayabilmektedir. Literatürde elektrikli araçlar için uygun motor seçimi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır (Zhu 2007) (Xue ve diğ. 2008) (Zeraoulia ve diğ. 2006) (Ehsani ve diğ. 2007). Yapılan kıyaslama ve sınıflandırmada, motorlar komütatörlü (anahtarlamalı) ve komütatörsüz (anahtarlamasız) olarak iki ana başlıkta toplanmıştır. Sabit mıknatıslı, seri, şönt ve kompunt bağlantı çeşitleriyle DA motorları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu motorların hız-moment denetimi diğer motorlara kıyasla daha kolay ve daha doğrusaldır. Ayrıca, elektrikli araçlarda kullanılan batarya bir DA enerji kaynağıdır. Dolayısıyla DA motorunun denetimi daha ucuz ve daha kolay

yapılabilmektedir. Ancak gelişen teknoloji ile yüksek verimli ve yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlara ilgi artmıştır. Bu motorlar içinde tasarımı iyileştirilmiş indüksiyon tip yani Asenkron Motorlar (ASM), Sabit (sürekli-kalıcı) Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM), Anahtarlama Senkron Relüktans Motor (ASRM) ve FDAM yer almaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte AA sürücüleri daha popüler hale gelmiştir. Böylece basit yapıları ve göreceli olarak daha verimli olan ASM tercih edilmeye başlamıştır. Ek olarak sabit mıknatıslı ve senkron relüktans tip motorlara da eğilim artmıştır. ASM, SMSM ve ASRM ile yapılan çalışmada, her bir motorun elektrikli araçlarda farklı çalışma eğrilerinin olduğu gözlenmiştir. Sürücü konforu bakımından gürültülü çalışma ve sarsıntılı sürüşte sargı oluk-oyuk (slot) geometrileri, faz başına belirlenen slot sayıları ve denetim stratejilerinin önemli olduğu ortaya konmuştur. Motor kayıpları göz önüne alınarak, tipik çalışma noktalarında, yapılan araştırmalarda SMSM'nin avantajlı olduğu gösterilmiştir (Yang ve diğ. 2015). Bir başka çalışmada (Pellegrino ve diğ. 2012), ASM'nin kısa devre çubuklarında oluşan kayıp nedeniyle SMSM'den daha verimsiz olduğu tespit edilmiştir. Düşük hızlardaki moment ve yüksek hızlardaki güç kapasitesini belirlemek üzere ASM, ASRM ve FDAM arasında yapılan kıyaslama çalışmasında FDAM'ın üstünlükleri ortaya konulmuştur. Her bir motor teknolojisinin birbirleri arasında üstünlükleri olduğu, ancak elektrikli araç için uygun özellikleri olan motorların belirlenmesine yönelik çalışmalar olduğu da vurgulanmıştır (Zhu 2007). SMSM ile FDAM arasında yapılan bir karşılaştırma çalışmasında FDAM'ın yüksek güç yoğunluğu ve yüksek momente sahip olmasına karşın, SMSM'nin daha verimli ve daha düşük moment dalgalanmasına sahip olduğu belirtilmiştir (Chau 2015).

İçten rotorlu sistemlerdeki kavrama dişlisi, dişli kutusu ve tek motorlu sistemlerde mekanik diferansiyel gibi verimliliği düşüren parçalar kullanmadan dıştan rotorlu çift elektrik motorlu sistemler ile daha verimli ve güvenli sürüş yapılabileceği sunulmuştur (Tahami ve diğ. 2003) (Yamakawa ve diğ. 2005) (Esmailzadeh ve diğ. 2001). En yaygın kullanılan dış rotorlu FDAM motoru Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM ya da SEY) ile incelenmiş olan bir çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan FDAM motorunun moment dalgalanması %17,58'den %8,4'e kadar düşürülmüştür (Yuan ve diğ. 2019). Bir diğer çalışmada, çift statorlu ve çift uyartım sargılı olarak

tasarlanan FDAM, sabit mıknatıslı Vernier motor (SMVM), sabit mıknatıslı anahtarlama motor (SMAM), aksel akı motor (EAM) ve SMSM karşılaştırılmıştır. EAM'un elektrikli araçlar için uygun bir moment karakteristiğine sahip olduğu tespit edilmiştir. SMAM ile yapılan bir başka çalışmada ise farklı slot ve kutup sayısı ile dişli etkisi momenti %20 azaltılmıştır (Zhao ve diğ. 2017). Dış rotorlu sabit mıknatıslı motor tasarımlarında maksimum moment, uygun mıknatıs yerleşimiyle artırılırken düşük moment dalgalanmasını da sağlamak mümkündür (Lebkowski 2018). Günümüze kadar yapılan çalışmalarda ASM ve SM elektrikli araç gereksinimlerini tam anlamıyla sağlamadığı tespit edilmiştir. Elektrikli araçlarda henüz kullanılmayan fakat literatürde diğer motorlar yerine kullanılmak üzere karma motor tasarımları da yer almaya başlamıştır. Bunlardan birisi ASM ile SMSM'nin avantajlarını bir araya getiren Doğrudan Yol vermeli Senkron Motor (DYSM) tasarımıdır. Ancak yapılan çalışmalar içten rotorlu yapısı üzerine yoğunlaşmıştır.

Literatürde endüstriyel amaçlı içten rotorlu DYSM üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak iki farklı rotor yapısıyla motorların analitik çözümü yapılarak senkronizasyon kabiliyeti ve kritik çalışma bölgeleri sunulmuştur (Miller 1984). Sabit  $V/f$  ve değişken frekanslı-sabit gerilim ile yapılan deneysel çalışmada gerilimin motor karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar kaynak gerilimin motorun senkronizasyon aşamasında büyük etkisi olduğunu göstermiştir (Rahman ve diğ. 1997). Buna ek olarak, rotor direncinin de gerilim kadar senkronizasyonda etkili olduğunu gösteren çalışmalarda vardır (Soulard ve Nee 2000). Yapılan çalışmalarda, senkronizasyon problemi ve yüksek maliyeti olmasına karşın bu motor, yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek verimliliğe sahip olduğu görülmüş olup senkron altı ve senkron üstü bölgede çalışma karakteristiğine sahiptir (Isfahani ve Vaez-Zadeh 2009). Başlangıç ve senkronizasyon bölgesinde yapılan incelemede kritik yüklerde mıknatıs geometrisinin ve akısının etkisi tartışılmıştır (Isfahani ve Vaez-Zadeh 2011). Bir başka çalışmada, başlangıç anında etkili olan kısa devre çubuk geometrisinin senkronizasyonda da önemli olduğu vurgulanmıştır (Jedryczka ve diğ. 2014). Ayrıca derin çubuk geometrisinin senkronizasyon probleminin aşılmasında önemli rol oynadığı rapor edilmiştir (Zawilak 2013). Diğer taraftan, maliyet/verimlilik performansını iyileştirmek için çeşitli mıknatıs malzemelerinin test edildiği çalışmalar da vardır (Richter ve Neumann 1984). Son yapılan çalışmalardan birisinde ise ASM motorlarındaki açılı çubuk yerleşiminin mıknatıs yerleşimine uygulanarak

senkronizasyon probleminin iyileştirilmesi ve moment dalgalanmasının azaltılması araştırılmıştır (Kim ve diğerleri 2009).

Motor karakteristiğini bilgisayar ortamında analiz etmek ve parametrelerin etkisini incelemek üzere çeşitli yöntemler bulunmaktadır. En yaygın kullanılan metot SEY ile 2-boyutlu analizdir. Piyasada belirli sınır koşulları altında, başlangıç koşulları kullanıcı tarafından belirlenen elektromanyetik alan problemlerini Maxwell denklemleri ile çözen uygulamalar vardır. Bu uygulamalar kullanılarak motor parametrelerinin motor karakteristiği üzerindeki etkisini incelemek mümkündür. Literatürde içten rotorlu motorlar için rotor ve stator slot geometrileri ve slot sayıları, mıknatıs yerleşimi, motor malzemeleri ve stator sargı sayıları ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Rotor geometrisinde mıknatıslar statora ne kadar yakın olursa senkron durumda yüklenme kabiliyeti ve zıt elektromanyetik kuvvet (EMK) o kadar daha fazladır. Ancak, mıknatıslar statordan uzaklaştıkça asenkron yüklenme kabiliyeti ve verimlilik artar ve tutma momenti (coging torque) azalır (Huang ve diğ. 2008). Rotor slotlarında bilinen slot geometrilerinden farklı yapılar kullanılarak verimlilik ve senkronizasyon kabiliyetinde iyileştirmeler sunulmuştur (Ugale ve diğ. 2012). Mıknatıs pozisyonları ile yapılan çalışmada V tipi mıknatıs geometrisi başlangıç ve kararlı hal performansı bakımından diğerlerine göre üstünlük sağlamış ancak diğer mıknatıs geometrileri de yüksek başlangıç momentine sahip olmuştur (Shehata 2014). Bu çalışmalarda kullanılan 2-boyutlu SEY ile yapılan çalışmalarda yüksek hızlı bilgisayar ya da fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden daha kısa sürede çözüm yapmak için analitik yöntemlere başvurulmuştur. Tensor analiz metodu ile DYSM analiz edilerek asenkron ve senkron karakteristikleri ele alınmıştır (Tsuboi ve diğ. 2013). Doyum durumu ve deri etkisi göz önüne alınarak geliştirilen bir diğer analitik metot ile motor tasarımı gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla desteklenmiştir (Mingardi ve Bianchi 2014). Analitik yöntemin daha hızlı çözüm sağlaması sayesinde motor parametrelerinin maksimum moment ve başlangıç akımı üzerindeki etkisi kısa sürede incelenebilmiştir (Pecho ve Hofmann 2017).

Elektrikli araçta kullanılmak üzere, araç kısıtları, özellikle teker genişliği ve çapı dikkate alınarak yapılacak dıştan rotorlu motor tasarımı için literatürde kullanılan iki yöntemden birisi, ASM geometrisine mıknatıs ekleyerek karma bir model oluşturmaktır. İçten rotorlu böyle bir karma motor üzerine yapılan bir çalışmada,

sıradan bir ASM ile bu karma motor performansı karşılaştırılmış olup içten rotorlu karma motorun daha iyi bir güç faktörüne sahip olduğu ve daha verimli olduğu rapor edilmiştir (Fei ve diğ. 2009). Farklı olarak senkron motora kısa devre çubuğu ekleyerek de aynı tip motorların elde edildiği ve bu motorlar üzerine performans testlerinin yapıldığı çalışmalar da vardır (Kim ve diğerleri 2009). Ancak, dıştan rotorlu karma bir motor geometrisinin elektrikli araçlarda tekere gömülü olarak kullanılmasına yönelik bir tasarım ya da performans analizi bu tez ile yeni literatüre eklenmiştir. Bu çalışmada, standart motor ölçüleri yerine araç tekerleğine uygun geometrik yapıda dıştan rotorlu karma senkron motor (DRKSM) tasarımı prototip ve sürücü imalatı gerçekleştirilmiştir.

Motor tasarım aşamaları; kısıtlar içinde genel geometrinin belirlenmesi, stator parametrelerinin hesaplanması ve rotor geometrisinin belirlenmesidir. Ancak ilk aşamada elde edilen tasarım yeterli performansa sahip olmayabilir. Literatürde, içten rotorlu motor performansının iyileştirilmesi için motor parametreleri optimize edilmiştir. Mıknatis boyutlarının optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada, moment yoğunluğunun artırıldığı tespit edilmiştir (Lee ve diğ. 2012). Genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında ise verimlilik, güç faktörü ve yol alma performansı iyileştirilmiştir (Shamlou ve Mirsalim 2013). Bir diğer parametre olan rotor slot geometrisi sinir ağı kullanılarak optimum değerler tespit edilmiştir (Niaz ve diğ. 2016). Optimum kararlı hal ve geçici durum için içten rotorlu DYSM'nin tasarım kriterleri sunulmuştur (Sarani ve Vaez-Zadeh 2017). Diğer taraftan, motor parametrelerinin motor karakteristiği üzerine etkilerini incelemek için parametrik analiz kullanılmaktadır.

Bilgisayar destekli her türlü motor tasarımında, genel geometrisi belirlenen motor üzerinde SEY kullanılarak mıknatis geometrisi, mıknatis konumu, kısa devre çubukları geometrisi ve dış geometride ferromanyetik malzeme olup olmamasına göre optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Karar verilen model üzerinde prototip çalışması yapılarak benzetim modeli doğrulaması ve bulguların değerlendirilerek tasarımın iyileştirilmesine yönelik adımlar atılmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında da dıştan rotorlu karma bir motor geometrisinin elektrikli araçlarda tekere gömülü olarak tasarımı için benzer yöntem ve materyal kullanılmıştır.



### 1.3 Tezin Amacı

Endüstriyel kullanımı yaygın olan asenkron motorların sürüş dinamikleri iyi olduğu gibi denetimleri de gittikçe kolaylaşmaktadır. Ancak bu motorların verimleri çok yüksek değildir. Rotor devresindeki sargı ya da akım taşıyan iletken çubukların sürekli varlığı kayıpları ve ısınmayı da beraberinde getirmektedir. Diğer yandan, özellikle başlangıç denetimleri zor olan ve yük altında davranış dinamikleri yüksek performans vermeyen mıknatıslı senkron tip motorların verimleri oldukça tatminkardır. Çünkü, rotor devresinde sürekli akım taşıyan iletken sargı ya da çubukları yoktur. Amortisör sargısı olarak kullanılan rotor çubukları olsa bile rotor ve stator devri aynı olduğundan rotor çubukları senkron hızda görünmez olmaktadır. Yani kayıpsız bir rotor seçeneği sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, her iki tip motorun üstün yanları dikkate alınarak; yüksek verimli, sürüş dinamiği kolay, başlangıç yol verme problemi olmayan, ani yüklenmelerde kopmayan, asenkron ve senkron sürüş destekli ve senkron devirde görünmez çubuklu dıştan rotorlu bir karma motoru elektrikli araçlar için tekere gömülü olarak tasarlamak; bu tasarımın sayısal ve SEY analizlerini yaparak gerçekleştirilen motorun doğrudan ve alternatif akım sürücülerini (AC Drives) üzerinden sürülmesini sağlamak ve performans iyileştirmelerini ortaya koymak amaçlanmıştır.

### 1.4 Yöntem ve Materyal

Araç tekerine uygun DRKSM'nin tasarımı için genel geometri belirlenerek farklı rotor geometrisinde mıknatıs ve çubuk yerleri, mıknatıs yönlendirmesi, çubuk ve mıknatıs boyutları en iyi performans için farklı tasarımlarda analiz edilmiştir. Bu amaçla literatür tabanlı modeller de incelenmiş olup dıştan rotorda bulunacak mıknatıs ve iletken çubukların yerleşimi, boyutlandırılması ve yönlendirilmesi üzerine dört farklı tasarım çalışması yapılmıştır. En iyi performans ölçütüyle karar verilen dış rotor geometrisi seçilmiş ve prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımda, literatürde akredite olan ANSYS Maxwell benzetim ve manyetik analiz programı kullanılmıştır. Doğrudan yol verme sürüşünde elektrikli araçlarda tercih edilen gerilim seviyesini baz alan üç fazlı alternatif gerilim kaynağı ulusal şebeke üzerinden kullanılmıştır. Diğer taraftan, elektrikli aracın hız-moment denetimli sürüşü için batarya beslemeli evirici

(inverter) tabanlı bir sürücü tasarımı yapılmış olup sürüş denetiminde değişken veya sabit oranlı Volt/Hertz kullanımına izin veren yazılım geliştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen bu sürücü devrede vektör tabanlı denetim yöntemlerinin kullanılabileceği de öngörülerek gerekli donanım yerleştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen bu sürücüde düşük gerilim, aşırı akım ve aşırı sıcaklık koruması da bulunmaktadır.

ANSYS Maxwell program tabanlı tasarım sonuçları, hedeflenen motor için analitik model çözümleriyle de doğrulanmıştır. Bu amaçla, analitik modelin çözümünde motor dinamik diferansiyel denklemlerinin Runge-Kutta temelli sayısal çözümü yapılmıştır.

Prototipleri gerçekleştirilen motor ve sürücüsü; elektronik yükleme ünitesi, şebeke beslemeli genlik ayarlı elektronik DA kaynağı ve aynı mil üzerine yerleştirilmiş moment sensörü ile generatör olarak yüklenebilen sensörlü bir FDAM ile birlikte teşkil edilen bir set üzerinde deneysel testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar hem analitik çözüm sonuçlarıyla hem de SEY temelli tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Performans ölçütleri olarak belirlenen; yüklü ve yüksüz çalışmaya ilişkin hız, moment, akım, güç katsayısı, akım ve gerilim harmonikleri, akımlardaki faz kaymaları, sabit yüklenmede senkron ve asenkron çalışma bölgeleri, asenkron kurtarma aralığı ve verim değerlendirmesi esas alınmıştır. Bu ölçütlere göre yapılan çalışmanın eleştirel değerlendirmesi yapılarak sistem iyileştirme kriterleri de orta konulmuştur. Ayrıca belirlenen ölçütlere göre yapılan çalışmanın başarımlı performansı da değerlendirilmiştir.

## **1.5 Tezin Kapsamı**

Gelecekte fosil yakıtlı araçların yerini elektrikli araçların alması kaçınılmazdır. Günümüzde ise menzil ve şarj istasyonlarının yetersizliği nedeniyle elektrikli araçlara geçiş için hibrit araçlar üretilmektedir. Bu süreçte elektrikli araçların verimliliğini ve sürüş kalitesini arttırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar elektrik motorunun yerleşimi ve verimliliği üzerine yoğunlaşmaktadır. Endüstride kullanılan geleneksel motor tasarımlarının yanı sıra elektrikli araçlar için yeni tasarımlar ortaya konulmaktadır.

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere dıştan rotorlu karma motorun tasarımı ve imalatı üzerine çalışma yapılarak sürüş testleri sonucunda elde edilen deneysel çıktılar, karşılaştırmalı ve yorumlu olarak sunulmaktadır.

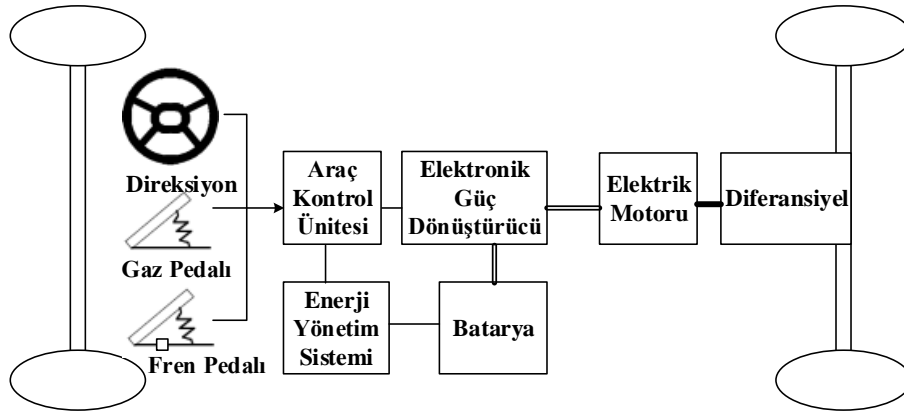
Çalışmanın içeriği yedi bölümde özetlenebilir. Giriş bölümünde, elektrikli araçlar için ihtiyaç analizi yapılarak elektrikli araçlarda kullanılan motor tercihlerine değinilmiştir. Literatürde yer alan elektrikli araç konfigürasyonu ve elektrikli araçlarda kullanılan motorların üstünlükleri ve dezavantajları incelenmiştir. Tezin amacına uygun yöntem ve materyal belirlenmiştir. İkinci bölümde, elektrikli araç modeli ve dinamikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında dıştan rotorlu motorun tercih edilme nedenleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde, tezin amacına uygun önerilen motorun dinamik modeli oluşturularak analitik çözümü ve sürekli durum analizi yapılmıştır. Modelin uygunluğunu denetlemek için Matlab/Simulink ortamı kullanılarak model benzetim çalışmaları yapılmıştır. Dördüncü bölümde, önerilen motorun tasarım aşamasında geometrileri belirlenerek SEY ile analizi yapılmıştır. Çeşitli rotor yapılarıyla yapılan analiz sonucunda belirlenen motor geometrisi için prototip üretilmiştir. Beşinci bölümde, prototip motorun DA kaynaklı elektrik araçları için sürüşünü gerçekleştirmek üzere sürücü tasarımı ve imalat aşamaları verilmiştir. Altıncı bölümde, motor sürücüsünde kullanılacak kontrol yazılımı ele alınmıştır. Yedinci bölümde, prototip motorun tezin amacına uygun olarak öncelikle doğrudan sürüş testleri yapılmıştır. Daha sonra sürücü ile sabit ve denetimli değişken oranlı V/f kontrolü kullanılarak yüklü ve yüksüz çalışmaları yapılmıştır. Ek olarak, değişken yük altında motorun davranışı izlenmiştir.

## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araçların tarihi 19. yy. başlarında elektrik motorunun icadıyla başlamıştır. 20. yy. başlarında içten yanmalı motorların icadıyla elektrikli araçlara olan ilgi azalmış olsa da gelişen teknoloji ile elektrikli araçlar hem üreticilerin hem de tüketicilerin ilgisini tekrar çekmektedir.

Son yıllarda otomotiv sektörü, fosil yakıtlı araçlarını elektrik motorları ile donatarak gerek hibrit gerekse tam elektrikli araç modelleri piyasaya sürmektedir. Elektrikli araçların verimli, temiz, güvenli ve maliyetlerin azalmasına bağlı olarak tüketicinin ilgisi de giderek artmaktadır. Gelecekte elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla elektrikli araç konfigürasyonlarında da değişiklik olması kaçınılmazdır.

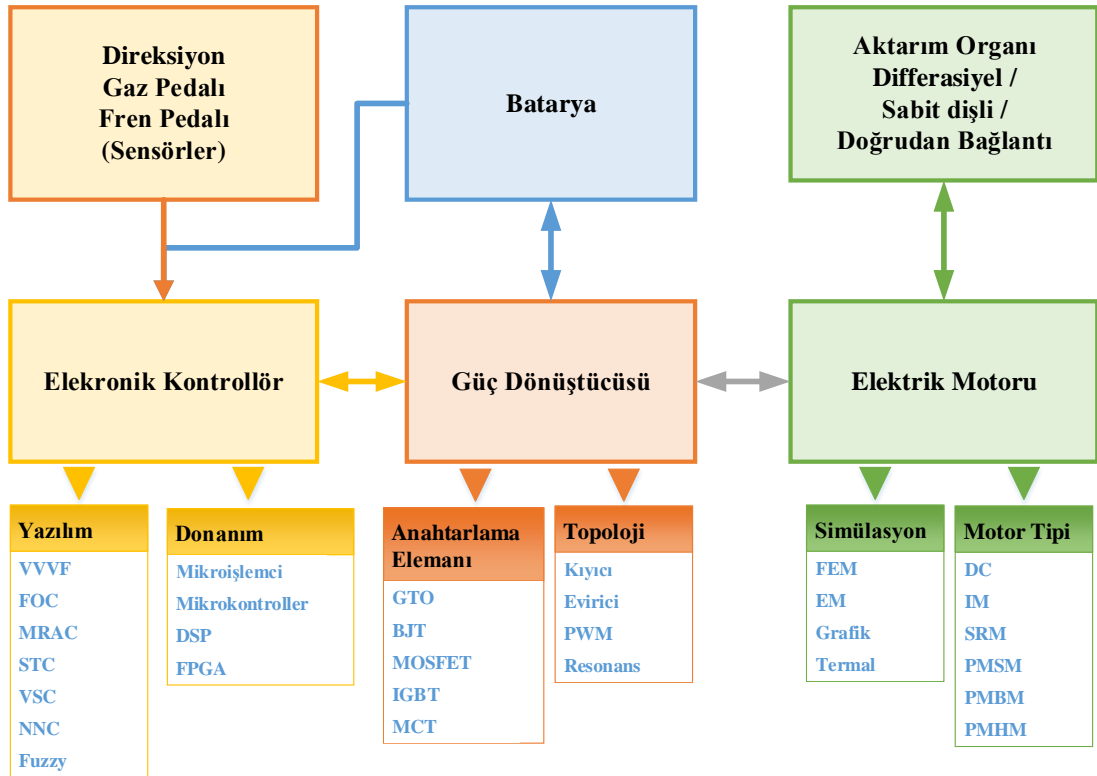
Fosil yakıtlı araçlara benzer olarak elektrikli araçlar elektrik motoru, batarya ve güç aktarım organından oluşur. Ayrıca kullanıcı arayüzü, sensor ve kontrol ünitesi gibi alt sistemler bulunur (Şekil 2.1). Tahrik yapısı bakımından günümüz fosil yakıtlı araçlara benzerdir. Ancak verimliliği, konforu ve güvenilirliği arttırmak için literatürde yeni tasarımlar sunulmuş. Mevcut araç modellerinde içten yanmalı motor yerine elektrik motoru ile sürücüsü ve yakıt deposu yerine batarya kullanılır.



Şekil 2.1: Elektrikli araç bileşenleri

Elektrikli araçta en yoğun enerji ihtiyacı kalkış ve ani hızlanma esnasında gerçekleşmektedir. Bu ihtiyacın karşılanması için ayrıca ultrakapasitörler sisteme dahil edilmiştir. İçten yanmalı motorlar sürekli enerji harcamasına karşın elektrikli motorlar sayesinde enerjinin geri kazanımı da mümkündür. Elektrikli aracın mevcut

kinetik enerjisi, mekanik fren yerine elektrik motoru generatör modunda çalıştırılarak bataryaya aktarılır ve aynı zamanda bu jeneratör yüklemeye ile aracın yavaşlaması sağlanır ya da frenleme durumunda bu geri kazanım enerjisi bir fren desteği olarak kullanılır. Fosil yakıtlı araçlardan bir diğer farkı ise elektrikli aracın hareketsiz halde iken elektrik motoruna enerji akışının kolayca durdurulabilmesidir. Günümüz teknolojisinde start/stop olarak bilinen bu yöntem içten yanmalı motor bazlı araçlarda bazı sakıncalarına rağmen kullanılmaya başlanmıştır.

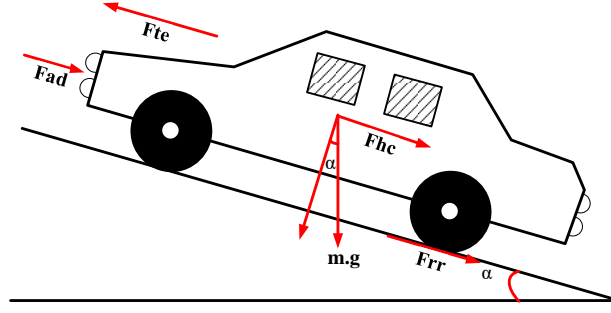


Şekil 2.2: Elektrikli araç sisteminin alt bileşenleri

Şekil 2.2’de elektrikli araç bileşenlerine ait literatürde yer alan alt bileşenler gösterilmiştir. Bu konfigürasyona uygun olarak bu tez kapsamında elektrik motoru ve motor sürücüsü üzerine çalışma yürütülmüştür.

## 2.1 Elektrikli Araç Model ve Dinamikleri

Araca sürüş esnasında etki eden kuvvetler; yuvarlanma sürtünme kuvveti, havanın sürtünme kuvveti, yokuş direnci kuvveti ve ivmelenme kuvveti olup bu değişkenler Şekil 2.3’te gösterilmiştir (Hayes ve Goodarzi 2018).



Şekil 2.3: Elektrikli araca etki eden kuvvetler

Yuvarlanma sürtünmesi kuvveti ( $F_{rr}$ ) lastiğin yol üzerindeki deformasyonu ve aktarma organlarındaki sürtünmenin birleşimidir. Tekerlekler dönmeye başladığında, tekerlekteki dikey kuvvetlerin merkezi aracın altındaki aksın yönünde hareket eder. Aracın ağırlığının bu kuvvet üzerinde doğrudan etkisi vardır. Yuvarlanma sürtünmesi kuvvetine ilişkin eşitlik denklem (2.1)'de verilmiştir.

$$F_{rr} = m_{rr} \cdot m \cdot g \quad (2.1)$$

- $F_{rr}$  : Yuvarlanma Sürtünme Kuvveti [N]
- $m_{rr}$  : Yuvarlanma Sürtünme Katsayısı
- $m$  : Aracın Kütlesi [kg]
- $g$  : Yerçekimi İvmesi [ $m/sn^2$ ]

Aerodinamik sürtünme kuvveti ( $F_{ad}$ ), bir araca etki eden viskoz sürtünme ile oluşur. Viskoz sürtünme kuvveti aracın yüzeyini saran havanın hareketi ve aracın etrafındaki girdaplarda oluşan basınç farklılığından meydana gelir. Bu sürtünme kuvveti aracın hareket yönüne ters olup, aracın ön yüzey alanına ve kabuk şekline bağlıdır. Bu değişkenlere bağlı olarak aerodinamik sürtünme kuvveti denklem (2.2)'ye göre hesaplanır. Günümüzde üretilen araçlarda ise bu kuvvetin düşük olması için aerodinamik araç gövdelerinin tasarlanması amaçlanır. Örneğin, Tesla Model S aracının hava sürtünme katsayısı 0,24 olarak tasarlanmıştır.

$$F_{ad} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2.2)$$

- $F_{ad}$  : Havanın Sürtünme Kuvveti [N]
- $\rho$  : Havanın Yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
- $A$  : Aracın Ön Yüzey Alanı [ $m^2$ ]
- $C_d$  : Havanın Sürtünme Katsayısı
- $v$  : Elektrikli Aracın Hızı [ $m/s$ ]

Aracın yokuş tırmanması sırasında ağırlığına bağlı olarak ek kuvvetler oluşur ve aracı etkiler. Aracın sürüş zemini ile yaptığı açıya bağlı olarak yer çekimi aracın tırmanış yönüne ters etki etmektedir. Ancak, araç yokuştan iniyorsa bu kuvvet negatif olur ve aracın hızlanmasına neden olur. Bu kuvvet bileşeninin hesabı (2.3) bağıntısı ile verilmiştir.

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.3)$$

$F_{hc}$  : Yokuş Direnci Kuvveti [N]  
 $g$  : yer çekimi ivmesi = 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

Aracın hızının değişimine bağlı olarak net kuvvetin hesaplanması gereklidir. Newton'un ikinci yasasına bağlı olarak ivmelenme kuvveti;

$$F_{la} = m \cdot a = m \left( \frac{\Delta v}{\Delta t_v} \right) \quad (2.4)$$

biçiminde hesaplanır. Burada,

$F_{la}$  : İvmelenme Kuvveti [N]  
 $a$  : Aracın ivmesi [m/s<sup>2</sup>]  
 $\Delta t_v$  : Hızlanma Zamanı [s]

Araca etki eden kuvvetlerin toplamı sonucunda  $F_{te}$  net kuvvet (2.5) eşitliği ile hesaplanır. Tekerleğin yarıçapı  $r$  gerekli olan moment ile doğru orantılıdır. İhtiyaç olan güç ise aracın hızı ile ilişkilidir. Toplam moment ve güç ihtiyacı sırasıyla (2.6) ve (2.7) eşitliği ile verilmiştir.

$$F_{te} = F_{rr} + F_{hc} + F_{ad} + F_{la} \quad (2.5)$$

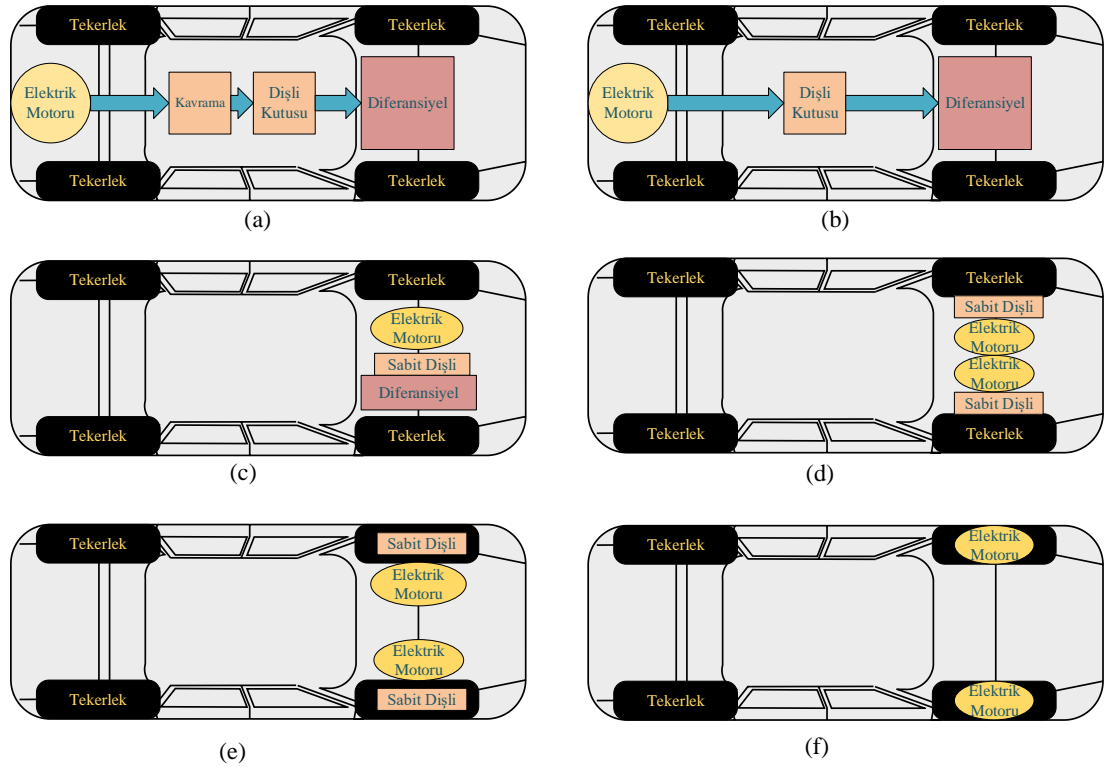
$$M_{te} = F_{te} r \quad (2.6)$$

$$P_{te} = v \cdot F_{te} \quad (2.7)$$

$M_{te}$  : Toplam Moment  
 $r$  : Tekerlek Yarıçapı  
 $P_{te}$  : Toplam Güç

## 2.2 Tahrik Yapıları

Şekil 2.4'te elektrikli araçlar için literatürde yaygın şekilde kullanılan tasarımlar gösterilmiştir. Tahrik sistemlerinde kavrama, dişli kutusu, diferansiyel ve sabit dişli yer alır. Kavrama elektrik motoru ve dişli kutusu arasındaki bağlantıyı sağlar. Elektrik motorunun moment hız-karakteristiği günümüz araçlarında olduğu gibi dişli kutusu ile ayarlanır. Aracın dönüş esnasında savrulmasını önlemek için ise mekanik diferansiyel kullanılır. Tek motorlu sistemlerde diferansiyel ve dişli kutusu bulunmaktadır. Bu sistemlerde mekanik parçaların çok olması aracın ağırlığını artırır ve verimliliği düşürür. Çok motorlu sistemlerde ise aracın dönüşü esnasında elektronik diferansiyel sistemi kullanılır. Ayrıca çok motorlu sistemlerde her bir tekerleğe motor takılabilir. Bu sistemlerde elektrik motorunun çalışma karakteristiği doğrudan elektrikli araca uygun olmalıdır. Tekerlek içine yerleştirilen modellerde ise elektrik motorunun nominal hızı, aracın hızına uygun olacak şekilde düşük devirli olması gerekir. Aracın hızı hız kontrol sürücüsü ile dişli kutusu olmadan doğrudan kontrol edilebilir.

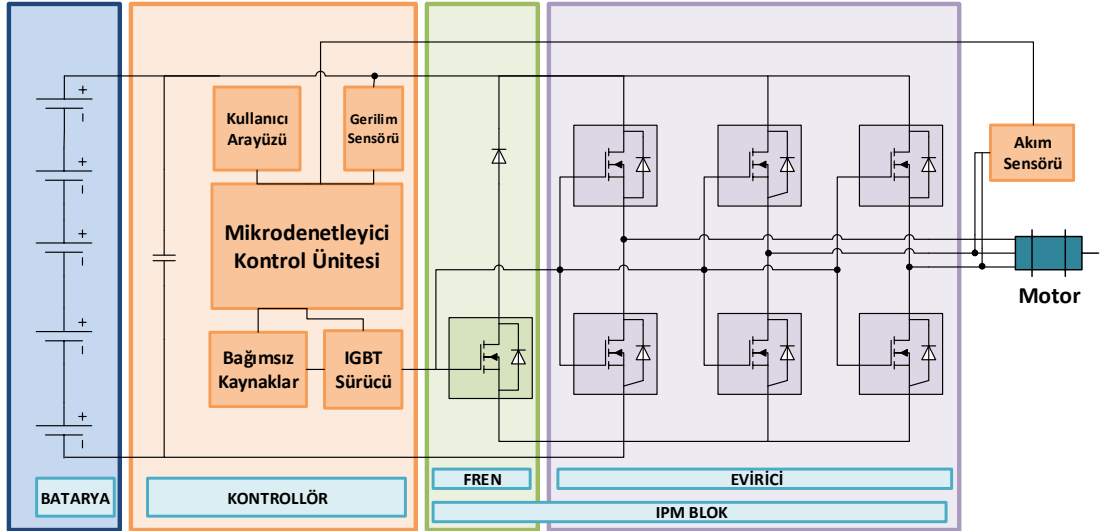


Şekil 2.4: Elektrikli araçlarda güç aktarım modellerinin farklı konfigürasyonları



### 2.3 Motor Sürücüsü

Elektrikli araçlarda motor sürücüleri batarya ile elektrik motoru arasında güç akışını sürücüden alınan bilgiye göre aracın hız kontrolünü gerçekleştirir. Aynı zamanda aracın geri güç kazanımında da motor sürücülerinin rolü vardır. Elektrikli araçlarda kullanılan sürücü devresine örnek, Şekil 2.5'te verilmiştir. Güç devresi BJT, GTO, MOSFET ve IGBT gibi yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşur. Elektrik motorunun besleme gücüne, gerilimine ve frekansına bağlı olarak kullanılacak olan anahtarlama elemanı seçilir. Kontrol sinyali ile yarı iletken elemanın sürülmesi için gerekli uygun ara devre tasarlanır. Mikrodenetleyicinin bulunduğu kontrol devresi yazılımında motora bağlı olarak değişken gerilim-değişken frekanslı kontrol, alan yönlendirmeli kontrol, model referanslı adaptif kontrol, yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri kullanılır. Sürücünün isteği günümüz araçlarında olduğu gibi direksiyon, fren ve gaz pedalından alınarak mikrodenetleyicide kontrol yöntemine bağlı olarak anahtarlama sinyali oluşturulur.

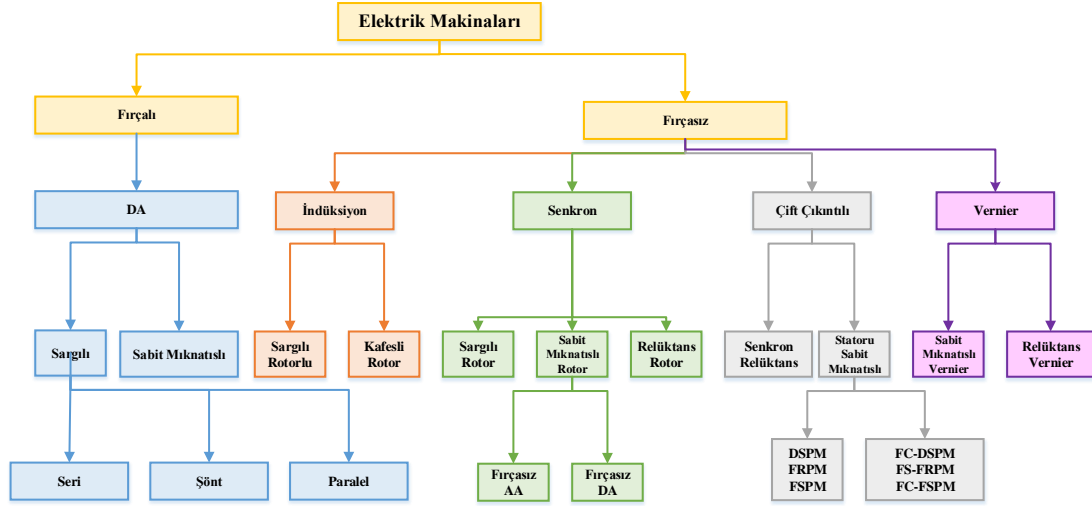


Şekil 2.5: Elektrik motor sürücü devresi

### 2.4 Elektrik Motorları

Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarında talep edilen motor karakteristiği Şekil 1.1'de verilmiştir. Elektrik motorlarının birçoğu istenilen karakteristiğe uygun olmakla birlikte motor davranışları bakımından farklılık

göstermektedir. Elektrik araç için seçilen motor, aracın genel performansını doğrudan etkilediği için çok önemlidir. Elektrikli araçlarda kullanılan motor türleri Şekil 2.6’da verilmiştir.



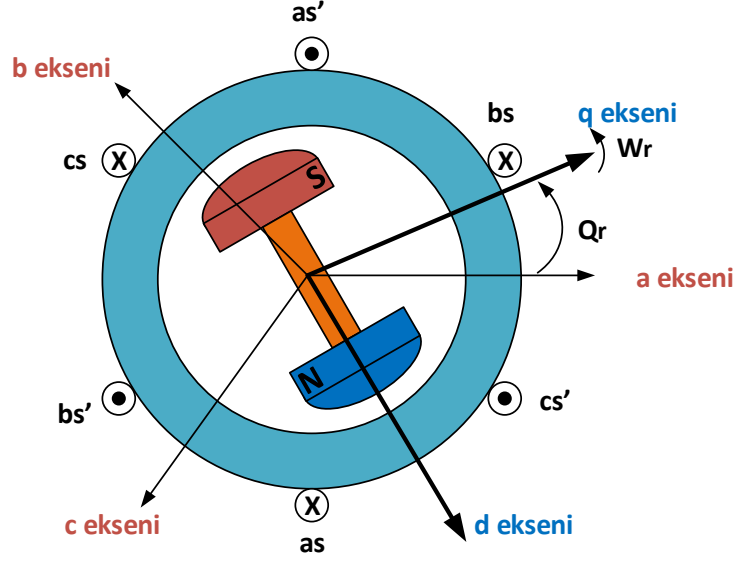
Şekil 2.6: Elektrikli araçta kullanılan motor türleri

Elektrikli araçlarda kullanılan motorlar tahrik sistemine göre iç rotorlu ve dış rotorlu motorlar olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

### 2.4.1 İç Rotorlu Motorlar

Doğru akım ile çalışan DA motorları; sabit kısım olan endüktör, hareketli kısım endüvi ve endüviye enerjinin aktarılmasını sağlayan fırça ve kolektörden oluşmaktadır. Endüktörde elektromıknatısı oluşturan sargılar kullanılabildiği gibi sabit mıknatıslar da kullanılabilir. Makinenin büyüklüğüne, istenen momente ve hızına bağlı olarak kutup sayısı değişkenlik gösterir. DA motorunun çalışma prensibi; sabit manyetik alan içerisinde akım taşıyan iletkenlerin maruz kaldığı kuvvet ile dönüşüdür. Bu motorlarda hız; motora uygulanan gerilimin genliğine ve kutup manyetik akısına bağlıdır. Kutup akısının sabit tutulması şartıyla, motor hızının kontrolü tek değişken ile kontrol edilebilmektedir. Ancak, kolektöre enerjinin aktarılması için kullanılan fırçalar, meydana gelen endüvi reaksiyonu ve anahtarlama etkileri DA motorlarının dezavantajları arasında yer alır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yapısında sabit mıknatıs bulunduran SMSM'ler fırçalı DA motorların yerini almıştır. Beslendiği akıma göre AA ve DA sargıları olmak üzere iki grupta incelenebilir. Kutup akısını oluşturan DA sargılarının yerini sürekli mıknatıslar da alabilir. Senkron motorlar, besleme frekansına bağlı olarak yüke göre değişmeyen sabit dönüş hızına sahip motorlardır. Durağan kısım stator (endüktör) ve hareketli kısım rotor (endüvi) olmak üzere iki ana kısımdan oluşan senkron motorun yapısı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Senkron motorların endüktörleri, sabit mıknatıslı veya elektromıknatıslı olarak üretilmektedir ve genellikle rotora yerleştirilmektedir. Sabit mıknatıslar rotor üzerine veya yarıklara yerleştirilerek hava aralığında manyetik alan radyal olarak yönlendirilmektedir. SMSM'nin rotor yapılarında ASM'deki sincap kafes yerine sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Böylece aynı hacimdeki asenkron motora göre daha fazla moment yoğunluğu elde edilir. Ayrıca sincap kafesli ASM'deki kısa devre çubuklarında oluşan bakır omik kayıpları senkron motorlarda yoktur. Ancak, sabit mıknatısların oluşturduğu sabit akı nedeniyle güç bölgesi sınırlıdır. Bu problemin çözümünde literatürde alan zayıflatma yöntemleri kullanılır. Senkron motorun diğer dezavantajı ise motoru aşırı yük altında kopmasıdır. Endüvi zıt EMK vektörü ile motor besleme gerilim vektörü arasında oluşan ve yüke bağlı olarak değişen bu açı kopma açısı olarak bilinir. Teorik olarak 90 derece varsayılmakla birlikte uygulamada (endüvi direncinin ihmal edilmesi gibi) varsayımlar dikkate alınmayacağından motor daha düşük açılarda kopabilmektedir. Nominal yükleme için bu açının 45 derece civarında tutulması hedeflenir. Diğer taraftan, senkron motorlar doğrudan yol alamazlar ve mutlaka yardımcı bir sisteme ihtiyaç duyarlar. Aksi halde, endüktör ve endüvi manyetik alan vektörü (oluşan mıknatıslar) birbirini yakalayamaz ve rotor hareket edemez. Rotor manyetik alanının stator manyetik alan vektörünü takip edebilmesini sağlayan bu yardımcı sistemlerdir. Stator döner alan vektörünün açısal dönüş hızı, besleme frekansına bağlı olduğundan, bu motorların sürücü sistemleri bu döner alan vektörünün yönlendirilmesi veya sıfırdan nominal hıza kadar yavaşça artırılmasını sağlamaktadır.

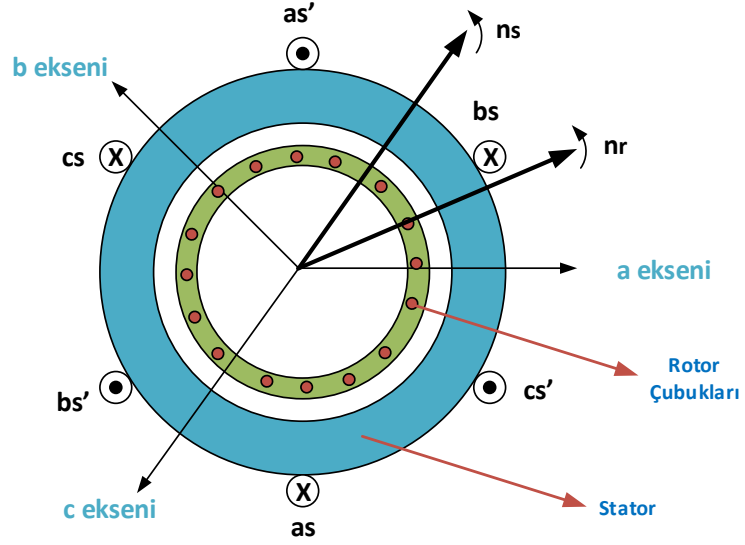


Şekil 2.7: Senkron motorun yapısı

Bunun yanısıra ASM'ler, kolay kontrol edilebilmeleri, az bakım gerektirmeleri ve ucuz olmaları nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. ASM'ler iki ana parça olan durağan kısım olan stator ve hareketli kısım olan rotordan oluşur. Rotor yapısına göre rotoru sargılı ve sincap kafesli olarak ikiye ayrılır. Rotoru sargılı motorlarda, rotorda sargılar bulunmakta ve bu sargılara, fırça ve bilezikler üzerinden ulaşılarak ilave dirençler eklenebilmektedir. Böylece motorun moment-hız karakteristiği değiştirilerek motorun başlama momenti kolayca kontrol edilebilir. Sincap kafesli rotora sahip ASM rotorunda kısa devre çubukları bulunur ve kafes şeklinde olduğu için sincap kafesli ASM olarak adlandırılır. Şekil 2.8'de asenkron motorun yapısı görülmektedir.

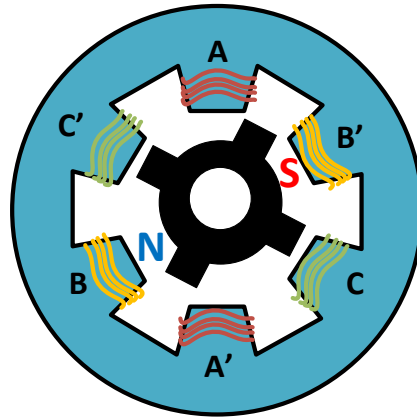
3-fazlı asenkron motorun sargılarına uygulanan, birbirleri arasında 120'şer derece faz farkı olan 3-fazlı dengeli sinüzoidal gerilim sistemi ile statorda dönen manyetik alan oluşturulur. Döner manyetik alan (döner alan) içinde kalan uçları kısa devre edilmiş rotor çubukları üzerinde gerilim indüklenir ve akım akmaya başlar. Manyetik alan içinde kalan rotor çubukları üzerinde bir kuvvet oluşur. Böylece rotor döner manyetik alanın hızına ulaşıncaya kadar takip eder ancak döner alan hızına ulaştıkça elektromekanik enerji dönüşümü artık gerçekleşmediğinden yavaşlar. Motor, yüksüzken döner manyetik alan hızına çok yaklaşan rotor hızı, yüklenmeye başladıkça düşer. Rotor ile stator hızı arasındaki bu farka kayma (slip) denir ve 's' ile gösterilir. Kayma denklem (2.8)'e bağlı olarak hesaplanır.

$$s = \% \frac{W_e - W_r}{W_e} \times 100 \quad (2.8)$$



Şekil 2.8: Asenkron motor yapısı

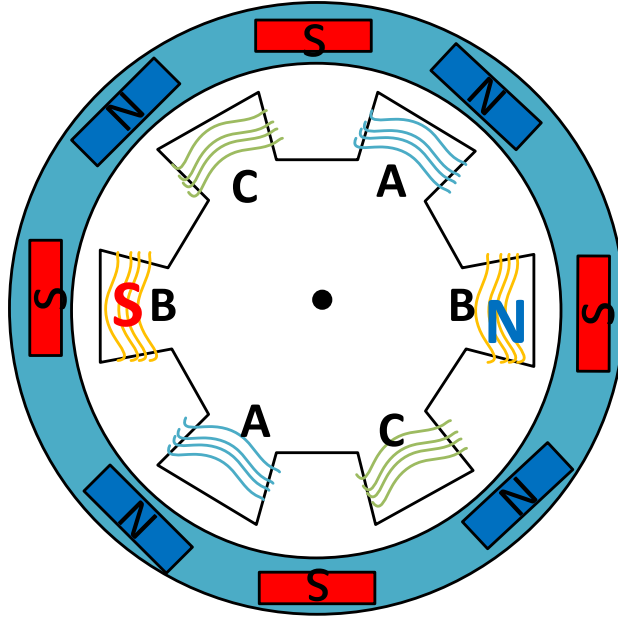
Anahtarlama relüktans motor (ARM ya da SRM) hem stator hem de rotorda çıkıntılı kutuplara sahiptir (Şekil 2.9). Rotor yapısında sargı, mıknatıs ve sincap kafes bulunmaz. Hareketi sağlamak için rotor pozisyonuna bağlı olarak anahtarlama yapılması gerekmektedir. Ucuz ve kolay imal edilebilir olmaları nedeniyle tercih edilir. Yüksek hızlarda çalışabilmesi ve ivmelenmesinin hızlı olması nedeniyle elektrikli araçlarda tercih edilirler. Ancak, motorun ürettiği momentin vuruşlu olması nedeniyle araç hızında dalgalanma ve sesli sürüş gerçekleşir. Sonuç olarak sürüş konforunu ve verimi düşürmektedir.



Şekil 2.9: Anahtarlama relüktans motor yapısı

## 2.4.2 Dış Rotorlu Motorlar

AA sürücüleri üzerinden DA ile beslenen motor çeşidi ise Fırçasız Doğru Akım Motorlarıdır (FDAM). Dıştan rotorlu FDAM motorun yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir. FDAM yapısı rotor yüzeyindeki mıknatıslar ile statorda bulunan yoğunlaştırılmış stator sargılarından oluşur. Motorun sürülebilmesi için rotor pozisyonunun bilinmesi gereklidir. Rotor konum tespiti için kullanılan en yaygın yöntem ise motorun statoruna yerleştirilen Hall-etkili sensörlerdir. Sensörlerden alınan bilgi ve dönüş yönüne göre anahtarlama sinyalleri oluşturulur. Fırçasız olmaları ve DA motorlarına göre daha verimli olmaları nedeniyle tercih edilir. Ayrıca dıştan rotoru ve yüksek anahtarlama frekanslarında çalışabilmesi nedeniyle yüksek momente ve hıza sahip olması da elektrikli araçlar için avantajdır (Chau, 2014).



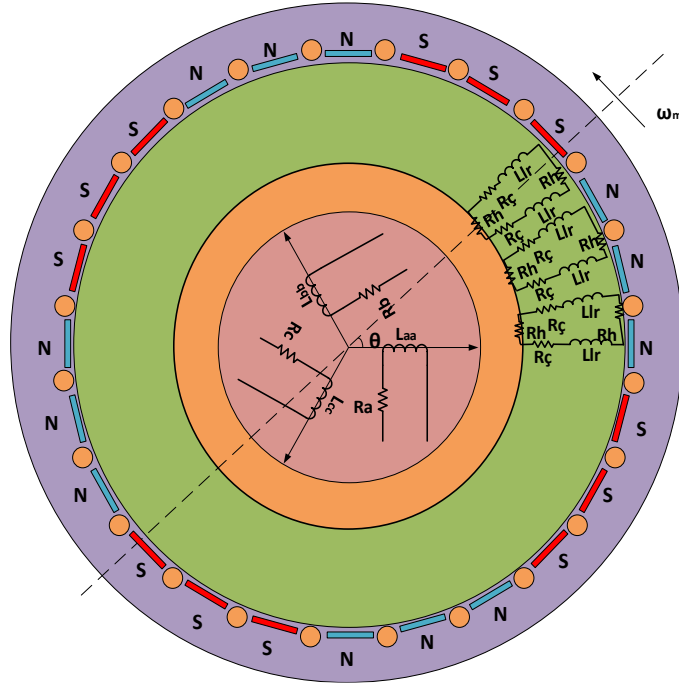
Şekil 2.10: FDAM motorun yapısı

### 3. DIŞTAN ROTORLU KARMA SENKRON MOTOR MODELİ

Karma motor modeli, stator ve dıştan rotor olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Statorda ASM'ye benzer sargı dzeneni ve rotorda ise asenkron yol almayı sağlayan sincap kafes ve senkron hızda tutunmasını sağlayan mıknatıslar bulunmaktadır. Bu çalışmada, her iki çalışma karakteristiğini bir araya getiren matematik modeli ve bu modelin sayısal analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

#### 3.1 Motor Dinamik Modeli

Tasarımı planlanan elektrik motorunun, hem dıştan rotorlu sincap kafesli asenkron davranışının üstün yönlerini hem de SMSM'nin üstün yönlerini kapsaması ve en uygun davranışı sergilemesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, tasarımı yapılacak motorun fiziksel modeline göre, elektriksel eşdeğer devresinin modellenmesi ile yapılacak analizler açısından önemlidir. Tasarımı yapılan karma motorun genelleştirilmiş modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Karma motorun genelleştirilmiş devre modeli

Motorun, üç faz stator eşdeğer devre modelinde; gerilim, akım, akı, direnç ve endüktans parametrelerine göre dinamik matris bağıntıları aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\lambda}_s = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

Burada;

- $\mathbf{V}_s$  : Stator Gerilim Vektörü
- $\mathbf{i}_s$  : Stator Akım Vektörü
- $\boldsymbol{\lambda}_s$  : Stator Akı Vektörü
- $\mathbf{R}_s$  : Stator Direnç Matrisi
- $\mathbf{L}_s$  : Stator Endüktans Matrisi

Rotor gerilim vektörü, ASM’de olduğu gibi kısa devre çubuklarında “sıfır” gerilim vektörüdür. Genelleştirilmiş makine modeline uygun olarak  $m$  adet kısa devre çubuğuna sahip olan rotor devre modeli için parametrik matris ve vektörler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{V}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{i}_r = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\lambda}_r = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_r & M_{rr} & \dots & M_{rr} \\ M_{rr} & L_r & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & \dots & L_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0 & \dots & -R_\zeta \\ -R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) & R_\zeta & \dots & 0 \\ -R_\zeta & 0 & 0 & \dots & 2(R_h + R_\zeta) \end{bmatrix}$$

Burada;

- $\mathbf{V}_r$  : Rotor Gerilim Vektörü
- $\mathbf{i}_r$  : Rotor Akım Vektörü
- $\boldsymbol{\lambda}_r$  : Rotor Akı Vektörü
- $\mathbf{R}_r$  : Rotor Direnç Matrisi
- $\mathbf{L}_r$  : Rotor Endüktans Matrisi

Rotor çubukları ile stator sargıları arasındaki gerilim geçiş matrisi (endüktans geçiş matrisi),  $L_{(s,r)}(\theta)$  matrisi olarak verilmiştir. Burada, rotor-stator arasındaki endüktans kuplaj matrisi:



$$\mathbf{M}_{(s,r)}(\theta) = [\mathbf{M}_{(s,r)}(\theta)]^T =$$

$$M_m \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{m}) & \dots & \cos(p\theta + \frac{2m-1}{m}) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}) & \dots & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2m-1}{m}) \\ \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}) & \dots & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2m-1}{m}) \end{bmatrix}$$

biçiminde olup genel endüktans geçiş matrisi;

$$\mathbf{L}_{(s,r)}(\theta) = \begin{bmatrix} L_s & \mathbf{M}_{(s,r)}(\theta) \\ \mathbf{M}_{(r,s)}(\theta) & L_r \end{bmatrix}$$

biçimindedir. Burada;

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{(s,r)}(\theta) & : \text{Ortak Endüktans Matrisi} \\ \mathbf{L}_{(s,r)}(\theta) & : \text{Motor Endüktans Matrisi} \end{aligned}$$

Yukarıda verilen tanımlamalara göre, tasarımı yapılacak DRKSM'nin dinamik modeli Denklem (3.1) – (3.4) arasında verilmiştir.

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d}{dt} \lambda_s \quad (3.1)$$

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{d}{dt} \lambda_r = 0 \quad (3.2)$$

$$\lambda_s = L_s \mathbf{i}_s + \mathbf{M}_{(s,r)}(\theta) \mathbf{i}_r + \lambda_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\lambda_r = L_r \mathbf{i}_r + \mathbf{M}_{(r,s)}(\theta) \mathbf{i}_s + \lambda_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.2 Eksen Dönüşümleri

Literatürde n-fazlı sistemden 2-fazlı sisteme geçilmesi için gerekli olan  $T(\theta)$  matrisi Denklem (3.5)'te verilmiştir. Burada,  $\alpha$  yerine  $\frac{2\pi}{n}$  değeri yazılarak 3-eksen

takımından 2-eksen takımına geçilmesi motor dinamik modelindeki denklem sayısını azaltmaktadır. Bu amaçla aşağıdaki tanımlama yapılır.

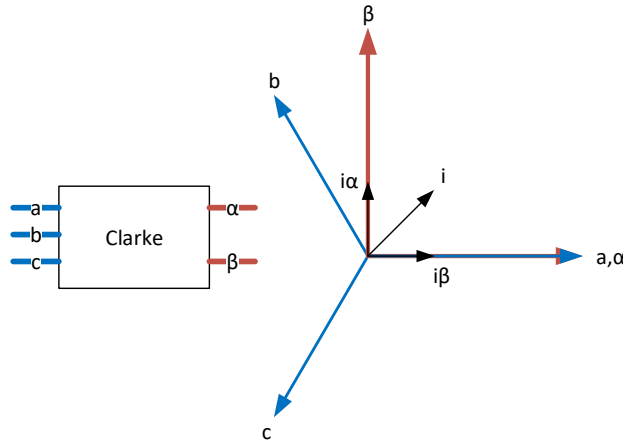
$f_{xy0} = T(\theta)f_{1,2,\dots,n}$  olmak üzere:

$$T(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{n} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \alpha) & \dots & \cos(\theta - (n-1)\alpha) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \alpha) & \dots & -\sin(\theta - (n-1)\alpha) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \dots & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

biçiminde yazılır (Fudeh, 1983).

### 3.2.1 Clark ( $\alpha\beta$ ) Dönüşümü

Elektrik motorlarının dinamik modellenmesinde faz eksen düzlemi için; gerilim geçiş matrisindeki açısal frekansın yani eksen hızının stator durağan yapısına göre döner alan hızı veya rotor döner alan hızı ya da rotor mekanik hızının seçilebildiği rastgele eksen sistemine göre çok fazlı sistemden 2-fazlı sisteme, aynı eksen hızında geçilmesi “faz-transformasyonu” ya da “Clark dönüşümü” olarak bilinmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Clark dönüşümü

Bu eksen dönüşümünde, eksenler arasındaki faz kayması ya da eksen konumları sıfıra oturtulursa,  $\theta=0$  ve çok fazlı sistemler için özel bir durum olarak üç faz ekseninde fazlar arasındaki açı,  $\alpha = \frac{2\pi}{3}$  olarak yazılır.

$f_{\alpha\beta 0} = T(\theta)f_{abc}$  ve  $T(\theta)$  matrisi olmak üzere;

$$T(\theta)_{\alpha\beta 0} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

biçiminde dönüşüm matrisi olarak ifade edilir. Aynı zamanda, 2-fazlı eksen sisteminden 3-fazlı eksen sistemine geçiş için bu matrisin tersi kullanılmaktadır. Genel ifade biçimi Denklem (3.7)'de verilmiştir.

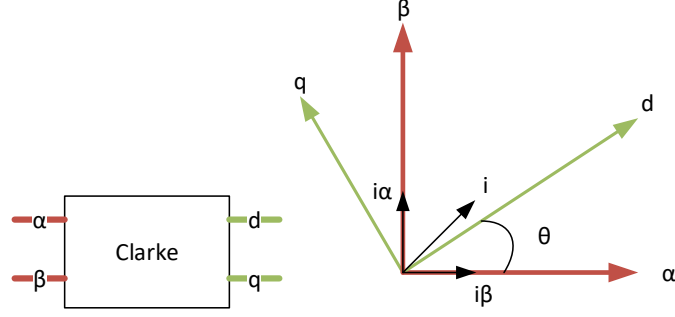
$$f_{abc} = T(\theta)^{-1}f_{\alpha\beta 0} \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Park (dq) dönüşümü

Elektrikli motorlarda, dinamik modelde yer alan denklem sayısını azaltmak için kullanılan faz transformasyonu, aynı hızda dönen yani birbirine göre duran eksen dönüşümüdür (Şekil 3.3). Stator için ayrı, rotor için ayrı yapılan bu eksen dönüşümü, rotor ve stator arasında hız farkı olabilmesine rağmen dönüşümü yapılan eksenler arasında hız farkı yoktur, dönüşümün doğası ve amacı bunu gerektirir. Ancak, dinamik denklemler oluşturulurken stator ve rotor eksen hızlarının farklı oluşu (bir bakıma stator ve rotor akısının uzay vektörlerinin farklı hızlarda dönmesi) nedeniyle her iki sistem arasındaki kuplaj matrisi de bu akı vektörlerinin konumuna göre değişmektedir. Dinamik modelin çözülmesinde sistemi doğrusal olmaktan uzaklaştıran bu değişkenliğin yanı sıra akıma bağlı doyum faktörü de sistemi doğrusal olmaktan uzaklaştıran diğer faktörlerdendir. Zira hız-moment kontrolü yapılacak bir motor için dinamik modelde durum değişkeni olarak rotor konumu da yer almaktadır ki bu da diğer durum değişkenleri olan akı ve akımlara çarpan olarak yerini almaktadır. Bu anlamda, sistemin referans alınan bir hıza göre durağanlaştırılması bir bakıma sistemin “doğrusal bir model” olarak ele alınmasını sağlar. Bu dönüşümün temel ifadesi;

$$f_{dq0} = T(\theta)_{dq0}f_{abc} \quad (3.8)$$

biçiminde olup, dönüşüm matrisi Denklem (3.8)'e göre Denklem (3.9)'da verilmiştir.



Şekil 3.3: Park dönüşümü

$$T(\theta)_{dq0} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

### 3.3 Motorun d-q Eşdeğer Devresi

3-fazlı motor devresinin 2-eksenli sistemde gösterimi için gerekli işlemler eksen dönüşümlerinde açıklanmıştır. Motor için oluşturulan 3-faz eşdeğer devresine dönüşüm işlemleri uygulanarak motorun 2-eksen sistemindeki model denklemleri elde edilmiştir. Durum değişkenleri olarak bu modelde akımlar ve rotor konum değişimi kabul edilmektedir. Ancak, model denklemleri akılara ve rotor konum değişimine bağlı olarak da yazılabilir. Çıkış uzayı olarak elektromekanik moment ve rotor hızı seçilmektedir. Özel olarak servo tip motor çalışmalarında, rotor konumu çıkış uzayına eklenir. d-q eksenleri arasındaki endüktans tanımları;

$$L_{ds} = L_{md} + L_{ls} \quad (3.10)$$

$$L_{qs} = L_{mq} + L_{ls} \quad (3.11)$$

$$L_{dr} = L_{md} + L_{lr} \quad (3.12)$$

$$L_{qr} = L_{mq} + L_{lr} \quad (3.13)$$

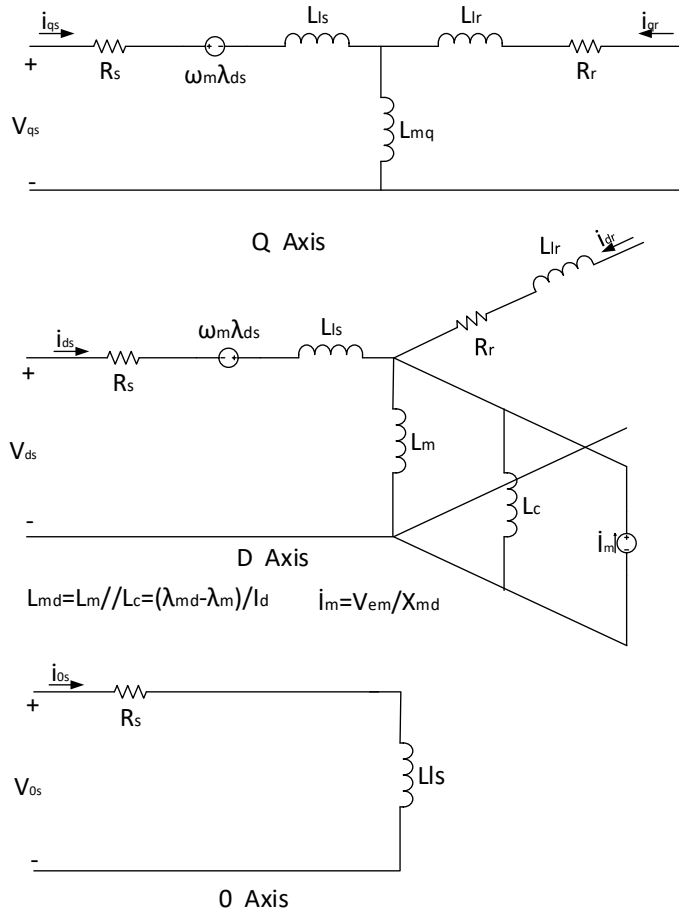
olmak üzere, sistemin gerilim bağıntıları aşağıda verildiği gibidir.

$$V_{ds} = \left( R_s + \frac{d}{dt} L_{ds} \right) i_{ds} - \omega_r L_{qs} i_{qs} + \frac{d}{dt} L_{md} i_{dr} - \omega_r L_{mq} i_{qr} + \frac{d}{dt} L_{mq} i_m \quad (3.14)$$

$$V_{qs} = \left( R_s + \frac{d}{dt} L_{qs} \right) i_{qs} + \omega_r L_{ds} i_{ds} + \frac{d}{dt} L_{mq} i_{qr} + \omega_r L_{md} i_{dr} + \omega_r L_{mq} i_m \quad (3.15)$$

$$0 = \frac{d}{dt} L_{md} i_{ds} + \left( R_{dr} + \frac{d}{dt} L_{dr} \right) i_{dr} + \frac{d}{dt} L_{md} i_m \quad (3.16)$$

$$0 = \frac{d}{dt} L_{mq} i_{qs} + \left( R_{qr} + \frac{d}{dt} L_{qr} \right) i_{qr} \quad (3.17)$$



**Şekil 3.4:** Motor d-q eşdeğer devresi

Bu haliyle elde edilen dinamik modelin sadeleştirilmesi bazı varsayımlara dayalı olarak ya da uzay akı vektörlerinin belli bir eksene konumlandırılması yaklaşımına dayalı olarak çıkış uzayında elektromekanik moment Denklem (3.18)'de verildiği şekliyle elde edilir. Yine aynı şekilde rotor ivmesi, elektromekanik dinamik

hareket denkleminde hareketle, Denklem (3.19)'daki gibi elde edilir. Şekil 3.4'te DRKSM'ye ait d-q eşdeğer devresi de verilmiştir.

$$T_e = \frac{3p}{2} [L_{md}i_{dr}i_{qs} - L_{mq}i_{qr}i_{ds} + \lambda_m i_{qs} + (L_{md} - L_{mq})i_{ds}i_{qs}] \quad (3.18)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{p}{2J} (T_e - T_L) \quad (3.19)$$

### 3.4 Çıkış Momenti

Doğrudan yol vermeli tip motorlarda iki farklı moment oluşmaktadır. Başlangıç ve yük değişimlerinde meydana gelen indüksiyon momentini ve mıknatıs frenleme momentidir. Ancak, motor senkron hıza oturduğunda indüksiyon momentini sıfırlanır ve sadece senkron moment üretilir. Yol verme ve senkron dışı hızlarda indüksiyon gerilimi;

$$V_{em} = w_r \lambda_m \quad (3.20)$$

olmak üzere, indüksiyon momentini;

$$T_e = \frac{3p}{2} [(X_{dr} - X_{qr})i_{dr}i_{qs} + X_{md}i_{qr}i_{ds} - X_{mq}i_{qs}i_{dr} + V_{em}V_{iqr}] \quad (3.21)$$

Diğer taraftan, mıknatıs akısının frenleme momentini;

$$T_m = \frac{3p}{2} [X_{md}i_m i_{md} + (X_{ds} - X_{qs})i_{ds}i_{qs}] \quad (3.22)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Bu haliyle toplam moment;

$$T_r = T_e + T_m \quad (3.23)$$

olarak hesaplanır. Senkron motor biriminde üretilen moment ise;

$$T_{syn} = \frac{p}{2} \frac{3}{\omega} (V_{em} i_{qs} + i_{qs} i_{ds} (X_{ds} - X_{qs})) \quad (3.24)$$

biçiminde olup yük açısı,  $\delta$ , (EMF ile besleme gerilimi arasındaki açı) olmak üzere;

$$T_{syn} = \frac{p}{2} \frac{3}{\omega} \left( \frac{V_{em} V_{ph}}{X_{ds}} \sin(\delta) + \frac{V_{ph}^2}{2} \left( \frac{1}{X_{qs}} - \frac{1}{X_{ds}} \right) \sin(2\delta) \right) \quad (3.25)$$

$$T_{syn} = T_1 \sin(\delta) + T_2 \sin(2\delta) \quad (3.26)$$

biçiminde ifade edilmektedir.

### 3.5 Sürekli Durum Analizi

Motorun kararlı halinde (sürekli durumda), motor senkron hızda döndüğünden sincap kafes kısa devre çubuklarında gerilim indüklenmemektedir. Yani, kararlı durumda, motorun asenkron tarafı artık yoktur. Dolayısıyla,  $\omega_{sync} = \omega_r$  olup motor denklemleri sabit mıknatıslı senkron motor gibi yazılabilir.

$I_{ds} = I \sin \delta$  ve  $I_{qs} = I \cos \delta$  olup burada  $\delta$  yük açısıdır. Bu durumda motor dinamik modeli ve üretilen güç ifadesi:

$$V = V_{em} + RI + j(\omega_r L_{ds} I_{ds} + \omega_r L_{qs} I_{qs}) \quad (3.27)$$

$$V \sin \theta = I_{ds} R + I_{qs} \omega_r L_{qs} \quad (3.28)$$

$$V \cos \theta = V_{em} - I_{ds} \omega_r L_{ds} + I_{qs} \omega_r L_{qs} \quad (3.29)$$

$$I_{ds} = \frac{V(\omega_r L_{ds} \cos \theta - R \sin \theta) - V_{em} \omega_r L_{qs}}{\omega_r L_{ds} \omega_r L_{qs} + R^2} \quad (3.30)$$

$$I_{qs} = \frac{-V(R \cos \theta + \omega_r L_{ds} \sin \theta) + V_{em} R}{\omega_r L_{ds} \omega_r L_{qs} + R^2} \quad (3.31)$$

$$I^2 = I_{ds}^2 + I_{qs}^2 \quad (3.32)$$

$$I = \frac{P_{em}}{U\sqrt{3}} \quad (3.33)$$

$$P_{in} = 3VI \cos \theta = 3V(I_{qs} \cos \theta - I_{ds} \sin \theta) \quad (3.34)$$

$$P_{in} = 3[V_{em}I_{qs} + RI^2 + I_{ds}I_{qs}(w_rL_{ds} - w_rL_{qs})] \quad (3.35)$$

$$\Delta P_w = 3RI^2 = 3R(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \quad (3.36)$$

$$P_{em} = P_{in} - \Delta P_w = 3[V_{em}I_{qs} - I_{ds}I_{qs}(w_rL_{ds} - w_rL_{qs})] \quad (3.37)$$

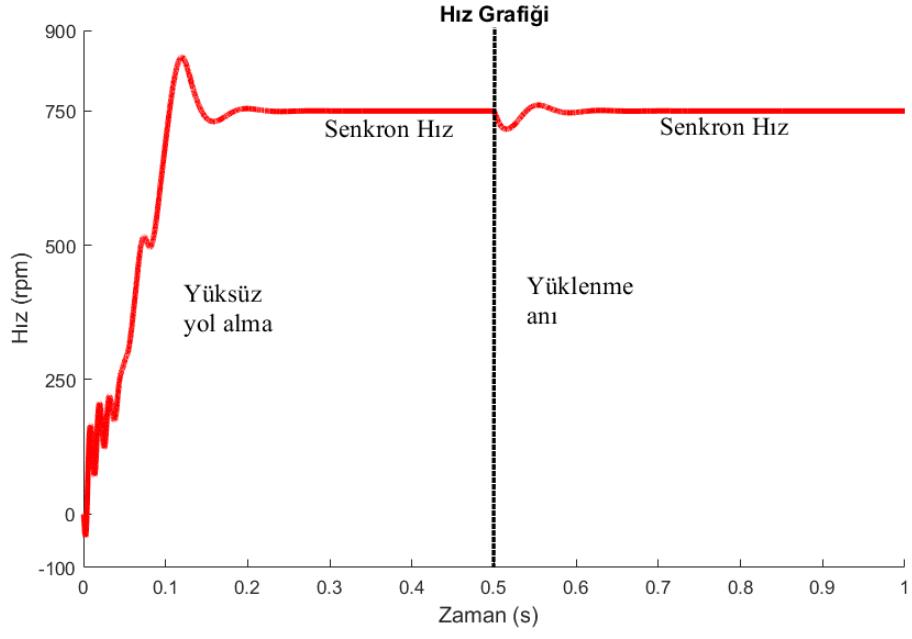
biçiminde elde edilir.

### 3.6 Analitik Modelin Sayısal Çözümü

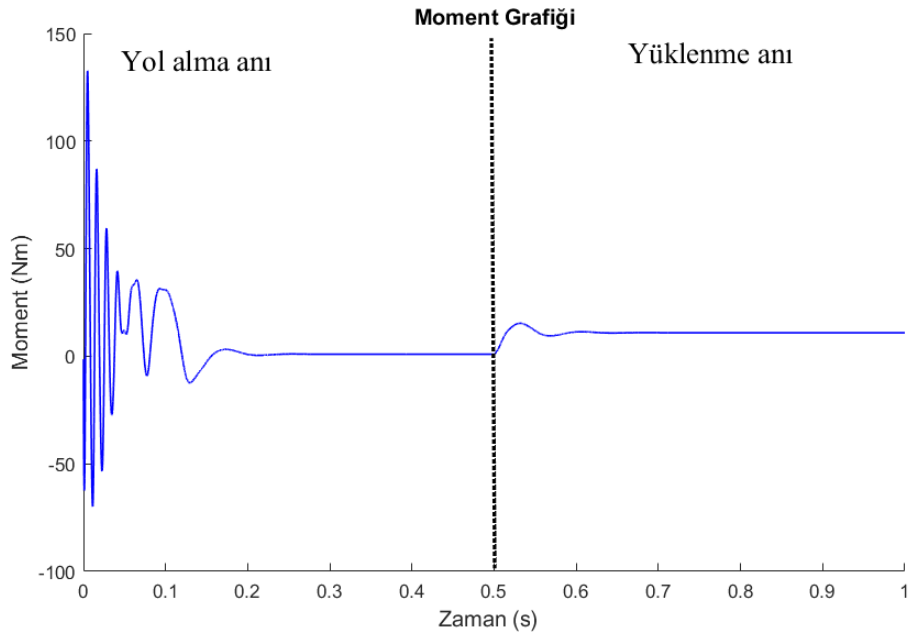
Motorun d-q Eşdeğer Devresinde bahsedilen motor denklemleri kullanılarak analitik modelin sayısal çözümü 4- adımlı Runge-Kutta metodu ile yapılmış olup Şekil 3.5'te analitik çözüm sonuçları verilmiştir. Burada, motorun geçici hal davranışı dikkate alınacağı için, 0,5'inci saniyede motora nominal yükü olan 10 Nm'lik bir yüklemeye cevap verecek tasarımı yapılan motorun 750 rpm senkron hızda tutunup tutunmadığı test edilmiştir. Öncelikle, yüksüz olarak doğrudan yol alabildiği 0,5'inci saniyede görülmektedir. Motorun hızının 120 ms'de durağan halden 850 rpm hıza ulaştığı ve 40 ms sonra ise kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. 0,5'inci saniyede uygulanan yük ile hız 720 rpm'e kadar azalmış ancak senkron hız olan 750 rpm'e tekrar kararlı şekilde ulaşmıştır. Tasarımı yapılan motor için verilen bu sonuçlarda motorun yük değişimlerine karşı asenkron desteğini kullanarak tekrar senkron hıza topladığı görülmektedir. Normalde bu performansın alınabilmesi için sıradan bir SMSM'nin kapalı çevrim denetimi gerekmektedir. En azından kopma açısının sürekli gözlenmesi gerekmektedir.

Oluşturulan matematik modelden üretilen indüksiyon momenti ve senkron moment Şekil 3.6'da ayrıştırılmış olarak gösterilmiştir. Burada, motorun yol alması anında ve yüklenme durumunda iki momentin etkisi de görülmektedir. Aynı zamanda, motor senkron hıza ulaştığında indüksiyon momentinin etkisi ortadan kalkmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, tasarımı öngörülen ve bu tez çalışmasında önerilen motor modelinin gerek yol vermede gerekse yük değişimlerinde senkron hıza ulaştığı göstermektedir.



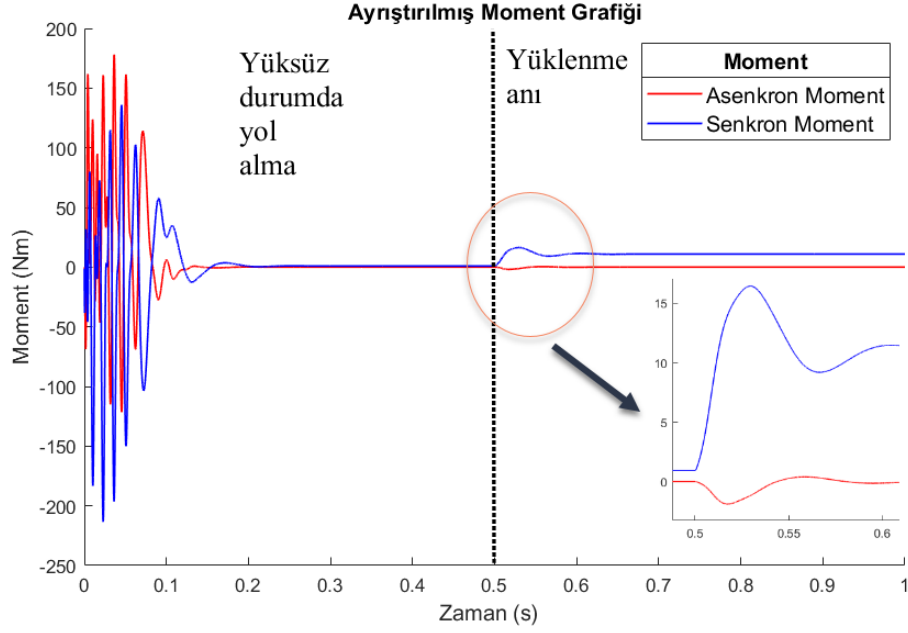


(a)



(b)

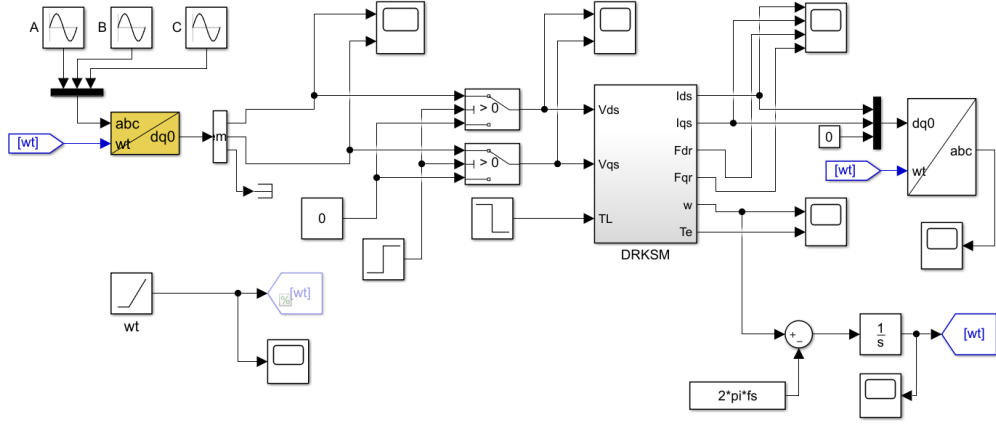
**Şekil 3.5:** Analitik modelin sayısal çözümünde hız ve moment değişimi a) Yüksüz ve yüklü hız değişimi, b) Yüksüz ve yüklü moment değişimi



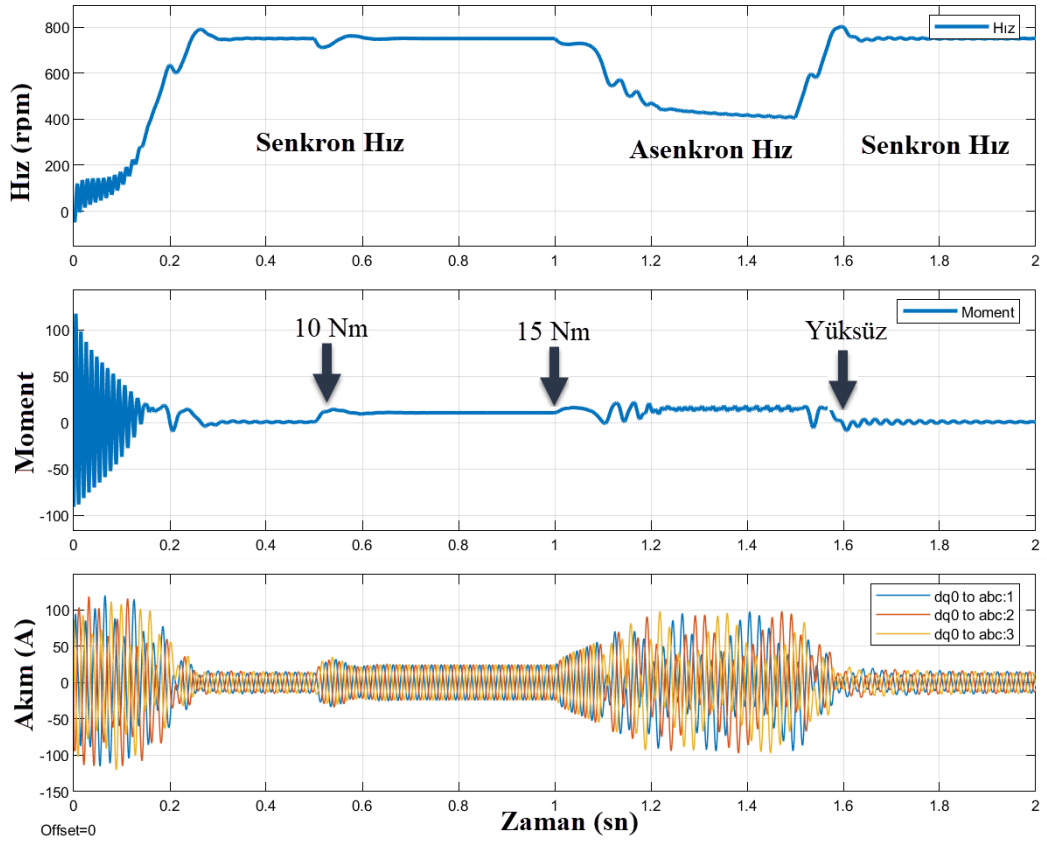
**Şekil 3.6:** Karma motor modelinin asenkron ve senkron momentlerinin ayrıştırılması

### 3.7 Modelin Matlab/Simulink Benzetimi

Dinamik modeli önceki kısımda verilen motorun, model denklemlerine bağlı olarak dinamik davranışını analiz etmek üzere bilgisayar benzetimi için Matlab/Simulink kullanılmıştır. Motorun Simulink modeli Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.8’de verilen benzetim sonuçlarının kıyaslamalı değerlendirmesi yapıldığında, analitik model çözüm sonuçları ile Simulink model sonuçlarının birbirini doğruladığı görülmektedir. Simulink benzetim sonuçlarına göre, motor yol alma aşamasında yüksek moment dalgalanmalarına sahip olup, bu geçici durum 0,15 saniye sürmektedir. Yaklaşık 800 rpm hıza 0,25 saniyede ulaşarak 0,05 saniye sonra nominal hızı olan 750 rpm’e ulaştığı görülmektedir. 10 Nm nominal yük uygulandığında 0,1 saniyede hız toparlanarak nominal değerinde devam etmektedir. Aşırı yüklenmeyi temsil eden 15 Nm yüklenme anında ise motor asenkron bölgede çalışmaya geçmektedir. Yüksüz duruma tekrar dönüldüğünde ise motorun senkron hıza dönüş yaptığı görülmektedir. Benzetim sonuçlarında akım, moment ve hız değişimi, hem yol verme aşamasında senkron hıza oturmasında hem de yükleme anında tekrar senkron hıza dönmesinde tasarımı yapılan motorun, tezin amacına yönelik hibrit çalışma ilkesine göre çalıştığı ve davrandığı görülmektedir.



Şekil 3.7: Tasarımı yapılan DRKSM için Matlab/Simulink benzetim modeli



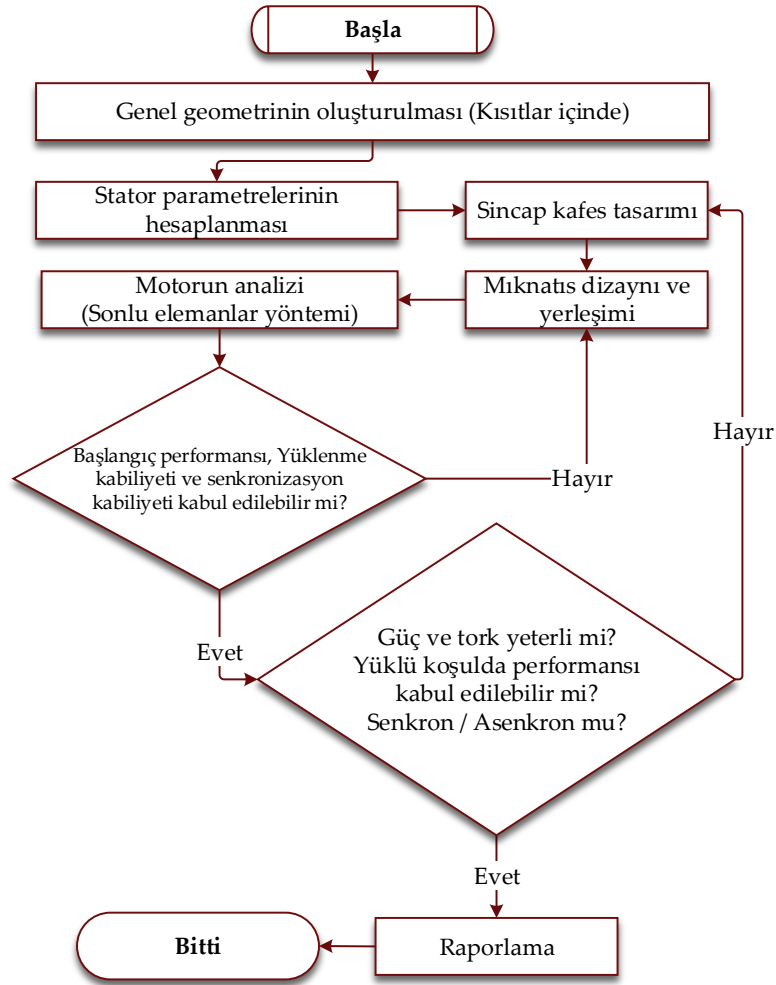
Şekil 3.8: Motorun çıkış dinamik karakteristiği benzetim sonucu

## 4. DIŞTAN ROTORLU KARMA SENKRON MOTOR TASARIMI, BENZETİMİ VE İMALATI

Bu alıŐmada, ASM ve SM karma tasarımı olan DRKSM tasarımı yapılmıştır. Literatürde, başlangıç parametrelerinin belirlenmesi için ASM'nin analitik hesaplamaları bulunmaktadır. Bu tasarıma ek olarak rotor geometrisine mıknatis yerleştirilerek DRKSM tasarımı elde edilmiştir. Motor tasarım parametreleri içinde yaygın olarak bilinen; kutup sayısı, stator ve rotor slot (oluk-oyuk) sayıları, stator sargı dağılımları, slot Őekilleri ve motor boyutları gibi parametreler yer almaktadır.

Motor tasarımında takip edilecek adımlar Şekil 4.1'de gösterilmiŐ olup, ilk olarak gerekli güç dikkate alınarak yeterli hacim hesaplanır. Motor boyutları teker geometrisi içinde sınırlı olacağından motor uzunluğu ve çapı belirlenerek genel geometrisi oluşturulur. Stator ve rotor parametreleri istenilen motor gücüne bağlı olarak hesaplanır. Motor hızı göz önüne alınarak rotor geometrisi üzerinde çeşitli mıknatis yerleŐimleri uygulanabilir. Ancak, elde edilen değerler ile yeterli motor karakteristiğine ulaŐılamayabilir.

Motor tasarım uygulamalarında, SEY kullanılarak motorun analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmek mmkndrdr. Bu yöntemle, çeşitli motor modellerinin prototipleri üretilmeden, daha hızlı bir Şekilde motorun tasarlanması ve her yönüyle analiz edilmesi sağlanmaktadır. Literatürde genellikle iç rotorlu karma tip motorlar üzerine çalışmalar yođunlaŐmıŐ olup bu çalışmalarda, öncelikle ASM'nin parametreleri belirlenmektedir (Libert, 2002). Tasarım için gerekli parametreler belirlendikten sonra, motorun rotor kısmına mıknatisler yerleştirilmiş ve motor tasarım parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mıknatis parametrelerinin belirlenmesinde analitik yöntemler veya SEY kullanılmıştır (Mari 2008). Mıknatislerin yanlıŐ konumlandırılmasından kaynaklı başlangıç ve senkronizasyon hatalarının oluŐtuđu iç rotorlu motor çalışmalarında rapor edilmiştir (Isfahani ve Vaez-Zadeh 2011). Bu tez kapsamında, iç rotorlu karma motorlar elektrikli araçlarda doğrudan tahrikli olarak kullanılmadığından, dıştan rotorlu karma motor tasarımı hedeflenmiştir. Bu motorun dış kapağı aynı zamanda elektrikli aracın teker lastiğinin geçeceği biçimde tasarlanmıştır.



Şekil 4.1: Motor tasarım aşamaları

Algoritma hedefi olarak senkron hıza ulaşabilen, aşırı yük durumunda asenkron olarak çalışmaya devam edebilecek ancak nominal yüke ulaştığında tekrar senkronizasyonu sağlayabilen motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1 Motor Tasarımı

Elektrikli araçlar için göz önüne alınan karma motorun tasarımında izlenen adımlar, sırasıyla; talep edilen motor gücünün hesaplanması, hesaplanan güce göre kısıtlar göze alınarak motor geometrisinin belirlenmesi, stator ve rotor parametrelerinin hesaplanmasıdır. Son olarak, mıknatıs-çubuk yerleşimi için SEY kullanarak uygun rotor geometrisi tespit edilir.

#### 4.1.1 Motor Gücünün Hesaplanması

Elektrikli araçların dinamiğine ait formüller Bölüm 2.1’de verilmiştir. Tablo 4.1’de Alatay elektrikli araç parametrelerine ilişkin değerler verilmiştir. Burada aracın %3 eğimli yolda 50 km/sa hıza 17 saniyede ulaşması hedeflenmiştir.

**Tablo 4.1:** Araç tasarım parametreleri

| Parametre                  | Değer | Birim             |
|----------------------------|-------|-------------------|
| <b>m</b>                   | 250   | kg                |
| <b>g</b>                   | 9,81  | m/s <sup>2</sup>  |
| <b><math>\rho</math></b>   | 1,2   | kg/m <sup>3</sup> |
| <b><math>m_{rr}</math></b> | 0,01  |                   |
| <b><math>C_d</math></b>    | 0,3   |                   |
| <b>r</b>                   | 0,278 | m                 |
| <b>v</b>                   | 50    | km/sa             |
| <b><math>t_v</math></b>    | 17    | s                 |
| <b>A</b>                   | 0,9   | m <sup>2</sup>    |
| <b><math>\alpha</math></b> | 3     | derece            |

Tablo 4.1’de yer alan araç parametrelerine ilişkin hesaplamalar yapılmış olup Tablo 4.2’de hesaplama sonuçları verilmiştir. Elektrikli araç için gerekli toplam motor gücü 2-hp olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, arka tekerleklerde yer alacak her bir motorun gücü ise 1-hp olmalıdır. Bu çalışma kapsamında nominal 1-hp güce sahip DRKSM tasarımı gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.2:** Elektrikli araca etki eden kuvvetler ve güç değerleri

| Parametre             | Değer  | Birim |
|-----------------------|--------|-------|
| <b>F<sub>rr</sub></b> | 24,5   | Nm    |
| <b>F<sub>ad</sub></b> | 31,25  | Nm    |
| <b>F<sub>hc</sub></b> | 128,2  | Nm    |
| <b>F<sub>la</sub></b> | 204,2  | Nm    |
| <b>F<sub>te</sub></b> | 388,3  | Nm    |
| <b>M<sub>te</sub></b> | 107,95 | Nm    |
| <b>P<sub>te</sub></b> | 1499,3 | W     |
| <b>P<sub>te</sub></b> | 2,0098 | hp    |

### 4.1.2 Motor Geometrisinin Tespiti

Önerilen motorun tasarım aşaması ilk olarak ASM'nin yapısının oluşturulması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, elektrikli araçlar için tasarlanacak olan ASM'nin geniş kesitli rotor slotlarının olması, ince iletkenlerle paralel stator sargılarının oluşturulması ve slot sayılarının çok olması gerektiği görülmüştür (Tiecheng 2005). Daha önce yapılan çalışmalarda, karma model içermeyen dış rotorlu ASM tasarımında maksimum 0,53kW/kg güç yoğunluğuna ve %82,2 verimliliğe ulaşılmıştır (Cha 2012). Farklı hızlar için tasarlanan aynı güçteki asenkron motorların nominal hızları azaldıkça artan kutup sayısı nedeniyle kütle ve çaplarının arttığı anlaşılmıştır (Larminie ve Lowry 2012).

Tasarım aşamasında, ASM'nin parametreleri hesaplandıktan sonra motorun rotoruna uygun olarak yerleştirilecek mıknatıs boyut ve konumları hesaplanmıştır.

Bu tasarım için parametre tanımları;

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| $E_{ph}$      | : Tek fazda indüklenen EMK |
| $I_{ph}$      | : Faz akımı                |
| $T_{ph}$      | : Faz sarım sayısı         |
| $\eta$        | : Verimlilik               |
| KW            | : Motor aktif gücü         |
| KVA           | : Motor görünür gücü       |
| $\cos \theta$ | : Tam yük güç faktörü      |

olmak üzere kullanılmış olup motorun aktif gücü (4.1) ve görünür güç ifadeleri (4.2) ve (4.3) ile verilmiştir.

$$KW = KVA \cdot \eta \cdot \cos \theta \quad (4.1)$$

$$KVA = 3 \cdot E_{ph} \cdot I_{ph} \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

$$KVA = 3.4,44 \cdot K_w \cdot f \cdot \phi \cdot T_{ph} \cdot I_{ph} \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

### 4.1.3 Motor Boyutunun Belirlenmesi

Literatürde motor çapı ve uzunluğu arasındaki ilişkinin verimlilik ve güç faktörü gibi parametrelerde etkisi olduğu bilinmektedir. Ancak elektrikli araca dıştan rotorlu tasarlanacak motorda teker çapı ve eksenel uzunluk kısıtları göz önüne alınması

gerekmektedir. Bu çalışmada ise, şehir içi kullanıma yönelik tasarlanmış ve TUBİTAK Efficiency Challenge etkinliklerinde birincilik derecesi alan Alatay-EV elektrikli aracın tekerlek çapına uygun olarak motor çapı 300 mm ve stator eksenel uzunluğu 40 mm olarak belirlenmiştir.

Genel olarak,  $B_{av}$ 'nin başlangıç değeri 0,35-0,6 Tesla aralığında seçilir (Hamid A. Toliyat, 2004). Daha yüksek bir  $B_{av}$  değeri seçmek, motorun boyutunu küçültmek, maliyeti düşürmek ve aşırı yük kapasitesini artırmak gibi bazı avantajlar sağlar. Kutup başına hava boşluğunda  $\phi$  akı, motor geometrisine ve  $B_{av}$ 'ye bağlı olup aralarındaki ilişki Denklem (4.4)'de verilmiştir.

Motor kütesini azaltılırsa yüksek akım kapasitesi daha fazla bakır kaybına ve sıcaklığın artmasına neden olur. İletken başına akım taşıma kapasitesinin motor çapı, faz sarım sayısı ve faz akımı ile ilişkisi Denklem (4.5)'te verilmiştir. Bunun için uygun değerler literatürde 50000 – 450000 A/m arasında olduğu sunulmuştur (Singh, 2016). Modelin genel parametrelerinin belirlenmesi için ilgili hesaplama adımları Denklem(4.6)-(4.8)'da sırasıyla verilmiştir.

Bu tasarımda;

$$B_{av} = \frac{P\phi}{\pi DL} \quad (4.4)$$

$$ac = \frac{6 \cdot I_{ph} \cdot T_{ph}}{\pi D} \quad (4.5)$$

$$C_0 = 1,11 \cdot \pi^2 \cdot K_w \cdot B_{av} \cdot ac \cdot 10^{-3} \quad (4.6)$$

$$f = \frac{PN_s}{120} = \frac{Pn_s}{2} \quad (4.7)$$

$$D^2L = \frac{KVA}{C_0 n_s} \quad (4.8)$$

- $\phi$  : Her bir kutup için hava aralığındaki akı
- $P$  : Kutup sayısı
- $K_w$  : Sargı faktörü
- $B_{av}$  : Hava aralığındaki ortalama hava yoğunluğu
- $ac$  : İletkenin metre başına akım taşıma kapasitesi
- $D$  : Motor çapı
- $L$  : Motor uzunluğu
- $n_s$  : Senkron hız (rps)



#### 4.1.4 Stator Parametrelerinin Belirlenmesi

Geleneksel motorlarda stator, çekirdek ve slotlarda yer alan sargılardan oluşmaktadır. Açık ve yarı açık slot yapısının güç faktörü ve imalat üzerinde etkisi bulunmaktadır. Yarı açık olarak tasarlanan slot geometrisinde sargıların yerleştirilmesi daha zordur. Ancak, bu durum motor karakteristiği açısından daha iyidir.

Motorun nominal yük altında çalışma koşullarına göre iletken kesiti hesaplanmaktadır. Bu amaçla,

$$I_{ph} = \frac{KVA \cdot 1000}{3 \cdot E_{ph}} \quad (4.9)$$

$$a_s = \frac{I_{ph}}{\delta_s} \quad (4.10)$$

$$S_s = 2MgP \quad (4.11)$$

$$Y_{ss} = \frac{\pi D}{S_s} \quad (4.12)$$

- $g$  : Her bir fazın tek kutbundaki slot sayısı  
 $a_s$  : İletken kesiti  
 $M$  : Faz sayısı  
 $\delta_s$  : İletken akım yoğunluğu (bakır için 3-5 A/mm<sup>2</sup> arasında)  
 $S_s$  : Stator slot sayısı

$$Z_{ss} = \frac{6 \cdot T_s}{S_s} \quad (4.13)$$

$$L_g = 0,2 + 2\sqrt{(DL)} \quad (4.14)$$

- $Z_{ss}$  : Toplam stator iletken sayısı  
 $L_g$  : Hava aralığı (mm)

biçiminde olup burada, slot aralığının 15 mm ile 22 mm arasında olması mevcut araca uyumluluk bakımından önemli bir kısıttır.

#### 4.1.5 Rotor Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, rotor tasarımına ilişkin ilk olarak doğrudan yol alma için gerekli sincap kafes parametreleri ASM'ye benzer şekilde hesaplanmıştır.

$Y_s$ : Rotor slot aralığı,  $g_2$ : Rotordaki kutup başına slot sayısı ve  $S_r$ : rotor slot sayısı olmak üzere;

$$Y_s = \frac{\pi D}{S_r} \quad (4.15)$$

$$g_2 = \frac{S_r}{2P} \quad (4.16)$$

Rotordaki MMK'nın statora göre yaklaşık 0,85 olduğu kabulüyle;

$$\text{Rotor MMK} = 0,85 \cdot \text{Stator MMK} \quad (4.17)$$

$$I_b \cdot \frac{S_r}{2} = 0,85 \cdot (3 \cdot I_s \cdot T_s) \quad (4.18)$$

$I_b$ : Rotor çubuk akımı,  $\delta_b$ : Rotor çubuklarındaki akım yoğunluğu (4 – 7 A/mm<sup>2</sup> arasında) olmak üzere;

$$A_b = \frac{I_b}{\delta_b} \quad (4.19)$$

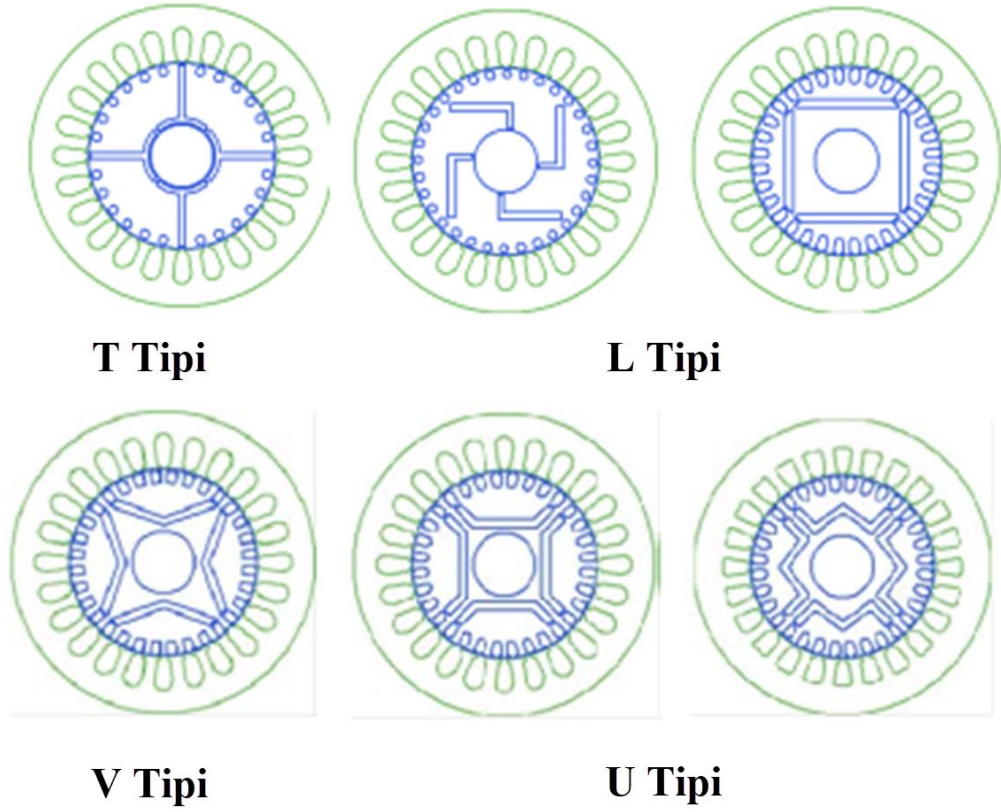
$$I_e = \frac{S_r I_b}{\pi P} \quad (4.20)$$

$I_e$ : Rotor kısa devre bileziğindeki akım,  $\delta_e$ : Rotor kısa devre bileziğindeki akım yoğunluğu (5 – 8 A/mm<sup>2</sup> arasında) olmak üzere;

$$A_e = \frac{I_e}{\delta_e} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (4.21)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

ASM rotor tasarım parametreleri belirlendikten sonra motor kutup sayısı göre mıknatısların yerleştirilmesi gereklidir. Mıknatıs yerleşimi rotordaki slot sayısının belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Literatürde kullanılan yaygın mıknatıs yerleşimi içten rotorlu yapılar için Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



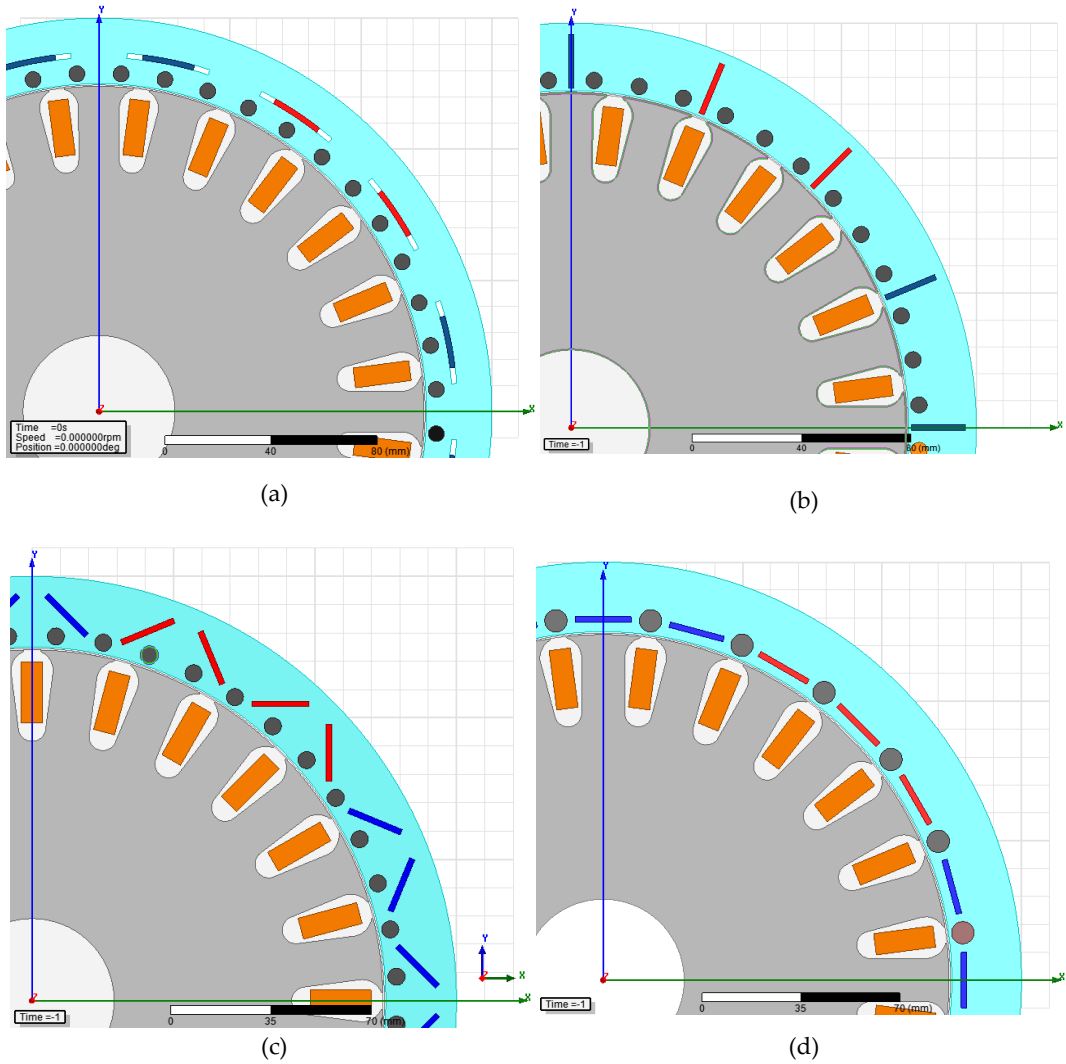
Şekil 4.2: Rotor üzerinde mıknatıs yerleşimi

#### 4.2 Farklı Rotor Geometrilerinin İki Boyutlu Modelleri

Bu çalışmada, SMSM ve ASM'nin yapılarının birleştirilmesiyle oluşturulan DRKSM tasarımı için dört farklı yerleşik model belirlenmiş olup, bu tasarımlar ANSYS Maxwell paket yazılımıyla gerçekleştirilmiştir ve analiz edilmiştir. 4-çift kutuplu olarak tasarlanan motorun farklı rotor mıknatısları ve kafes yerleşim biçimleri A, B, C ve D tipi olarak Şekil 4.3'te gösterilmiştir. A tipi rotor tipinde rotor çubukları hava aralığı ile mıknatıslar arasına yerleştirilmiştir. Benzer çubuk geometrisi kullanılarak 4 çift kutup oluşacak şekilde üç çubuk bir mıknatıs yerleşimi ile B tipi rotor oluşturulmuştur. Rotor geometrisinde karşılıklı iki mıknatıs ile oluşturulan V tipi mıknatıs yerleşimi ile C tipi rotor tasarlanmıştır. Son olarak rotor çubukları arasında mıknatıs yerleştirilerek D tipi rotor modeli oluşturulmuştur. Tüm rotor tipleri için yapılan analizlerin tümü aynı motor ve yük parametresi ile gerçekleştirilmiş ve bu parametreler Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Tasarlanan DRKSM parametreleri

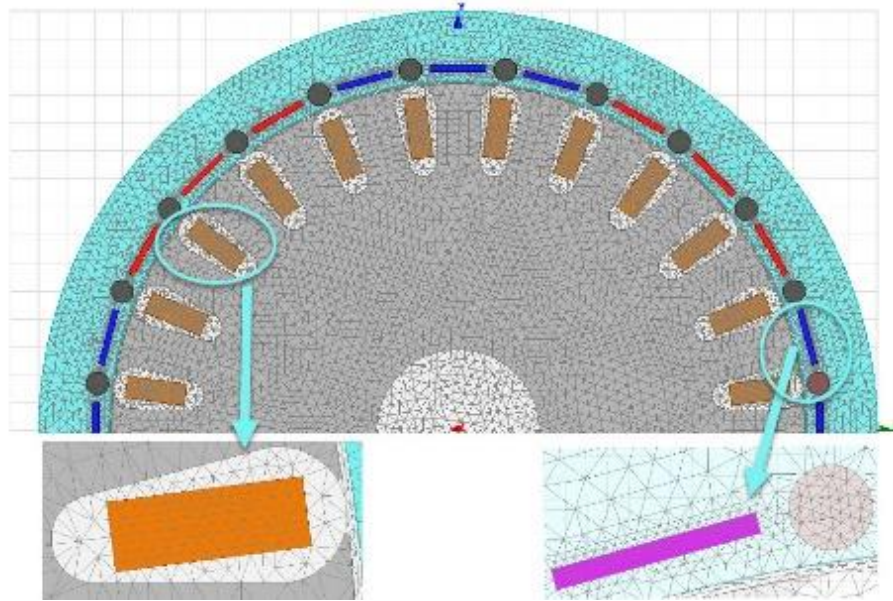
| Parametre                   | Değer           |
|-----------------------------|-----------------|
| Senkron hızdaki nominal güç | 1,0 HP, 750 rpm |
| Asenkron güç                | 1,2 HP, 500 rpm |
| Nominal hız                 | 750 rpm         |
| Çift kutup sayısı           | 4               |
| Sınıfı                      | S1              |
| Nominal moment              | 10 Nm, 750 rpm  |
| Aşırı yükteki asenkron hız  | 400 rpm         |



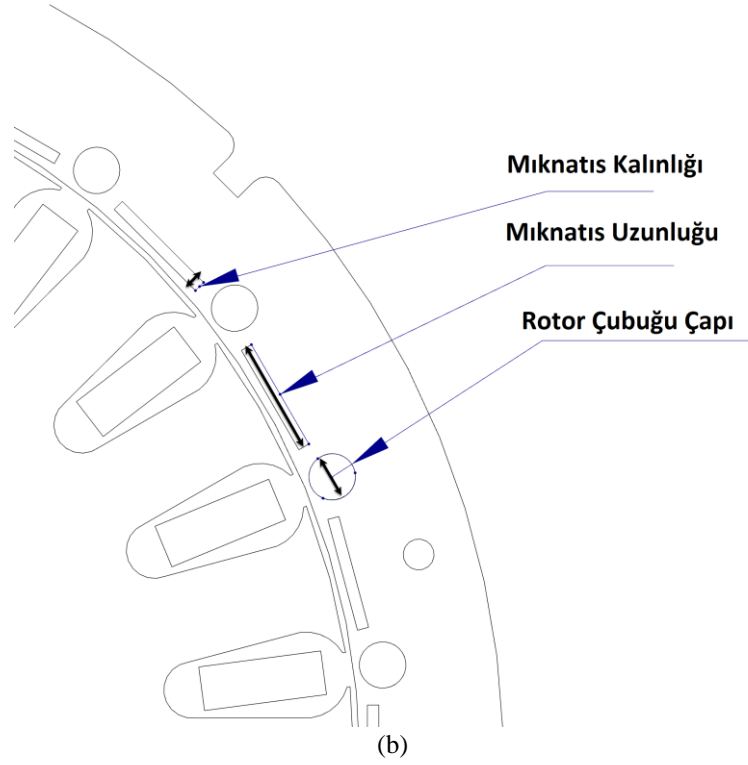
**Şekil 4.3:** Rotor mıknatısları ve kafes yerleşimine göre dört farklı motor tasarım modeli a) A tipi motor geometrisi, b) B tipi motor geometrisi, c) C tipi motor geometrisi, d) D tipi rotor geometrisi

#### 4.2.1 SEY Analiz Sonuçları

Önerilen motor modellerinin dinamik davranışının tespiti ve aralarındaki farklılıkları ortaya koyabilmek için birçok analiz gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, her model için standart mıknatıs boyutları kullanılarak oluşturulan rotor geometrisinin senkronizasyon kabiliyeti ve başlangıç performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada amaç, modelin dönüş hızının senkron hıza ulaşip ulaşmadığını tespit etmektir. Ayrıca senkronizasyon süresinin motorun verimi üzerinde etkisi olacağından bu süre dikkate alınmıştır. Çünkü kısa sürede senkronizasyon ile asenkron bölgede meydana gelen rotor bakır kayıpları da azalmış olur. İkinci olarak, gürültüye neden olan moment harmoniği ve mekanik gerilmeye neden olan moment dalgalanmaları incelenmiştir. Son olarak, karma model için önemli tasarım kriterleri, DRKSM'nin yüksek yük açısında kopmadan senkron hızda veya aşırı yük altında asenkron hızda çalışmaya devam etmesidir. Bu analizleri gerçekleştirmek üzere 2-boyutlu (2D) modeller oluşturularak SEY analizi kullanılmıştır. Örnek olarak; D tipi motorun 2D mesh modeli toplam 33526 elemandan oluşur. 9841 elementi rotorda bulunurken statorda 7789 element vardır. Her çubuk ve mıknatıs, sırasıyla 90 ve 100 elementten oluşur. Elemanların geri kalanı tanımlanan sargılar, bant, iç-dış bölge ve shaft bölgesinde bulunur. Şekil 4.4, Tip-D motorun ortaya çıkan ağ modelini göstermektedir.



(a)



**Şekil 4.4:** DRKSM tasarımı a) Motor mesh modeli, b) Rotor mıknatıs yerleşimi

#### 4.2.2 Parametrik Analiz

Tasarımı yapılan motorları karşılaştırmak üzere iki çalışma koşulu altında parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir motor modelinde 12 farklı mıknatıs boyutu kullanılarak mıknatısın modeller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tablo 4.4'te analizde kullanılan mıknatıs boyutlarına yer verilmiştir. İlk olarak doğrudan kalkış performansı yüksüz durumda incelenmiş olup her model için en iyi senkronizasyon kabiliyetine sahip mıknatıs boyutları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise yük altında yol alma ve ani yükleme sonucunda meydana senkronizasyon hataları ve moment etkisi incelenmiştir. Son olarak, prototip için en uygun motor tipi seçilmiştir.

**Tablo 4.4:** Parametrik analizde kullanılan mıknatıs boyutları

| Mıknatıs Genişlikleri | Mıknatıs Uzunlukları |
|-----------------------|----------------------|
| 2 mm                  | 8 mm                 |
| 4 mm                  | 12 mm                |
| 6 mm                  | 16 mm                |
|                       | 20 mm                |

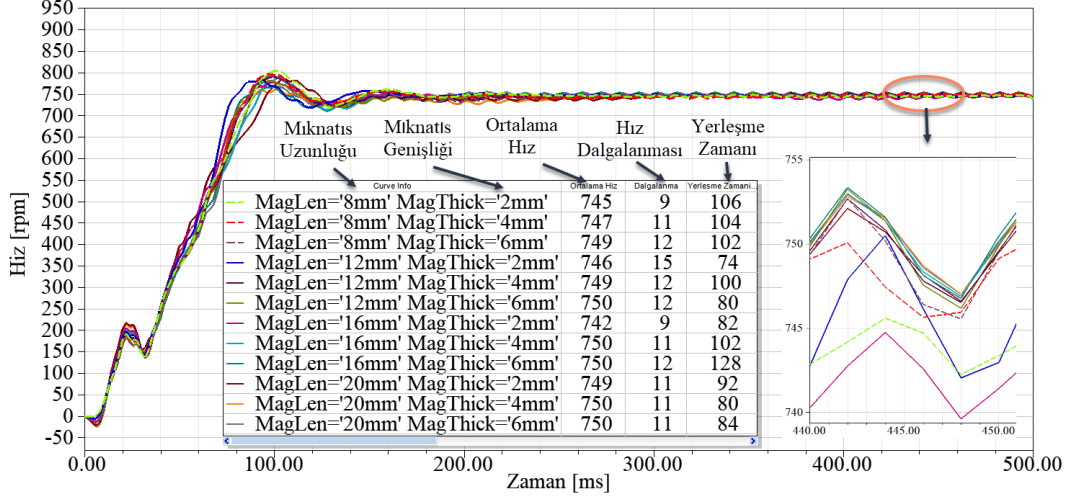
#### 4.2.2.1 Doğrudan Kalkış Performansı ve Senkronizasyon Kabiliyeti

Literatürde, çevresel olarak kutup yönlendirmesi yapılmış mıknatıslar ve radyal olarak yönlendirilmiş mıknatıs türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, mıknatıs düzenlemeleri, iç rotorlu doğrudan yol vermeli senkron motor için çeşitli şekillerde kullanılır. Bu çalışmada, dış rotorlu uygun tasarım için dört tip mıknatıs düzenlemesi ele alınmıştır. Her bir motor tipi için çeşitli boyutlarda mıknatıs kullanılarak 500 ms boyunca yüksüz olarak yapılan benzetim çalışmaları sonucunda mıknatıs geometrisinin senkronizasyon üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

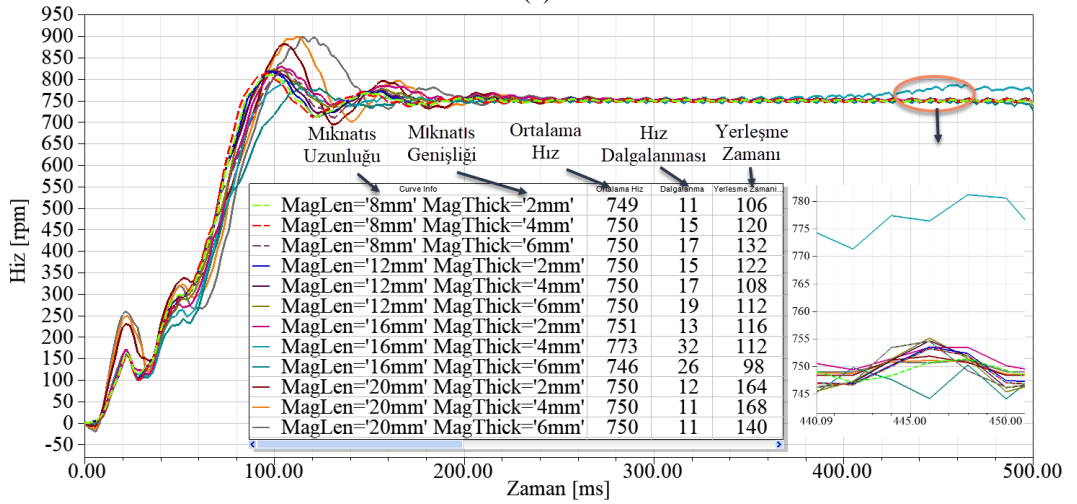
Şekil 4.5'te tüm motor tiplerinde 12 mıknatıs boyutu için yapılan parametrik çözümlerin grafikleri verilmiştir. A tipi motor, en küçük hacimli 8 mm-2 mm, 8 mm-4 mm ve 12 mm-2 mm mıknatıs boyutları hariç diğer mıknatıs boyutlarında senkron hız olan 750 rpm'e yaklaşmaktadır. Başlangıç performansı, tüm mıknatıs boyutları ele alındığında ortalama 94,5 ms olarak hesaplanmıştır. Hız kararlı halde iken yaklaşık 11 rpm salınım gerçekleşmektedir. Ek olarak mıknatıs ölçülerinin yol alma ve senkronizasyon üzerindeki etkisi görülmemiştir. Tip B motor aynı mıknatıs boyutlarında analiz edildiğinde bazı mıknatıs boyutlarında yüksek salınımlı senkronizasyon ve yüksek hız aşımı görülmüştür. Başlangıç performansının özellikle büyük mıknatıs boyutlarında mıknatısın frenleme momenti nedeniyle daha kötü olduğu tespit edilmiştir. Ortalama değerler açısından bakıldığında 16,5 rpm hızda salınım gerçekleştiği ve yerleşme zamanının 124,8 ms olduğu hesaplanmıştır. Tip C motor ise ortalama 142,8 ms sürede senkron hıza ulaşarak en kötü kalkış süresine sahiptir. Mıknatıs boyutlarının motor performansı üzerindeki etkisinin de büyük olduğu görülmektedir. Son olarak, Tip D motor tüm mıknatıs ölçülerinde kararlı halde senkron hıza ulaşmaktadır. A ve B tipine benzer düşük hız salınımına ve düşük yerleşme zamanına sahiptir. Ortalama hız salınımı 11,75 rpm, yerleşme zamanı ise 102,8 ms olarak hesaplanmıştır.

Diğer taraftan senkron hıza daha kolay ulaşan motor geometrilerinin, senkron hızdaki moment değerlerindeki dalgalanmaları dikkate alındığında tepkisel olarak hız değişimlerinden de anlaşılacağı üzere en yüksek moment salınımı B tipi motorda gerçekleşmektedir. Bununla birlikte aynı ebatlardaki mıknatısa sahip diğer motorlar daha az moment salınımı yapmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken yüksek değerli

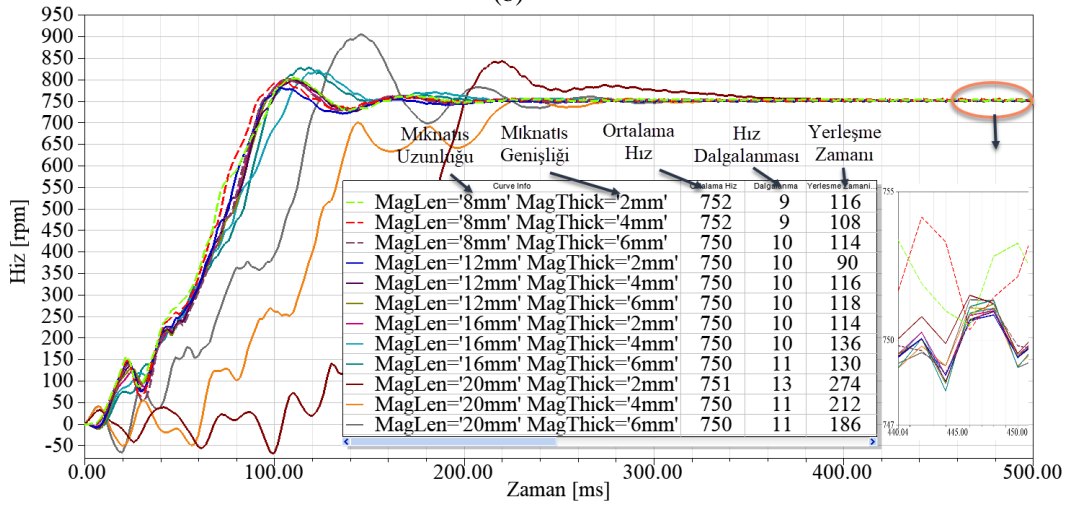
zıt yönlü momentlerin sürüş performansına olumsuz etkisidir. Yük eğrisi üzerinde yer alan pozitif moment motorun hızlanmasını sağlarken, negatif moment ise motorun yavaşlamasına ve milde kırılma veya burulma etkisine neden olmaktadır.



(a)

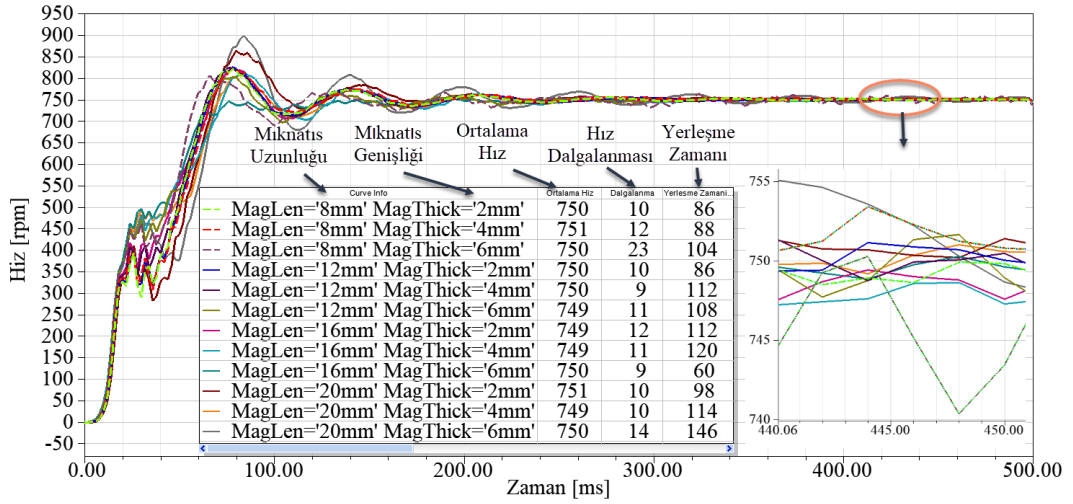


(b)



(c)





(d)

Şekil 4.5: Motorda oluşturulan çeşitli mıknatıs geometrisinin senkronizasyon etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi

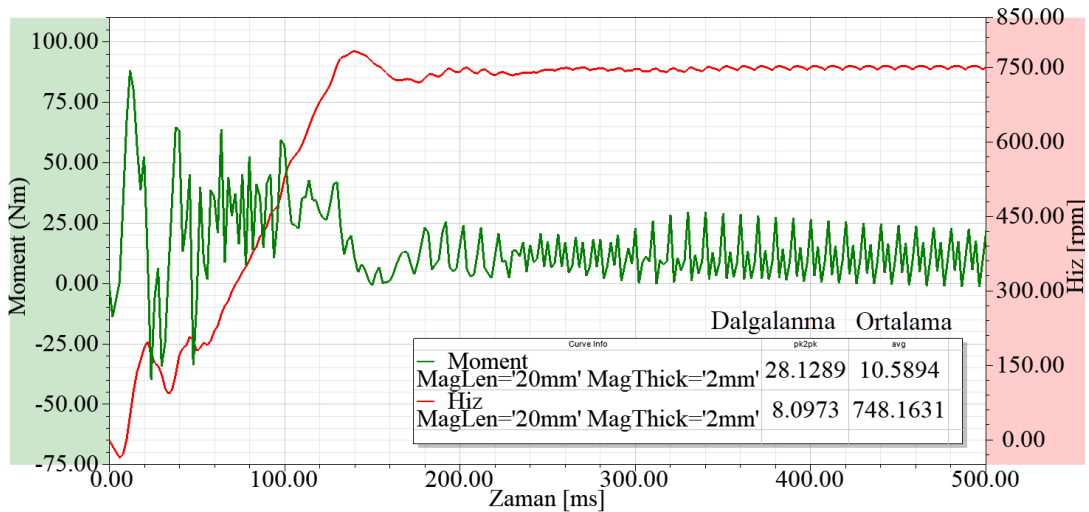
Tüm motor tiplerinin her bir mıknatıs boyutu için kararlı haldeki ortalama hızı, hızdaki salınım ve kararlı hale ulaşma süresi incelenerek performansları karşılaştırılmıştır. Genel değerlendirme yapıldığında tüm modellerin başarılı şekilde doğrudan yol aldığı görülmektedir. Tablo 4.5'te üç kriter için performans sıralaması yapılmış ve ilk on motor geometrisi yer verilmiştir. Burada en kısa sürede senkron hıza ulaşarak en düşük hız salınımına sahip motor modelinin D tipi motor olduğu görülmektedir. B tipi motor ise kararlı hale ulaşmasının geç olması ve hızdaki yüksek dalgalanma nedeniyle sıralamanın sonlarında yer almaktadır.

Tablo 4.5: Motorların yüksüz yol almaki performans sıralaması

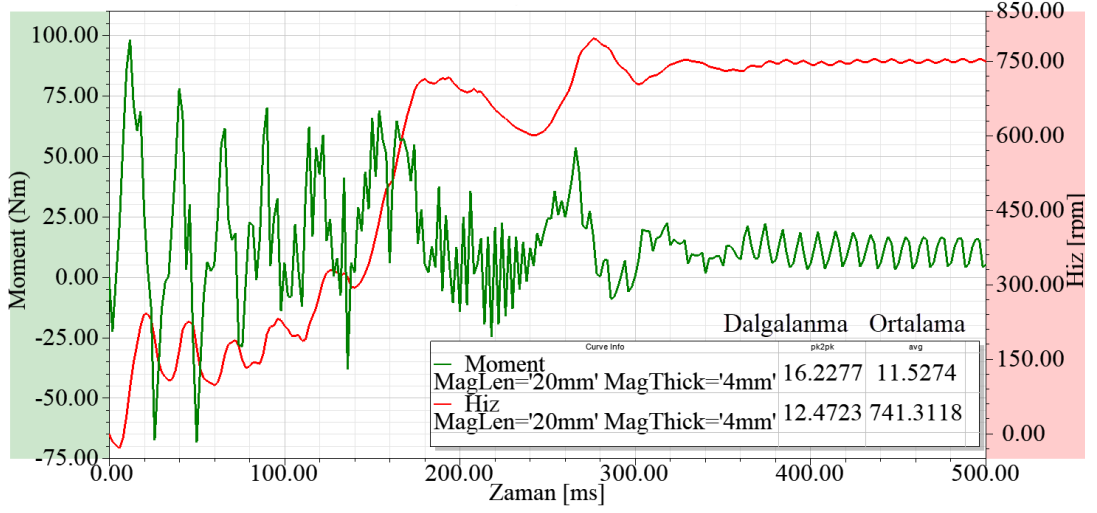
| Sıra | Motor Tipi | Mıknatıs Uzunluğu (mm) | Mıknatıs Genişliği (mm) | Ortalama Hız (rpm) | Hız Dalgalanması (rpm) | Yerleşme Zamanı (ms) |
|------|------------|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| 1    | D          | 16                     | 6                       | 750                | 9                      | 60                   |
| 2    | D          | 8                      | 2                       | 750                | 10                     | 86                   |
| 3    | D          | 12                     | 2                       | 750                | 10                     | 86                   |
| 4    | A          | 20                     | 4                       | 750                | 11                     | 80                   |
| 5    | C          | 12                     | 2                       | 750                | 10                     | 90                   |
| 6    | A          | 20                     | 6                       | 750                | 11                     | 84                   |
| 7    | D          | 20                     | 2                       | 751                | 10                     | 98                   |
| 8    | A          | 12                     | 6                       | 750                | 12                     | 80                   |
| 9    | C          | 8                      | 4                       | 752                | 9                      | 108                  |
| 10   | A          | 20                     | 2                       | 749                | 11                     | 92                   |

#### 4.2.2.2 Asenkron Çalışma Durumu ve Moment Dalgalanması

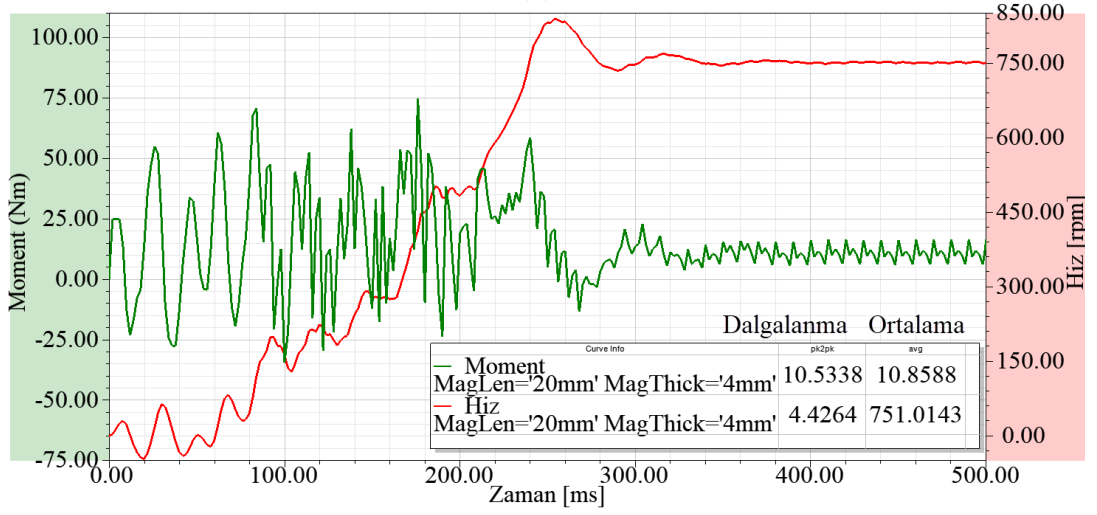
Yüksüz durumda mıknatıs boyutları göz önüne alınarak yapılan parametrik analiz sonuçlarına göre, her tip için en kısa sürede kararlı hale ulaşan ve en az hız dalgalanmasına sahip olan parametreler seçilmiştir. Daha sonra, tüm motor tipleri yük altında doğrudan yol verilerek analiz edilmiş olup her tip için en iyi performansa sahip mıknatıs boyutundaki analiz sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. A tipi motor için yapılan analizlerde tüm mıknatıs boyutlarında senkron hıza ulaşamamıştır. Ancak senkron hıza en yakın olan 748 rpm hız 20 mm-2 mm mıknatıs boyutlarında elde edilmiştir. 10 Nm ortalama yük altında 28 Nm salınım gerçekleşmiştir. B tipi motor için 20 mm uzunluğundaki mıknatıs boyutlarında sadece 4 mm mıknatıs genişliğine sahip motor geometrisi yol alarak 741 rpm hıza ulaşabilmiştir. Ayrıca yüksek frenleme momenti nedeniyle 400 ms'de yol aldığı tespit edilmiştir. C tipi motorda ise sadece 20 mm mıknatıs uzunluğunda 4 ve 6 mm mıknatıs genişliği senkron hıza ulaşabilmiştir. Ancak büyük mıknatıs boyutunun yüksek moment dalgalanmasına ve geç yerleşme süresine neden olduğu tespit edildiğinden mıknatıs genişliği 4 mm olarak seçilmiştir. Tip D motor tasarımında 20 mm - 2 mm ve 16 mm - 6 mm mıknatıs boyutu için senkronizasyon sağlanmıştır. Küçük hacimli mıknatıs geometrisinin daha düşük mıknatıs frenleme momentine sahip olması ve dolayısıyla daha hızlı yol alma performansının olması nedeniyle 20 mm uzunluğunda 2 mm genişliğindeki mıknatıs tercih edilmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarında diğer motor tiplerine göre başlangıç performansı, kararlı halde düşük moment dalgalanması ve senkronizasyona tutunma performansı birlikte incelendiğinde D tipi motor daha başarılıdır.



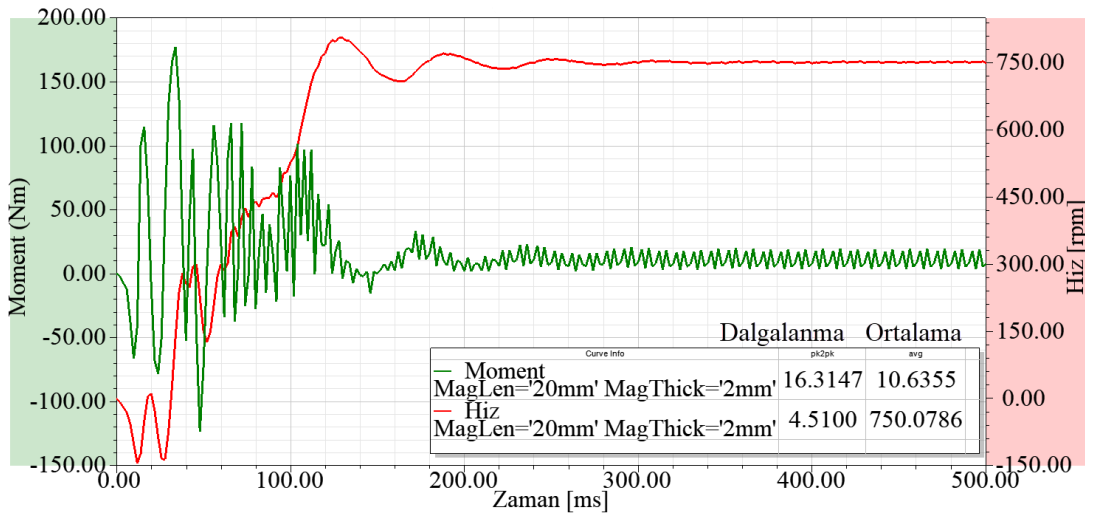
(a)



(b)



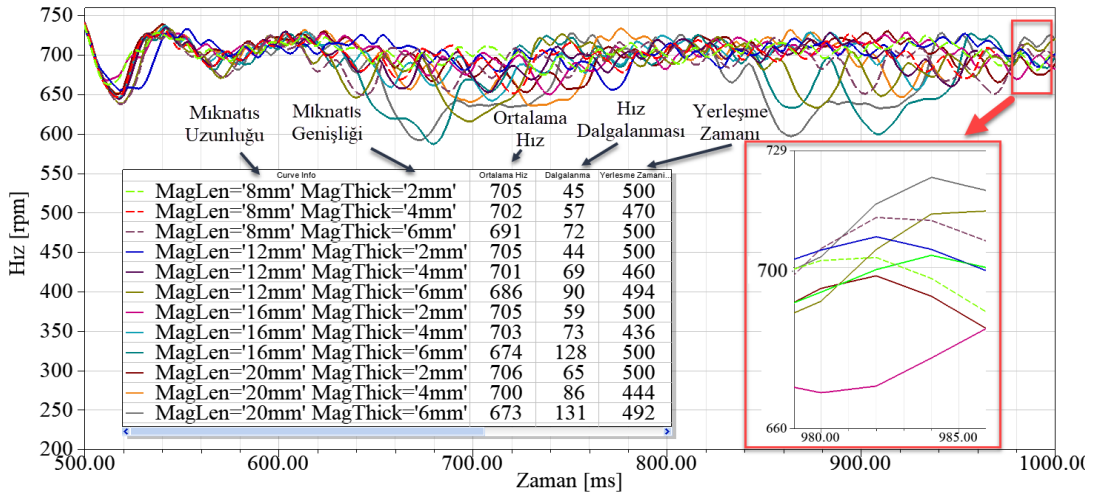
(c)



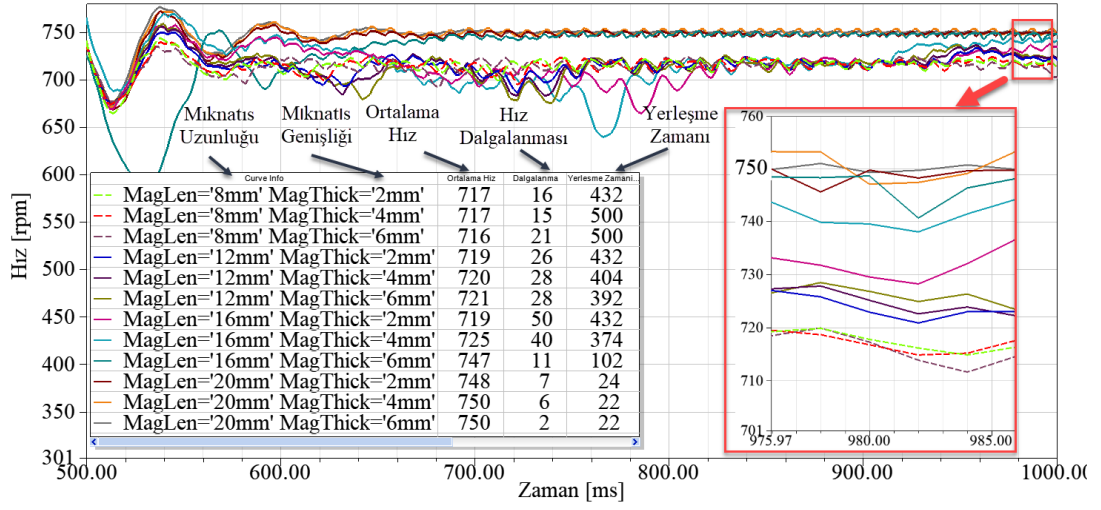
(d)

Şekil 4.6: Motor tiplerinin çeşitli mıknatıs geometrisi ile yüklü çalışmasındaki moment etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi

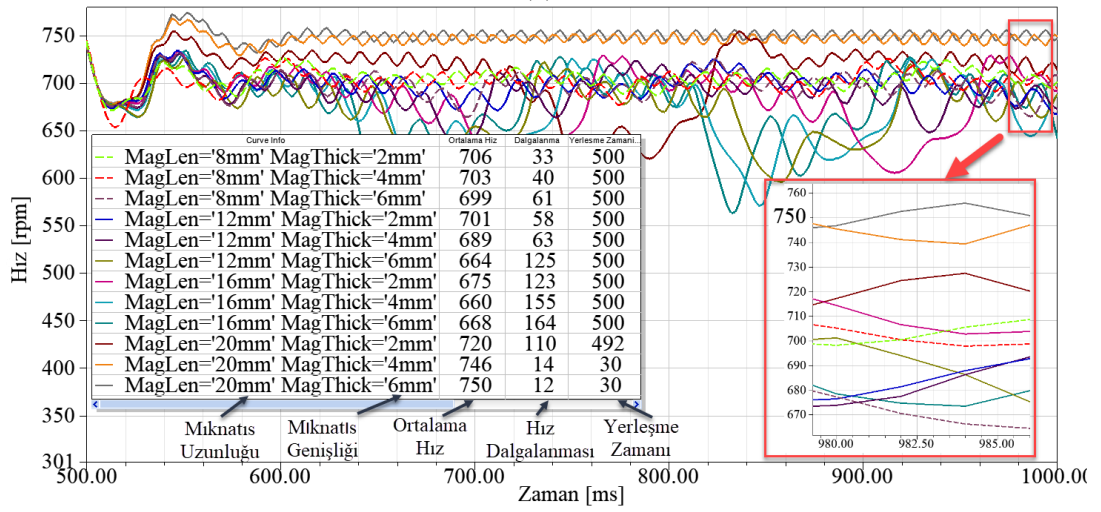
Şekil 4.7’de tüm motor tiplerinin ani yüklenme anındaki tepkileri incelenmiştir. Tip A motor ani yüklenme durumunda tüm mıknatıs boyutlarında yüklü yol alma analizinde olduğu gibi asenkron olarak çalışmıştır. Bu motor tipinde tüm mıknatıs boyutları için 500 ms süresince senkron hıza ulaşamamış ve sürekli halde en düşük 45 rpm hız dalgalanmasına sahiptir. 706 rpm olan en yüksek hıza ise 20 mm-2 mm mıknatıs boyutlarında ulaşır. Tip B motorun senkron çalışma bölgelerinin olduğu ancak tip C motor gibi birçok mıknatıs boyutunda senkron hıza tutunamadığı tespit edilmiştir. Tip B motorda 20 mm mıknatıs uzunluğunda 4 ve 6 mm mıknatıs genişliğinde senkronizasyon sağlanırken, C tipi motorda ise en büyük mıknatıs hacmi için senkronizasyon sağlanmıştır. B tipi motor kısa süreli toparlanması ve düşük hız dalgalanması ile dikkat çekmektedir. D tipi motor modelinde dört mıknatıs boyutunda senkronizasyon gerçekleşmiştir. Diğer motor tipleri ile kıyaslandığında daha küçük hacimli mıknatıslarda da hız toparlanarak senkron hıza ulaşmıştır. Kısacası, diğer modellere göre mıknatıs boyutuna olan duyarlılığı daha az olup, hız salınımı daha düşük ve toparlanma süresi daha kısadır. Tüm motor tiplerinin içinde en küçük mıknatıs hacmi ile senkronizasyon performansı en yüksek olan D motor tipidir.



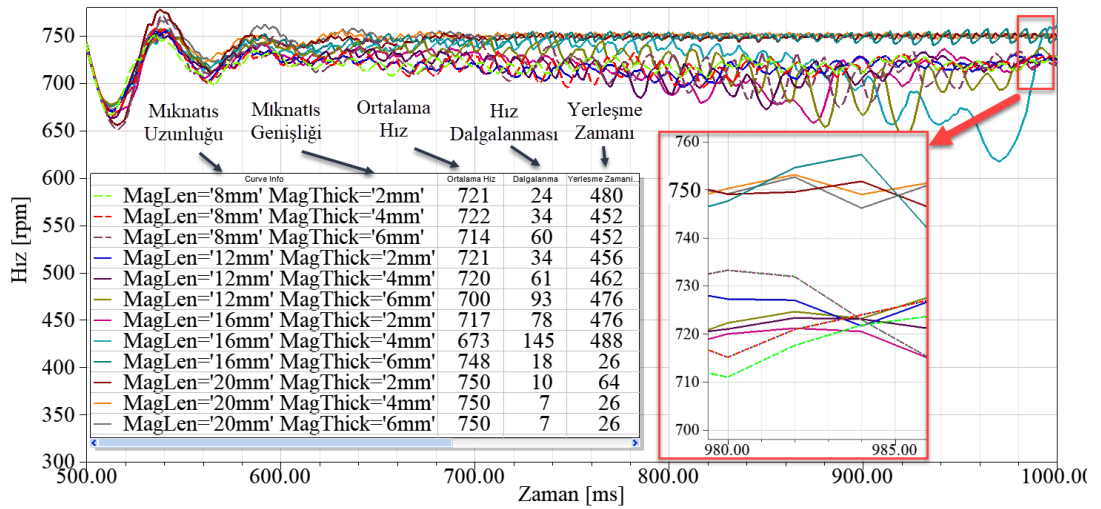
(a)



(b)



(c)



(d)

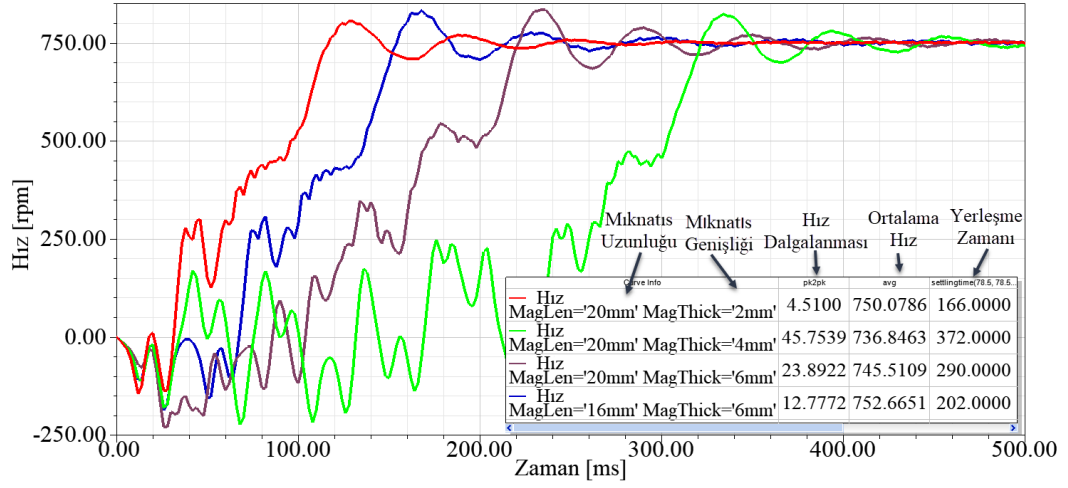
Şekil 4.7: Motor tiplerinin çeşitli mıknatıs geometrisi ile yüklenme anının hız üzerindeki etkisi a) A tipi, b) B tipi, c) C tipi, d) D tipi

Tablo 4.6’da ani yüklenme davranışına göre tüm mıknatıs boyutları için sürekli haldeki ortalama hızı, hız dalgalanması ve kararlı hale geçme süresi göz önüne alınarak performans sıralaması yapılmıştır. Senkron hıza ulaşma, kararlı haldeki hız dalgalanması ve yerleşme zamanı göz önüne alınarak performanslar değerlendirilmiştir. Sadece on motor tasarımı senkron hızda veya senkron hıza çok yakın çalışmaktadır. Yüksüz durumda yüksek performans gösteren A tipi motor ani yüklenme koşulu için yeterli performansa sahip değildir. Buna karşın yüksüz yol almadaki kötü performansa sahip B tipi motor ani yüklenme durumunda yüksek performans göstermiştir. C ve D tipi motorlar her iki durum için de performans sıralamasında listede üst sıralarda yer almıştır. Bu iki motor tipini kıyaslırsak D tipi motor küçük mıknatıs boyutlarında da yeterli performans sağlamıştır.

**Tablo 4.6:** Motorların ani yükleme durumundaki performans sıralaması

| Sıra | Motor Tipi | Mıknatıs Uzunluğu (mm) | Mıknatıs Genişliği (mm) | Ortalama Hız (rpm) | Hız Dalgalanması (rpm) | Yerleşme Zamanı (ms) |
|------|------------|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| 1    | B          | 20                     | 6                       | 750                | 2                      | 22                   |
| 2    | B          | 20                     | 4                       | 750                | 6                      | 22                   |
| 3    | B          | 20                     | 2                       | 748                | 7                      | 24                   |
| 4    | D          | 20                     | 4                       | 750                | 7                      | 26                   |
| 5    | D          | 20                     | 6                       | 750                | 7                      | 26                   |
| 6    | C          | 20                     | 6                       | 750                | 12                     | 30                   |
| 7    | D          | 16                     | 6                       | 748                | 18                     | 26                   |
| 8    | D          | 20                     | 2                       | 750                | 10                     | 64                   |
| 9    | C          | 20                     | 4                       | 746                | 14                     | 30                   |
| 10   | B          | 16                     | 6                       | 747                | 11                     | 102                  |

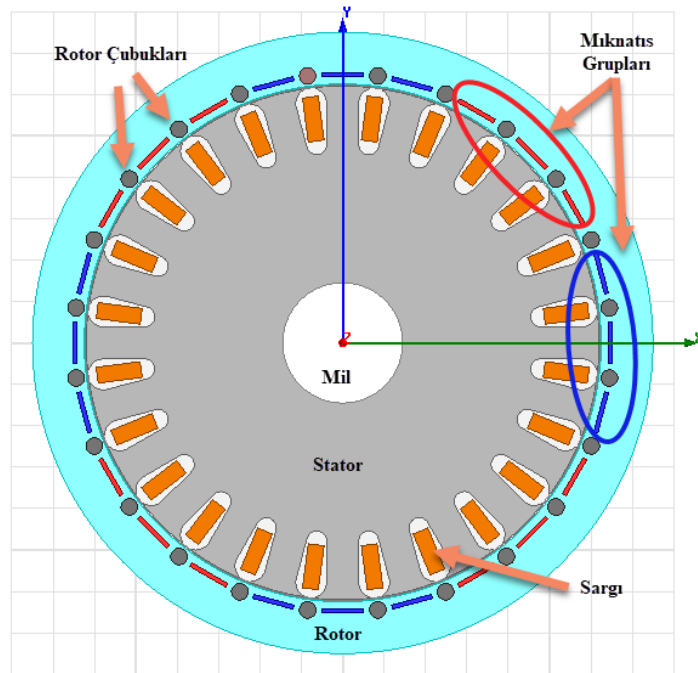
SEY analiziyle elde edilen sonuçlara göre A tipi, B tipi ve C tipi motor yapılarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Ancak, bu üç tip motorun gösterdiği davranışın çok üzerinde bir performans gösteren D tipi motor bu ölçütlere göre imalatı yapılması gereken motor olarak belirlenmiştir. Zira diğer tip motorlara göre, gerek yol vermede gerekse yük altındaki davranışında senkronizasyon problemi olmadığı gibi stator ve rotor çekirdeğindeki akı kuplajları da oldukça düzgün dağılımlıdır. Moment salınımları en az ve toparlanma süresi en kısa olan bu D tipi motor prototip yapımı için belirlenmiş olup imalat geometrisinde bu tip motor üzerinde çalışılmıştır. En uygun mıknatıs boyutu için yapılan yüklü çalışma analizi Şekil 4.8’de verilmiştir. Analiz sonucuna göre en düşük hız dalgalanması ve en sürede kararlı hale ulaşan mıknatıs boyutları 20 mm – 2 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.8: Yüklü (10Nm) yol alma durumunda mıknatıs boyutunun D tipi motor üzerindeki etkisi

### 4.2.3 Önerilen Motor Geometrisi

Dört farklı rotor geometrisi ile yapılan SEY çalışmaları sonucunda D tipi motor kalkış performansı, yüklenme anındaki toparlanma kabiliyeti ve moment dalgalanması bakımından üstün olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, literatürde bu tip motor geometrisi incelenmemiştir. Bu çalışma kapsamında Şekil 4.9’de gösterilen D tipi rotor geometrisine karar verilmiş ve prototip motor üretilmiştir.



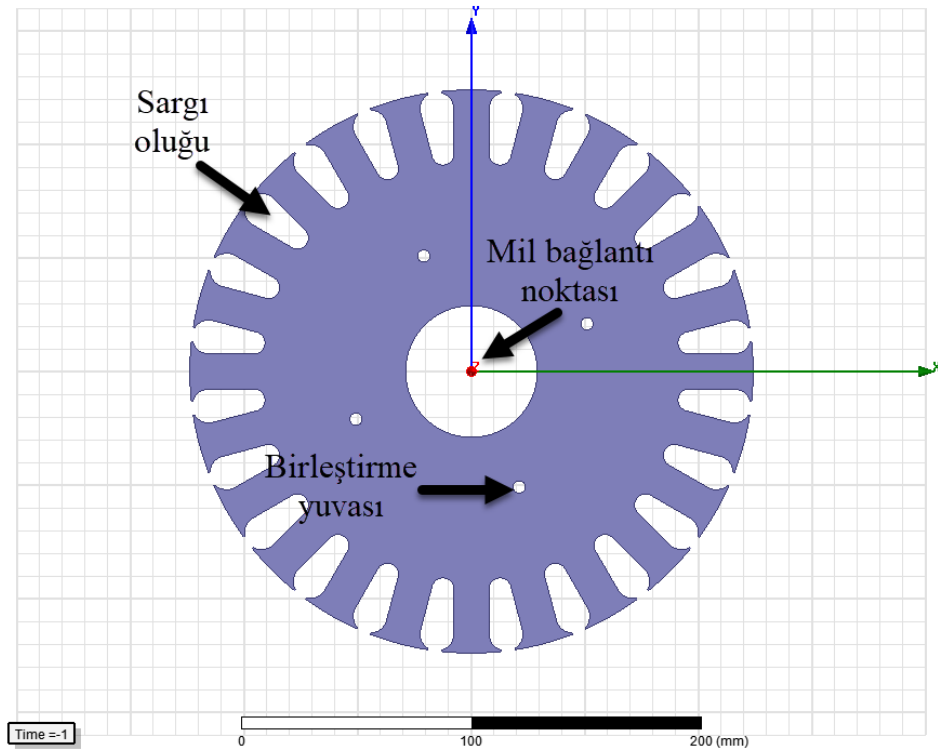
Şekil 4.9: DRKSM Motor genel geometrisi

### 4.3 Prototip Motor İmalatı

Motorun prototipinin imalat aşamaları; stator saclarının birleştirilmesi, stator sargı yerleşimi, rotor saclarının birleştirilmesi, mıknatısların yerleşimi, rotor çubuklarının yerleştirilerek kısa devre çubuğu ile bağlantısının yapılması ve diğer mekanik parçalarının bir araya getirilmesidir.

#### 4.3.1 Stator İmalatı

Motor boyutlarının Alatay elektrikli aracına göre alındığı Bölüm 4.1’de vurgulanmıştır. Bu nedenle, en uygun olduğuna karar verilen D tipi motor geometrisi için 24 oluklu stator yapısı tasarlanmış olup tasarım parametrelerinden stator geometrisi Tablo 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.10’de 0,5mm saç tabakalarından oluşacak stator sacı gösterilmiştir. Sacların bir araya getirilmesi için kullanılacak olan 4 adet yuva ve motorun mil bağlantı noktası stator geometrisi üzerinde gösterilmiştir.



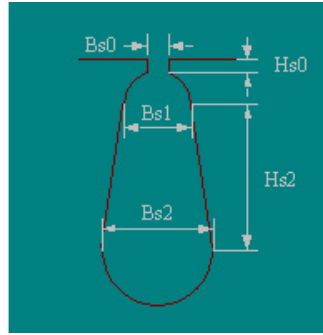
Şekil 4.10: Stator geometrisi



**Tablo 4.7:** Stator geometri ölçüleri

| Parametre         | Uzunluk |
|-------------------|---------|
| Stator Dış Çapı   | 248 mm  |
| Stator İç Çapı    | 94 mm   |
| Stator Paket Boyu | 40 mm   |
| Slot Sayısı       | 24      |

Şekil 4.11’da motor tasarımında kullanılan slot geometrisine ve Tablo 4.8’de ise slot geometrisi ile ilgili parametrelere yer verilmiştir. Burada  $Bs_0$  değerinin çok küçük olması sargı yerleşimini zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan hava aralığındaki akının düzgün dağılması ve tutma momentinin daha düşük olması için küçük olmalıdır. Ayrıca bir oluktaki toplam iletken kesitinin en az 1,5 katı kadar oluk alanının olması sargıların kolay yerleştirilmesi ve izolasyon malzemesi yerleştirilmesi için gerekmektedir.



**Şekil 4.11:** Slot geometrisi (ANSYS Maxwell)

**Tablo 4.8:** Slot geometri ölçüleri

| Parametre  | Uzunluk | Parametre  | Uzunluk |
|------------|---------|------------|---------|
| <b>Bs0</b> | 6 mm    | <b>Bs2</b> | 9,8 mm  |
| <b>Hs0</b> | 0,5 mm  | <b>Hs2</b> | 20 mm   |
| <b>Bs1</b> | 15 mm   | <b>Hs1</b> | 2 mm    |

Elektrikli motorlarda stator ve rotor sargılarının çekirdeği silisyumlu sacların bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Silisli saclar tane yönlendirilmiş ve tane yönlendirilmemiş olarak sınıflandırılır. Yüksek iletkenliği, yüksek mukavemeti ve düşük düşük histerezis kaybı ile elektrik enerjisi kaybını minimuma indirgeyerek

motorlarda verimi artırır. 0,2 -1 mm gibi geniş aralıktaki kalınlıklarda rulo şeklinde (rotor yüzeyine yapışık, tam çevresel olarak) özel üretilirler.

**Tablo 4.9:** Standart sacların manyetik özellikleri

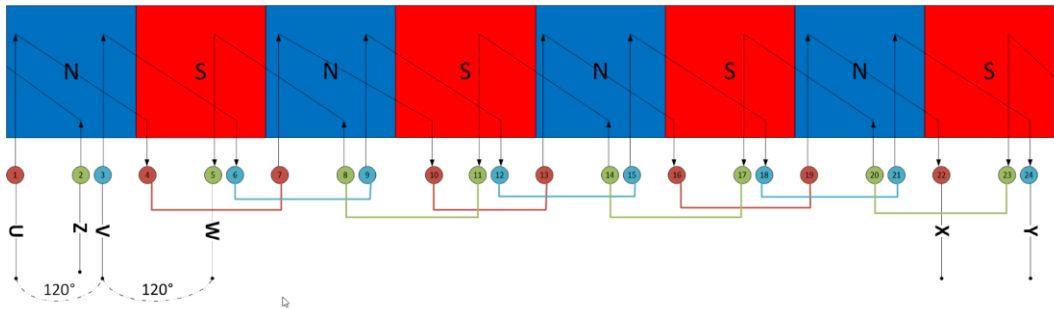
| Sınıf Adı | Kalınlık (mm) | Maksimum Kayıp (50 Hz 1,5 Tesla) (W/Kg) | Maksimum Kayıp (50 Hz – 1 Tesla) (W/Kg) | Minimum Manyetik Polarizasyon (H=2500A/m) | Minimum Manyetik Polarizasyon (H=10000A/m) | Geçirgenlik (1,5 Tesla) |
|-----------|---------------|---|---|---|--|-------------------------|
| M235-35A  | 0,35          | 2,25                                    | 0,92                                    | 1,53                                      | 1,76                                       | 610                     |
| M250-35A  | 0,35          | 2,35                                    | 0,98                                    | 1,53                                      | 1,76                                       | 660                     |
| M250-50A  | 0,50          | 2,38                                    | 1,02                                    | 1,55                                      | 1,77                                       | 740                     |
| M350-50A  | 0,50          | 3,14                                    | 1,33                                    | 1,58                                      | 1,79                                       | 1020                    |
| M530-50A  | 0,50          | 4,42                                    | 2,01                                    | 1,59                                      | 1,8  | 1100                    |
| M530-65A  | 0,65          | 4,35                                    | 1,90                                    | 1,59                                      | 1,80                                       | 1150                    |

Şekil 4.12’da tasarımı gerçekleştirilen motor saclarının bir araya getirilmesi gösterilmiştir. Standartlar çerçevesinde üretim aşamasında kalitenin belirlenmesi için malzemenin manyetik ve mekanik özelliklerini göz önüne alarak sınıflandırma yapmıştır. Örneğin Avrupa standartları 0,23 mm, 0,27 mm, 0,30 mm ve 0,35 mm kalınlığında üretilen sacların 50 Hz çalışma frekansında kilogram başına kayıplara göre sınıflandırma yapmıştır (Tablo 4.9). Bu çalışmada piyasadan temin edilen yaygın kullanıma sahip M350-50A tipi sac kullanılmıştır.



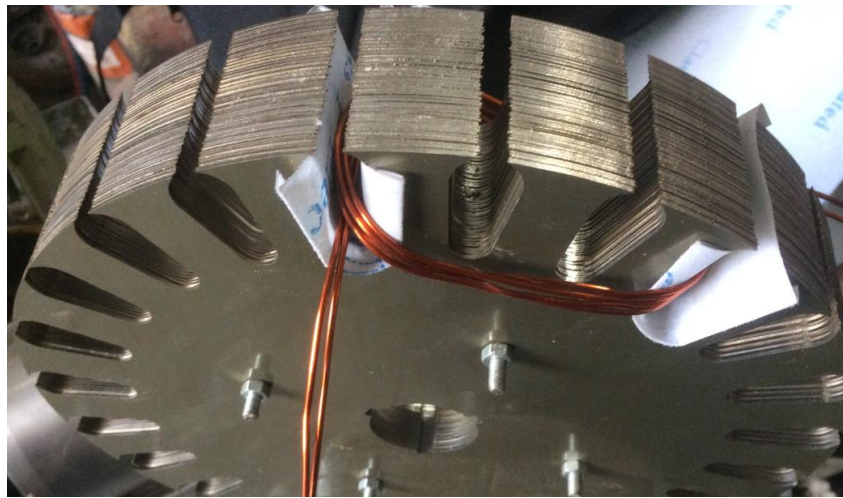
**Şekil 4.12:** Stator saclarının dizilmesi

Geleneksel motorlarda olduğu gibi tasarlanacak olan bu motorda, tek katmanlı ya da çok katmanlı sargı düzeni kullanılabilir. Çok katmanlı sargı düzeninin kullanılması için bir kutbun arka arkaya en az 2 adet olması gereklidir. Örneğin 8 kutuplu, 3 faz sargı yapısı olan bir motorda en az 48 oluk olması gereklidir. Böylece bir katman diğerine göre bir adım kaydırılarak harmoniklerin azaltılması sağlanır. Ancak, teker içi motor tasarımındaki boyut kısıtlarından ötürü tasarlanan motorun yarım kalıp sargı düzeninde olması daha uygun bulunmuş olup kullanılan sargı düzeni Şekil 4.13’de 24 slot (oluk) ve 8 kutup olarak verilmiştir.



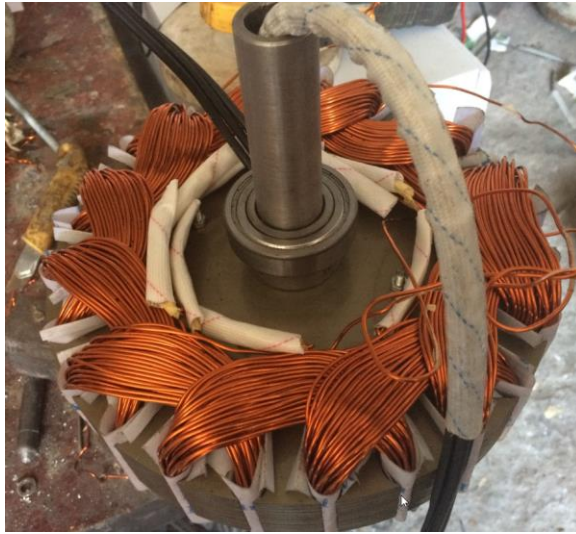
Şekil 4.13: 24-slot, 8-kutup için yarım kalıp sargı düzeni

Motorun sargı yerleşimi için slotlarda yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. Bu sayede elektriksel izolasyon sağlanırken aynı zamanda iletkenlerin sac ile teması sonucunda oluşabilecek izolasyon hatası önlenmektedir. Şekil 4.14’de statora sargı yerleşiminin ilk aşaması gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Paketlenmiş stator sac levhalarına sarımın başlanması

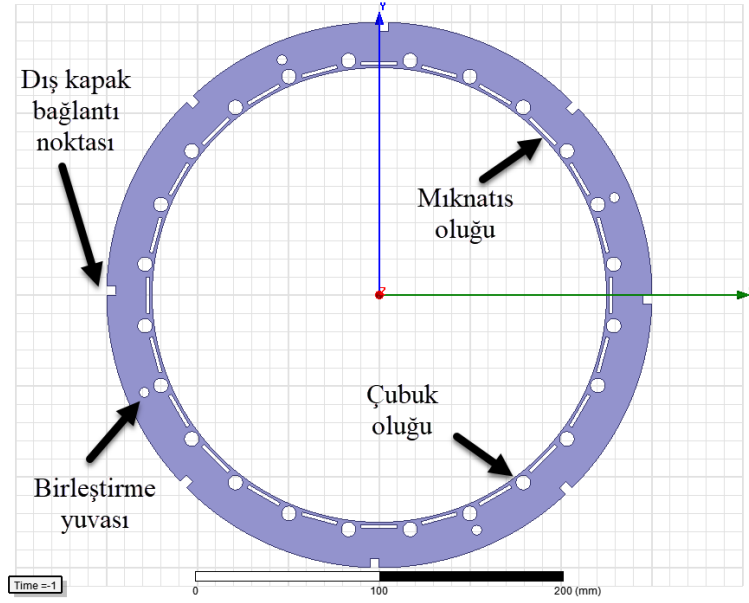
Şekil 4.15'te sarım işleminin tamamlanarak her bir faz ucunun oluşturulduğu gösterilmiştir. Her bir bobin ayrı ayrı sarılarak oluklara yerleştirilmiş olup, sargı düzenine göre bobinler bir araya getirilmiştir. Her bir faz için 4 adet bobin 24 oluk üzerine yerleştirilmiştir. Her bobinin arasında 2 oluk boşluk bulunmaktadır. Örneğin, U fazı için 1-4, 7-10, 13-16 ve 19-22 nolu oluklar üzerine 4 adet bobin yerleştirilmiş, fazın giriş ucu 1 nolu oluk ve çıkış ucu 22 nolu bobin olarak belirlenmiştir. Diğer fazlar ise U fazı referans alınarak aralarında  $120^\circ$  fark olacak şekilde bobin bağlantıları gerçekleştirilir.



Şekil 4.15: Stator sargılarının tamamlanmış durumu

### 4.3.2 Rotor İmalatı

Rotor ve stator birlikte aynı sac tabakasından işlenmiştir. Rotor üzerinde kısa devre çubukları ve mıknatıs için boşluklar yer almaktadır. Üretim aşamasında kolaylık sağlaması bakımından rotor çubukları yuvarlak kesitte seçilmiştir. Rotor üzerinde 24 adet mıknatıs ve 24 adet kısa devre çubuğu bulunmaktadır. Rotor geometrisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Rotor geometrisi

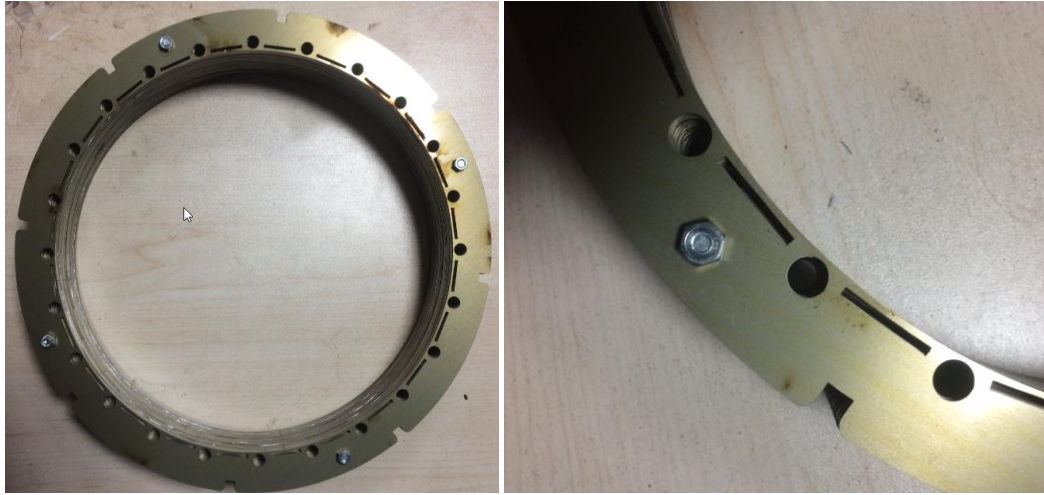
Önerilen motorun ANSYS Maxwell yazılımında kullanılan tasarım parametrelerine ilişkin değerler Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10: Rotor geometri ölçüleri

| Parametre             | Değer  | Parametre    | Değer |
|-----------------------|--------|--------------|-------|
| <b>Rotor İç Çapı</b>  | 250 mm | <b>Hs0</b>   | 2mm   |
| <b>Rotor Dış Çapı</b> | 300 mm | <b>Hs01</b>  | 2mm   |
| <b>Paket Boyu</b>     | 40 mm  | <b>Hs2</b>   | 0,1mm |
| <b>Slot Sayısı</b>    | 24     | <b>Bs0</b>   | 0mm   |
| <b>Slot Tipi</b>      | 1      | <b>Bs1,2</b> | 8mm   |

Tüm sac paketlerinin bir araya getirilmesiyle 40 mm uzunluğunda 300 mm çapında motor bloğu oluşturulmuştur. Statorun sarımı 8-kutuplu olarak yapılmıştır. Bu kutup sayısına uygun mıknatıs yerleşimi yapılmıştır. Böylece hem rotor hem stator aynı kutuplu olarak elde edilmiş ve kararlı hal için senkron yapı korunmuştur. Kutup sayısının tespitinde doğrudan teker içi yerleşime uygun motor tasarımı yapıldığından redüktörsüz olarak maksimum 750 rpm (dev/d) hız göz önüne alınmıştır. Rotor üzerine yerleştirilen mıknatıslar üçerli gruplar halinde 8-kutup olarak yerleştirilmiştir. Son olarak rotor çubukları yerleştirilip kısa devre halkası ile rotor çubukları birleştirilmiştir.

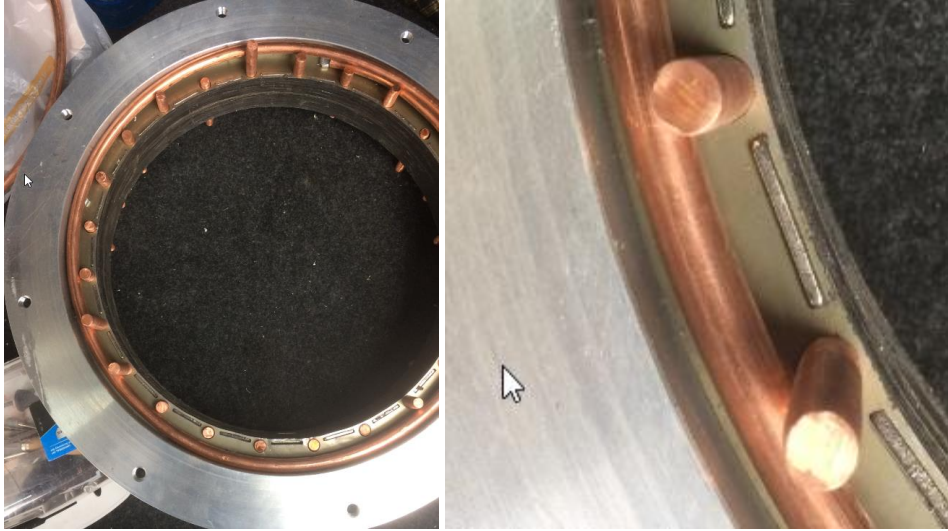
Tasarımı gerçekleştirilen motorun rotorunda mıknatıslar ve kısa devre çubukları bulunmaktadır. Mıknatısların yüksek sıcaklıkta özelliklerini kaybetmesi nedeniyle kısa devre çubuklarının montajının dikkatli yapılması gerekmektedir. 8 mm çapındaki kısa çubuklar öncelikle slot yuvalarına yerleştirilir. Her bir çubuğun kısa devre halkası ile bağlantısı her iki taraftan yapılır. Böylece ASM yapısındaki sincap kafes oluşturulmuş olur. Şekil 4.17 - Şekil 4.20 arasında yapılan çalışmanın adımları gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Dış rotor çubukları ve mıknatis oyuklarının geometrisi



Şekil 4.18: Dış rotor saclarının paketlenmesi



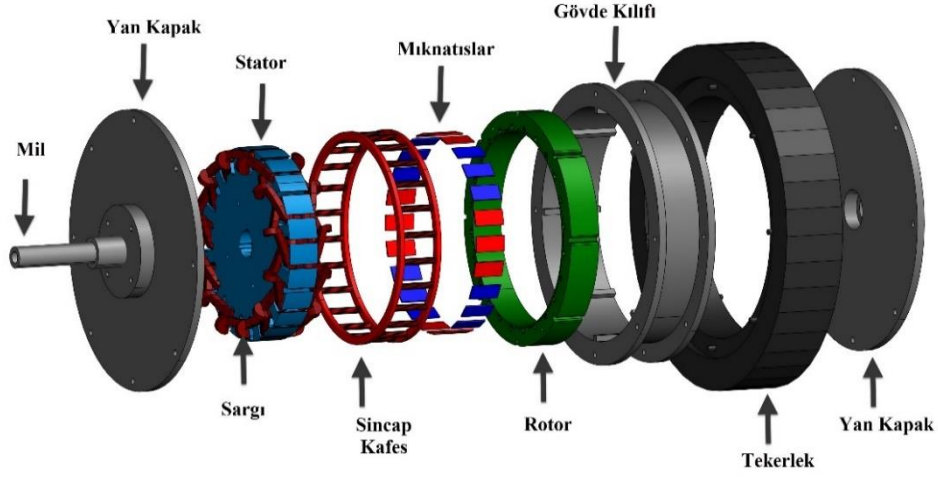
Şekil 4.19: Dış rotor çubukları ve mıknatısın yerleştirilmesi



Şekil 4.20: Dış rotor imalatının tamamlanmış durumu

### 4.3.3 Mekanik Parçaların Tasarımı

Motor mili ve motor kapağı, motorun mekanik zorlanmalara karşı bir arada kalması sağlayan ve hareketi aktaran parçalardır. İç rotorlu motorlarda motor mili enerji iletimini eğilme momenti ve merkezkaç momentine maruz kalarak sağlarken dış rotorlu motorlarda mil sadece eğilme momentine karşı koyar. Milin eğilmesine taşıtın ağırlığı neden olur. Aynı zamanda stator sargılarının da dışarıya taşınmasında motor mili görev yapar.



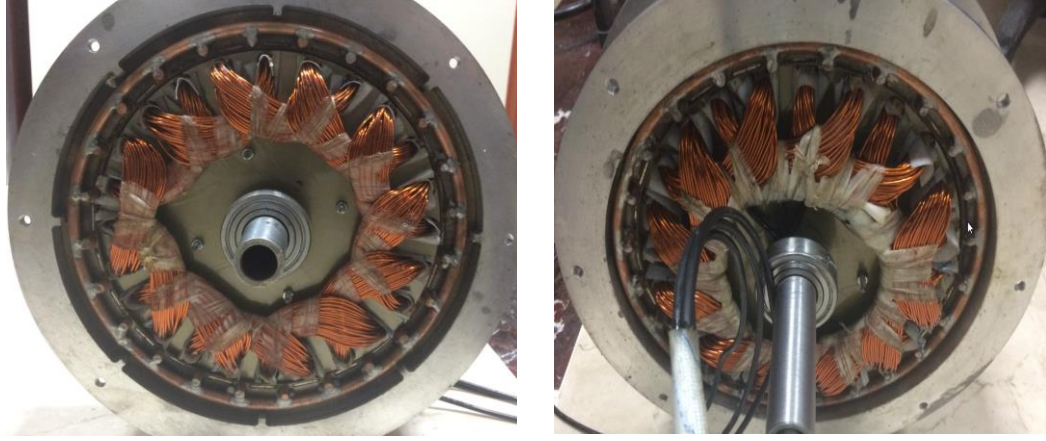
Şekil 4.21: Tümlşik motor parçaları

Bu çalışmada, dış rotorlu yapı kullanıldığı için taşıt tekerleğine monte edilecek şekilde dış kılıf – gövde tasarlanmıştır. Dış kılıf ve yan kapaklar birbirlerine sıkı şekilde bağlıdır. Mil üzerindeki rulmanlar sayesinde rotor stator dan bağımsız şekilde hareket edebilmektedir. Sargılı stator kısmı araç gövdesine mesnet edilmiş olup dönen rotor kısmı tekerlek ile senkron dönecektir. Şekil 4.21’de tasarlanan motor modelinin parçaları üç boyutlu olarak gösterilmiştir.

#### 4.3.4 Tamamlanmış Prototip

Tasarım adımları tamamlanan DRKSM’nin tüm üretim aşamaları tamamlanmış ve montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22’de rotor ve statorun birleştirilerek imalatı gerçekleştirilen DRKSM gösterilmiştir.





(a)

(b)



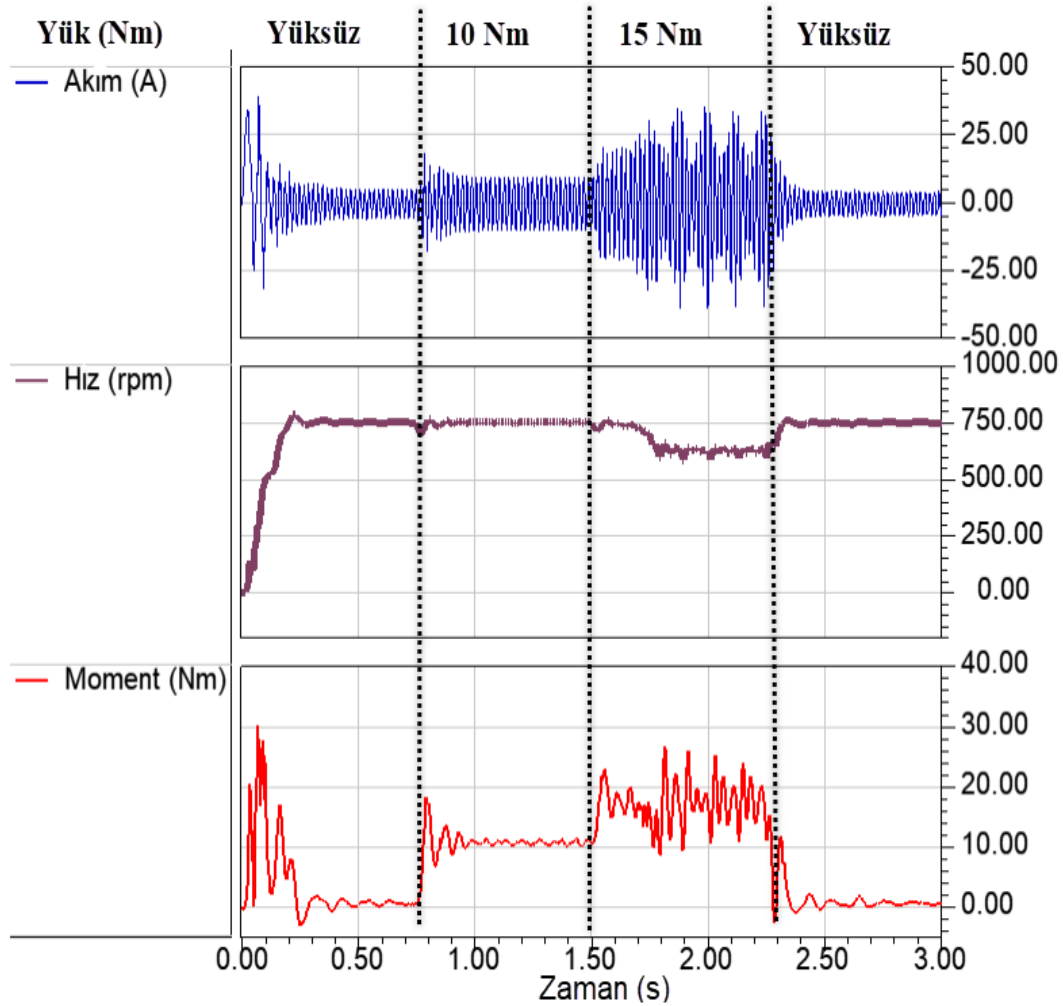
(c)

**Şekil 4.22:** Statorun dış rotor içine yerleştirilmesi a) Ön görünüş, b) Arka görünüş c) Tamamlanmış motor prototipi

#### 4.4 Tasarımı Yapılan Motorun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

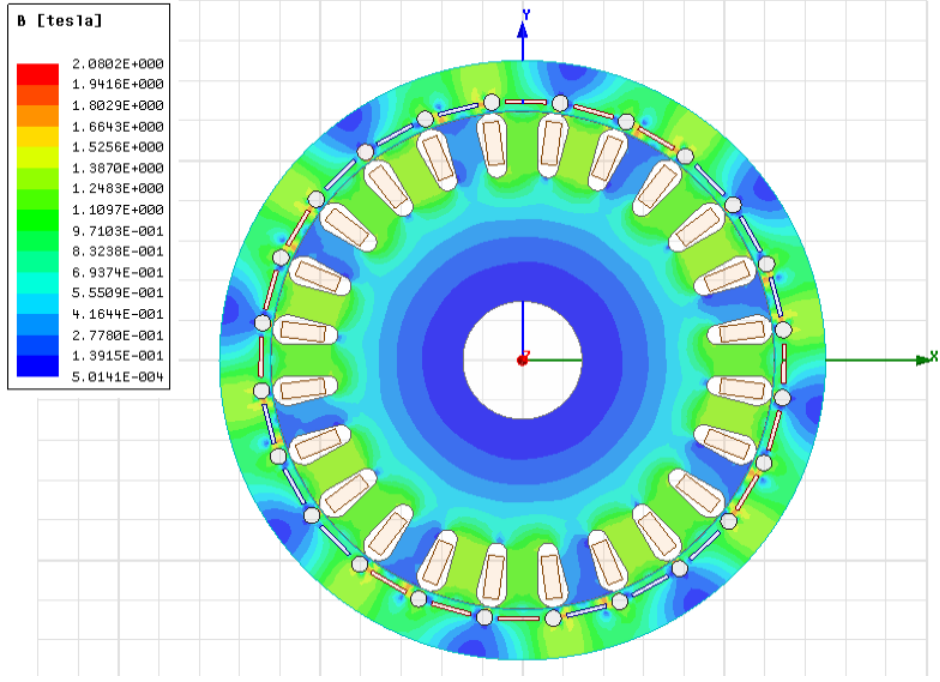
Tasarımı yapılan modelin SEY analizinde akım, hız ve moment değişimi grafik olarak Şekil 4.23’de verilmiştir. Motor öncelikle yüksüz durumda 750 rpm nominal hızına doğrudan yol verilerek ulaşılmıştır. 0,75 s’de motora nominal yükü olan 10 Nm moment uygulanmış olup motor hızını senkron hız olan 750 rpm’de tutmayı başarmıştır. Motorun aşırı yüklenme davranışını gözlemlemek için nominal yükün 1,5 katı olan 15 Nm moment 1,5 s’de uygulandığında motor istenilen asenkron davranışı sağladığı analiz sonuçlarında görülmektedir. Analitik ve sayısal çözüm sonuçlarına

tamamen uyumlu SEY sonuçları elde edilmiştir. Böylece motorun bilgisayar benzetim sonuçları göz önüne alınarak, motorun imalat aşamasına geçilebilir.

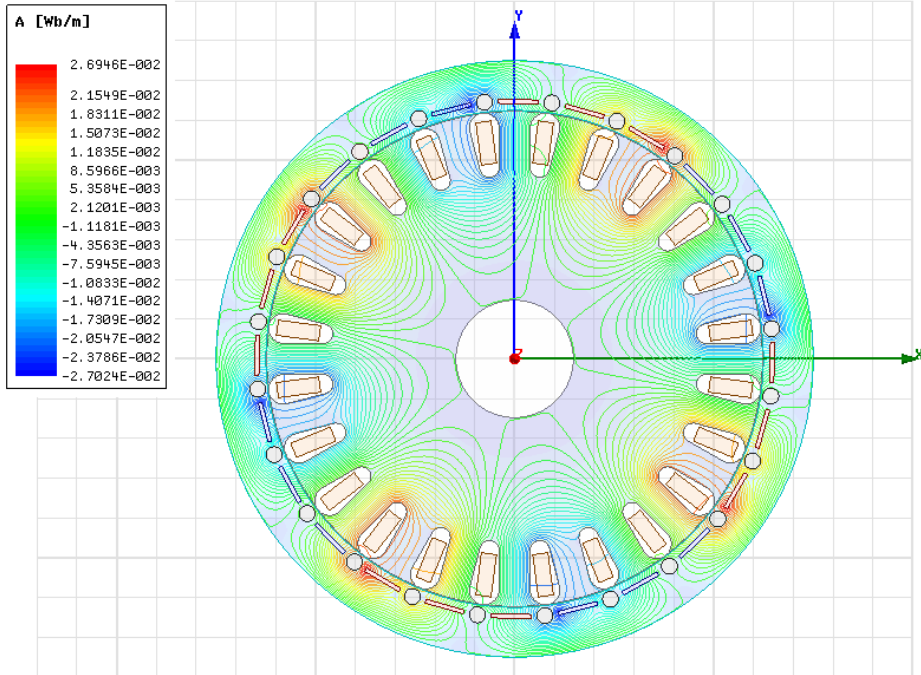


Şekil 4.23: Hız – Zaman Grafiği (0-0,75sn yüksüz kalkış; 0,75-1,5sn 10Nm sabit yüklü; 1,5-2,25sn 15Nm sabit yük;2,25-3sn yüksüz)

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te motor yükü nominal iken akı yoğunluğu ve akı dağılımı sırasıyla verilmiştir. Motorun her bir parçasında doyum etkisi neredeyse yok denecek kadar azdır. Motor üzerindeki akı yoğunluğu stator boyunduruğu üzerinde 1,25 Tesla değerlerine ulaşırken, rotordaki mıknatıs-çubuk arasındaki bölgede 2 Tesla'ya kadar ulaşmaktadır.



Şekil 4.24: Tasarlanan motorun akı yoğunluğu dağılımı

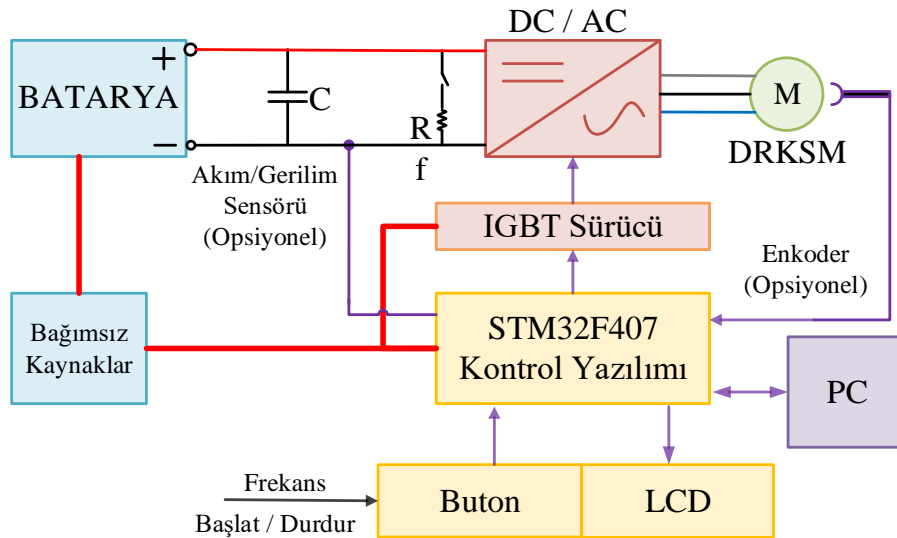


Şekil 4.25: Tasarlanan motorun manyetik vektör potansiyel grafiği

## 5. SÜRÜCÜ TASARIMI VE İMALATI

Sürücü sistemleri, elektrik makinelerinin, elektrik enerjisini mekanik enerjiye ya da tersine şekilde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüşümü sırasında kontrolünü sağlar. Buna göre, sırasıyla motor ya da jeneratör olarak adlandırılırlar. Elektrik motorları, endüstri, ev ve elektrikli araçlar başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Geleneksel DA motor uygulamalarında hızın kontrolü sadece gerilimin kontrolü ile gerçekleşirken AA motorlarında hız, frekans ve gerilim ile ya da akı vektörlerinin kontrolü ile sağlanır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte DA motoruna göre daha verimli ve ömürlü olan AA motorlarına yönelim artmıştır. Her bir motor türü için kontrol yöntemleri geliştirilmiş ve bunlar için gerekli devre tasarımları yapılmıştır. Kontrol yöntemlerin karmaşıklığı arttıkça gerekli devre tasarımı karmaşıklaşmış olup buna bağlı olarak yüksek kabiliyetli işlemci gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

AA motorları için kullanılan evirici bazlı sürücüler, DA enerjisini AA enerjisine dönüştüren güç elektroniği devreleridir. Sürücü tasarımı, entegre elemanlarını besleyen DA dönüştürücüleri, kontrol sinyallerini üreten kontrolör (denetleyici), anahtarlama elemanları ve anahtarlama elemanların süren ara devreden oluşur. DRKSM'nin kontrolü için üç fazlı gerilim kaynaklı evirici (VSI) tipi bir sürücüye ihtiyaç duyulmuştur. Zira, bataryanın gerilim bazlı bir kaynak olması bu kararda etkilidir. Sürücünün genel şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.

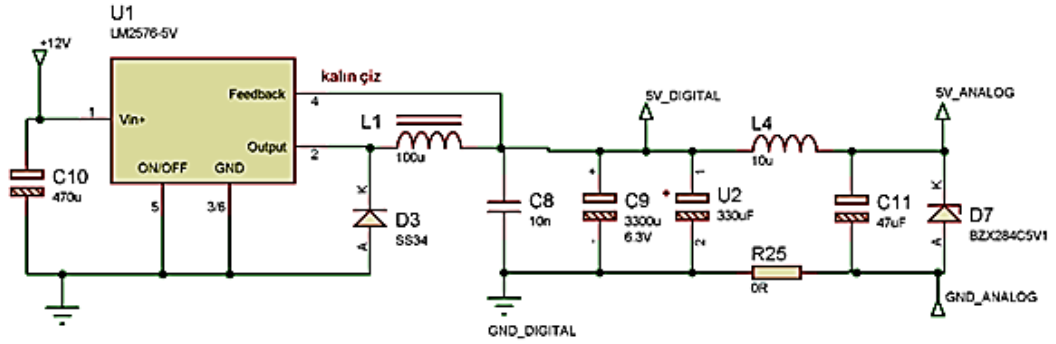


Şekil 5.1: Üç faz evirici genel şeması

## 5.1 Besleme Devresi

Literatürde anahtarlama elemanlarını sürmek için; kayan tip, darbe ya da izole (GND yalıtımını sağlayan) trafolu ve izoleli anahtarlama yöntemleri yer almaktadır. İzoleli yöntem kullanılan bu çalışmamda, 6 adet bağımsız-izole kaynak kullanılmıştır. Bağımsız kaynaklardan iki tanesi akım sensörleri için simetrik kaynak olarak tasarlanmıştır. Bir adet +18 V gerilim kaynağı, hem düşük taraf anahtarların sürücü beslemesini hem de diğer entegrelerin beslenmesini sağlamaktadır. Diğer üç kaynak ise yüksek taraf anahtarların sürülmesi için gereklidir.

Devredeki analog ve dijital entegrelerin beslenmesi için 5 V çıkışlı azaltan tip (buck type) çevirici tasarlanmıştır. Burada, analog ve dijital GND noktaları birbirinden ayrılarak entegrelerin birbirini etkileme düzeyi en aza indirilmiştir. Devredeki azaltan tip dönüştürücü devresi Şekil 5.2’de sunulmuştur.



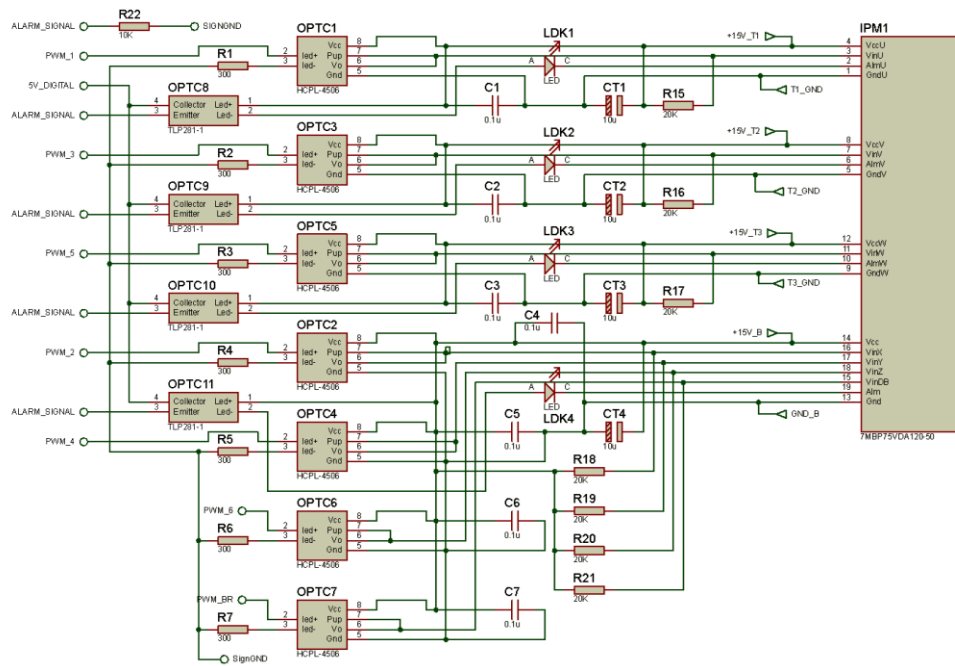
Şekil 5.2: Azaltan tip DA dönüştürücü (5V)

## 5.2 IGBT IPM Blok Tetikleme Devresi

Sistem bir elektrikli araç üzerinde kullanılacağı için DA kaynak olarak bir batarya sistemi bulunmaktadır. Kullanılan anahtarlama elemanları bataryaların maksimum gerilimine ve motorun gücüne dayanacak özellikte seçilmiştir. Kullanım kolaylıkları ve dahili koruma gibi özelliklerinden dolayı IPM bloklar yüksek güvenilirlik gereken uygulamalarda sıkça tercih edilmektedirler. Sürücü devresinde Fuji Electric firmasının 7MBP50VDA120-50 kodlu ürünü kullanılmıştır. Eviricide kullanılan anahtarlama elemanların sürülmesi için üst kollar için 3 adet ve alt kollar için 1 adet toplam 4 adet izole edilmiş kaynaklar ya da ön yüklemeli (bootstrap)

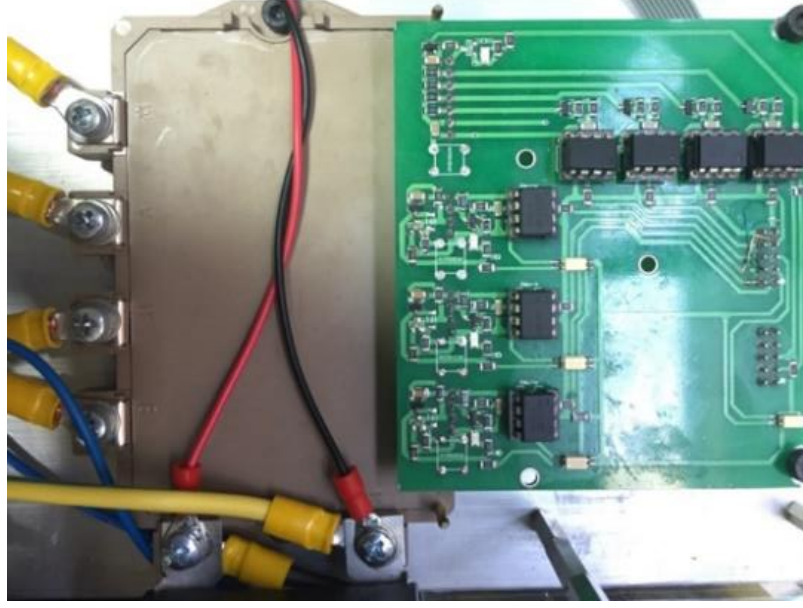
devrelerin kullanılması gerekmektedir. Endüstriyel uygulamalarda her iki yapının da etkin şekilde kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada 12 V ve 18 V izole gerilim kaynağı için trafolar kullanılmıştır.

Şekil 5.3'te IPM modülün anahtarlama devresi verilmiştir. Her bir anahtarlama elemanı için 12 V - 15 V arası gerilim seviyesi gereklidir. +5 V kontrolör sinyallerinin yükseltilmesinde, hızlı optik yalıtıcı olan HCLP4506 entegresi kullanılmıştır. Aynı zamanda üst kollara ait sürücü besleme kaynaklarının işlemci PWM çıkışlarından yalıtımı da optik yalıtıcı entegreler sayesinde sağlanmıştır. IPM tarafından üretilen hata sinyalleri de TLP281 ile kontrolör kartına aktararak sürüş hataları ya da meydana gelen aşırı sıcaklık, düşük gerilim veya aşırı akım hatalarına karşı IPM blok tarafından üretilen hata sinyalinin değerlendirilerek sürücünün güvenliği sağlanmıştır.



Şekil 5.3: IPM modül anahtarlama devresi

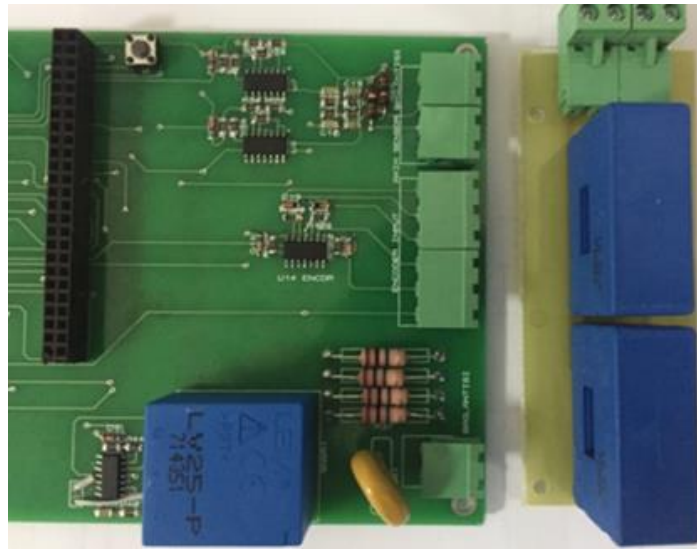
Şekil 5.4'te soğutucu üzerine yerleştirilmiş IPM blok ve IGBT sürücü devresi birlikte gösterilmiştir.



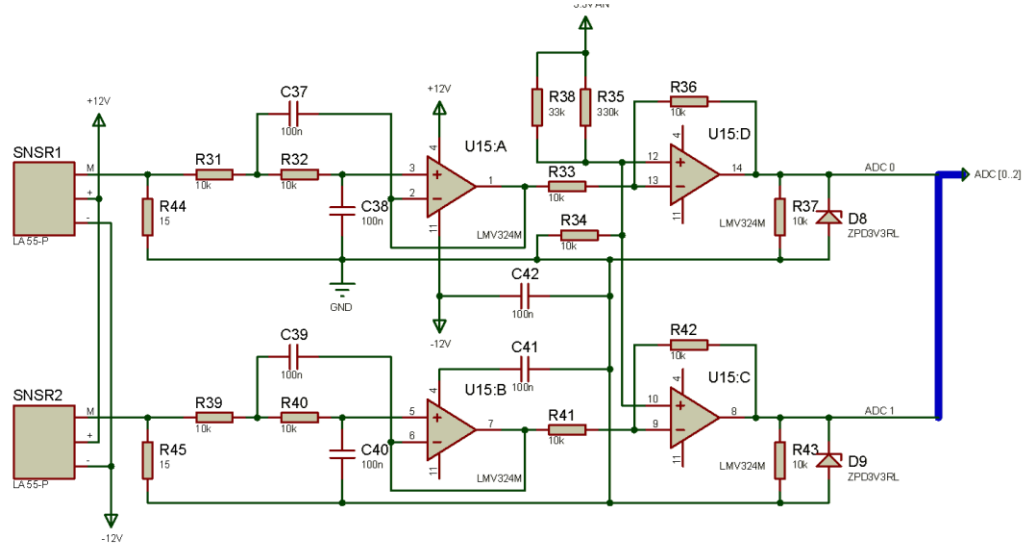
Şekil 5.4: IPM blok ve IGBT sürücü devresi

### 5.3 Motor Faz Akımı ve DA Bara Gerilimi Ölçme Devresi

Kapalı çevrim kontrollerin gerçekleştirilmesi için akım ve gerilim sensörleri devreye eklenmiştir. Bu amaçla devrede akım sensörü olarak iki adet LEM LA-55P ve gerilim sensörü olarak LV25-P malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan akım ve gerilim sensörleri için devre kartı Şekil 5.5'te verilmiştir ve kartın devre çizimi Şekil 5.6'da verilmiştir.

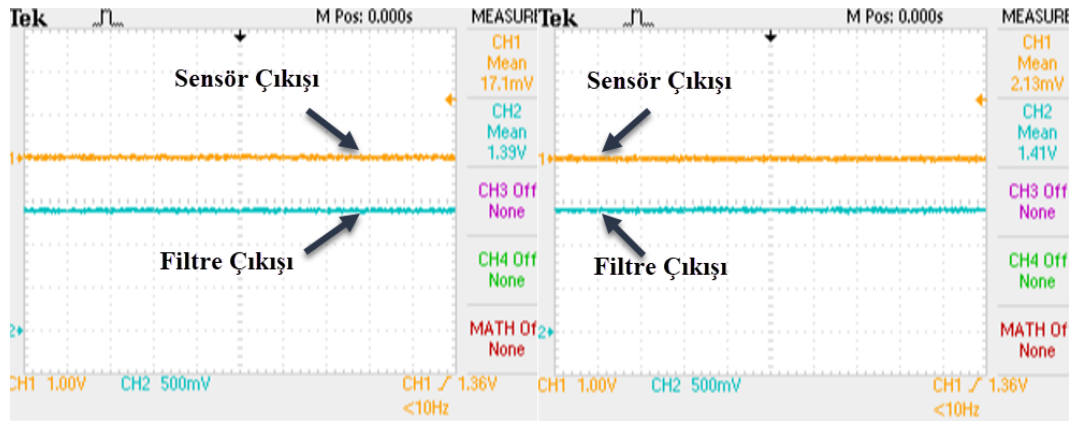


Şekil 5.5: Eviricide sensör yerleşimi ve kartı



Şekil 5.6: Akım okuma devre çizimi

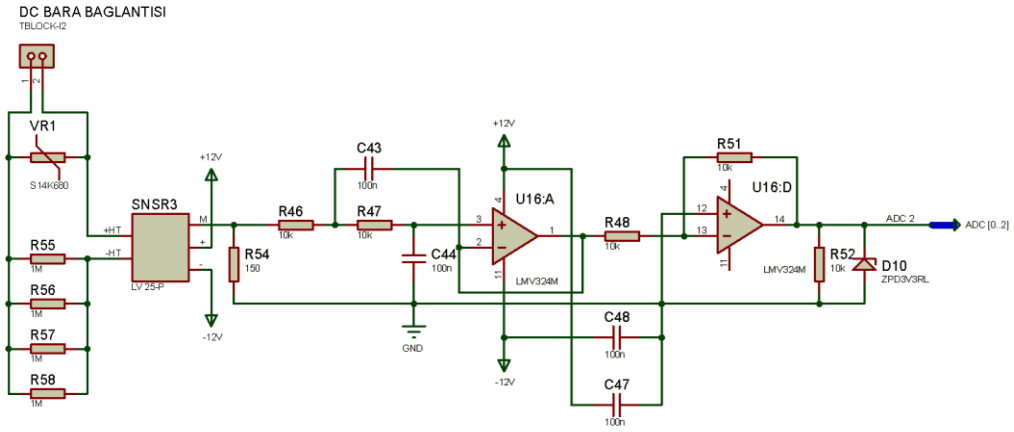
Şekil 5.7’de sensör çıkışı ve filtre çıkışını temsil etmek üzere sensöre 1A akım uygulanmıştır. Devre 15 mV/A dönüşüm oranı ile tasarlanmıştır. Yüksüz durumda sinyal Şekil 5.7(a), 1-A uygulanması sonucunda Şekil 5.7(b)’ye dönüşmektedir. Filtre çıkışında 15 mV artış ile devrenin doğruluğu test edilmiştir.



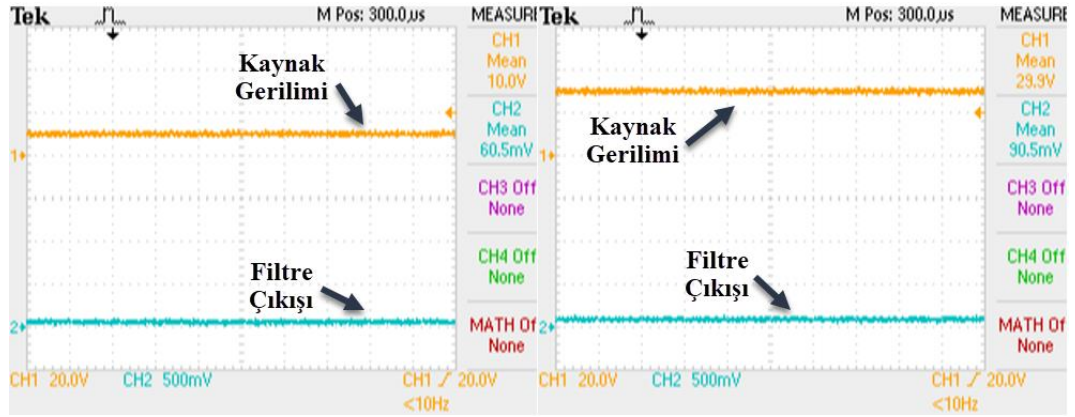
(a) (b)  
Şekil 5.7: Akım sinyali (a) Sensör çıkışı, (b) Filtre çıkışı

Şekil 5.8’de devre çizimi verilen gerilim sensöründen elde edilen sinyaller Şekil 5.9’da verilmiştir. Gerilim sensörü için 1,5 mV/V dönüşüm oranı olan devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Verilen şekilde, kaynaktaki 20 V’luk artış sonucunda devrenin sinyal çıkışında 30 mV’luk artış olmuştur.





Şekil 5.8: Gerilim okuma devre çizimi

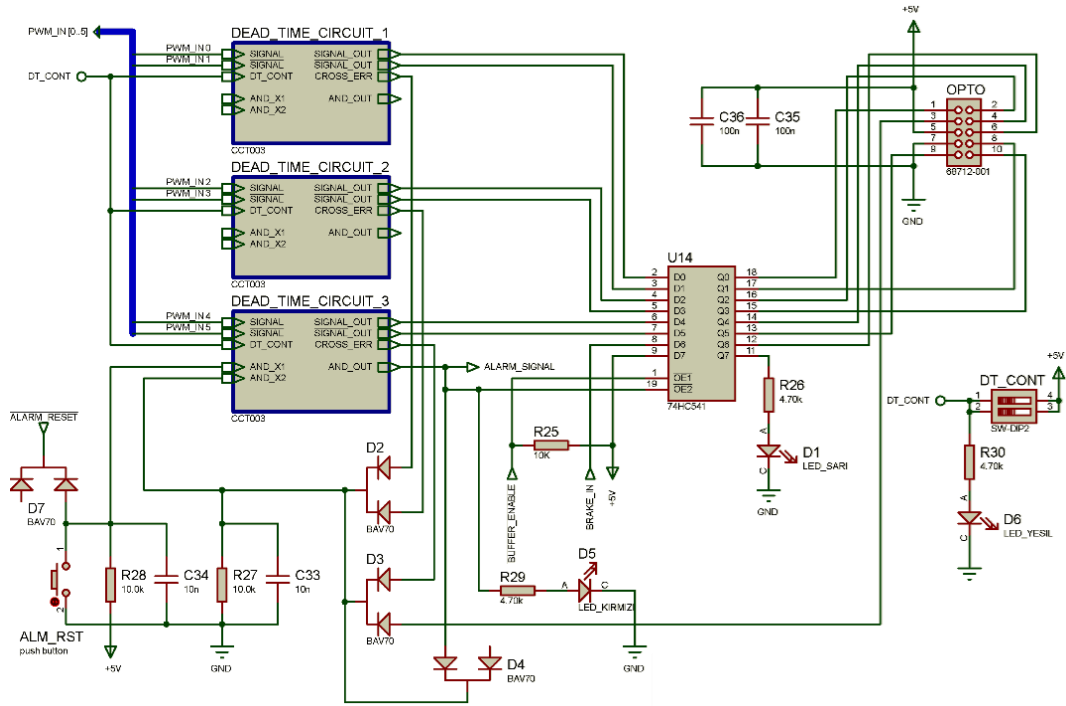


Şekil 5.9: Gerilim sinyali (a) Kaynak gerilimi, (b) Filtre çıkışı

#### 5.4 Ölü Zaman Devresinin Gerçekleştirilmesi

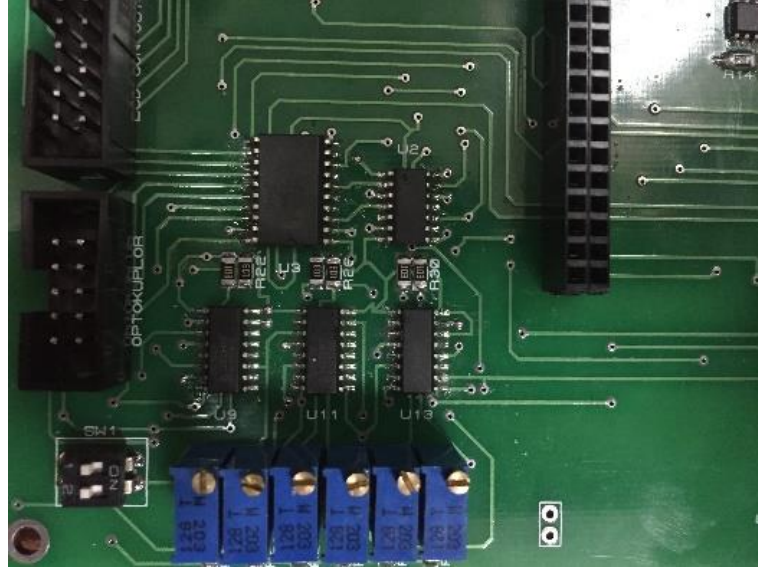
Gerilim kaynaklı eviricilerin anahtarlama sırasında aynı kol üzerinde bulunan anahtarlama elemanlarının aynı anda anahtarlama ya da anahtarların iletim-kesim geçişlerindeki kesişmeler besleme kaynağının kısa devre olmasına neden olmaktadır. Bu problemin çözümünde iki farklı yol izlenebilir. İlk olarak anahtarlama sinyali mikrodenetleyicide oluşturulurken iki sinyal arasında belirli süre boşluk bırakılır. Diğer bir yöntem ise analog devre ile iki sinyalin çakışmasını önlemektir. İkinci yöntem ile yazılımda oluşabilecek herhangi hatada önlenir. Bu çalışma kapsamında analog devre tasarlanmış olup kontrol devresi Şekil 5.10'da verilmiştir. Tasarım üzerinde yer alan potansiyometre kullanılacak olan anahtarlama elemanlarına

ölü zamanın ayarlanabilmesini sağlamaktadır. Burada kullanılan IPM modül için anahtarlama zamanları dikkate alındığında 4 us ölü zaman gerekmektedir.

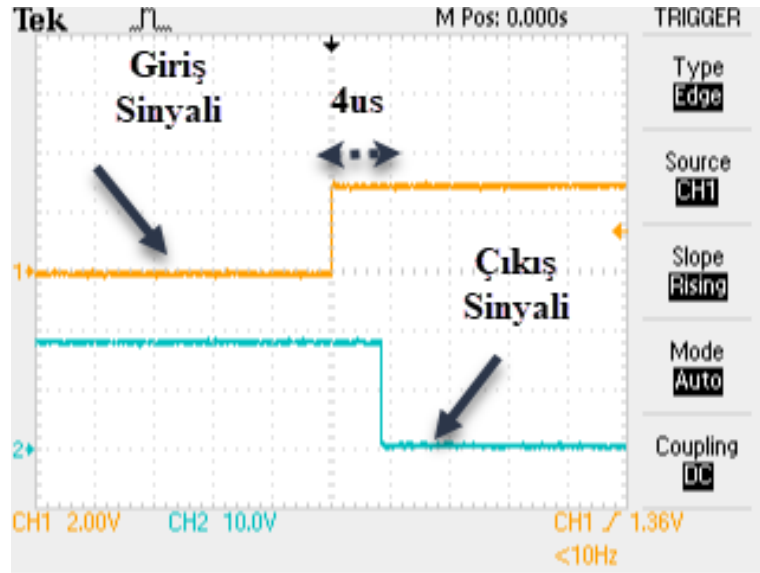


Şekil 5.10: Sürücüyü ait ölü zaman ve alarm kontrol devresi

IPM bloklar, anahtarlama elemanları ile anahtarların sürülmesi için gerekli olan akım ihtiyacını karşılayan ön-sürücü (pre-driver) entegresini içerir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda sıkça rastlanan anahtarlama hatalarından kaynaklanan kısa devre, düşük gerilim ve aşırı sıcaklık hatalarının tespiti bu modül üzerinde yer alan hata sinyali ile gerçekleştirilir. Tasarımı yapılan evirici üzerindeki mikrodenetleyici IPM bloktan gelen sinyalleri işleyerek hata anında koruma moduna girer. Ancak, bu hata sinyalinin işlenmesi için özel sinyal tutma ve kilitleme devresi de analog olarak tasarlanmıştır. Zira, IPM modül hata durumunda çok kısa süreli hata sinyali üretmekte ve arkasında hatanın düzeltilmesini beklemeden yeniden sürüş moduna geçmektedir. Tasarlanan bu devreyle birlikte gerekli güvenlik önlemleri alındıktan sonra işlemci tarafından normal sürüş moduna geçilebilir. Prototipi üretilen ölü zaman kartı ve giriş sinyali ile çıkış sinyalinin gösterimi Şekil 5.11’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.11: Sürücüye ait ölü zaman devresi ve sinyal çıkışı a) Prototip devre, b) Sinyal görüntüsü

## 5.5 Kullanıcı Paneli

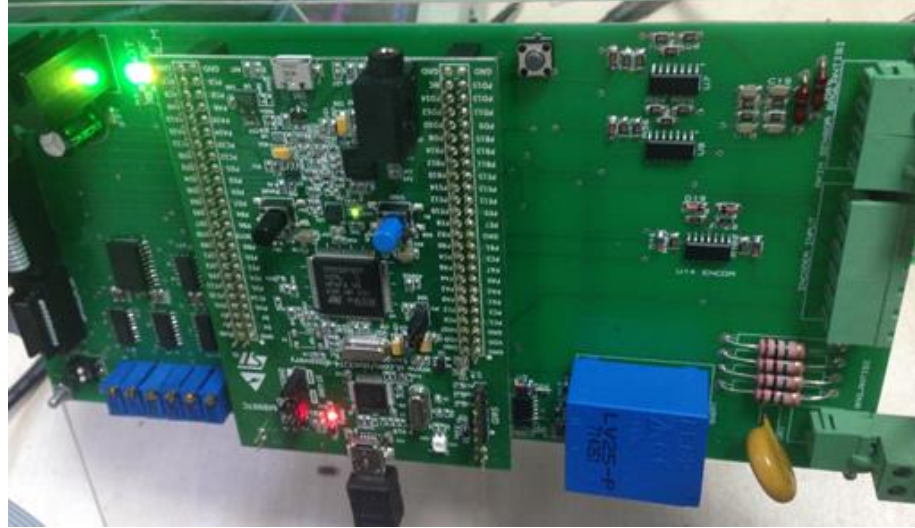
Tasarımı yapılan sürücü üzerinde parametrelerin kullanıcı tarafından giriş yapılabilmesi için LCD panel ve butonlar bulunmaktadır. Sürüş testlerinin gerçekleştirilmesi aşamasında referans frekans bilgisi için bu panel üzerinden giriş yapılır. Motorun sürüşe başlaması ve durdurulması bu butonlar ile gerçekleştirilir (Şekil 5.12). Sürüş esnasında uygulanan frekans, motor hızı, gerilim, akım ve yön bilgisi LCD panelden takip edilebilmektedir.



Şekil 5.12: Sürücü kullanıcı arayüzü prototipi

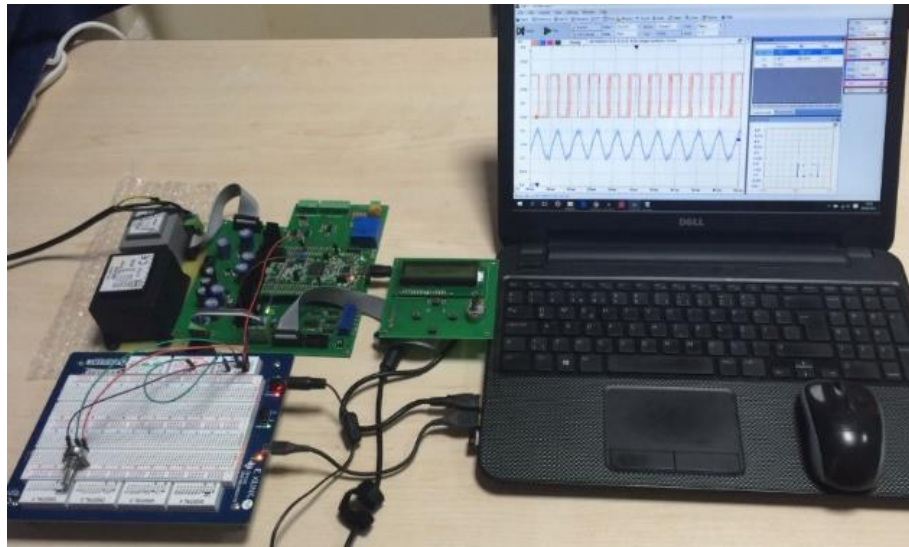
## 5.6 Mikrodenetleyici

Tasarımı yapılan motorda farklı kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için uygun işlemci seçimi yapılmıştır. Açık çevrim kontrol olarak kullanılan SPWM metodunda yüksek hızlı işlemciye gerek yoktur. Ancak alan yönlendirmeli veya moment kontrolü gibi yöntemlerin kullanılması durumunda sensör bilgilerin okunarak işlenmesi ve kontrol sinyallerin elde edilmesi oldukça fazla zaman alır. Bu nedenle çok amaçlı bir sürücü tasarımına yönelik yüksek hızlı ve düşük maliyetli ARM tipi mikro denetleyici bu proje için seçilmiştir. Kullanılan ARM çekirdeğine sahip mikrodenetleyici STM firmasının STM32F407VGT6 isimli ürünüdür. Bu mikro denetleyici 32 bit işlem kabiliyeti, 168 MHz işlemci hızı, 12 bit ADC çözünürlüğü, DSP desteği ve SPI, I2C, USART ve CAN gibi sıkça kullanılan haberleşme protokollerini tek bir çekirdekte topladığı için sürücü devreye eklenmiştir.

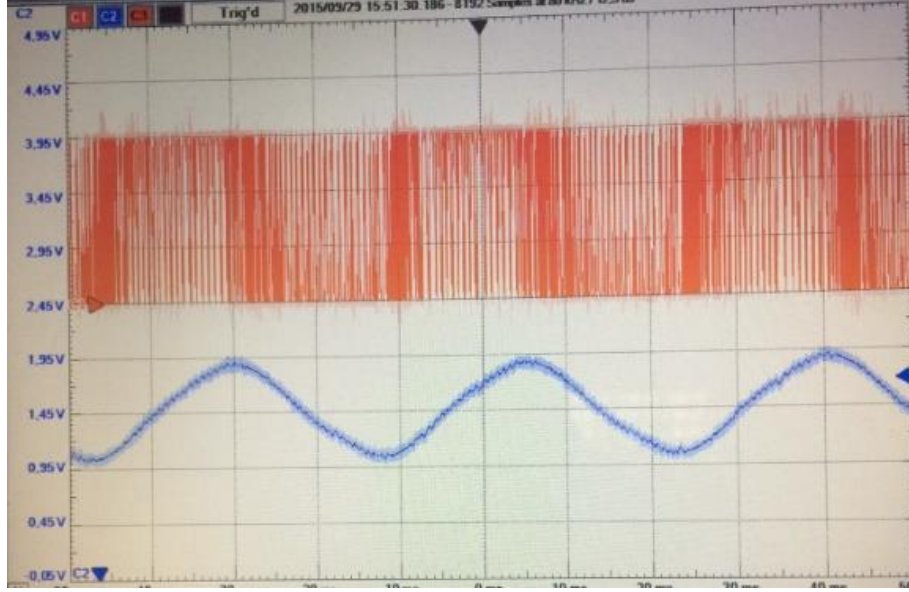


Şekil 5.13: Mikrodenetleyicinin devre kartı üzerinde gösterimi

Şekil 5.13'te evirici tasarımı ile mikroişlemci kitinin yerleşimi gösterilmiştir. Mikrodenetleyicide anahtarların sürülmesi için üretilen PWM sinyalleri, Electronic Explorer kiti kullanılarak gözlenmiş ve test edilmiş olup sonuçları Şekil 5.14'te verilmiştir.



(a)

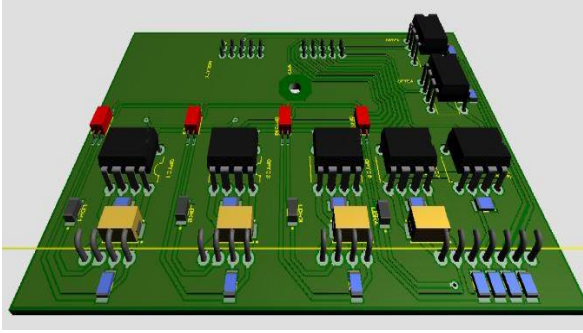


(b)

Şekil 5.14: Mikrodenetleyicinin devre kartı üzerinde gösterimi (a) Deney ortamı, (b) PWM sinyali

## 5.7 Sürücü Prototipinin İmalatı

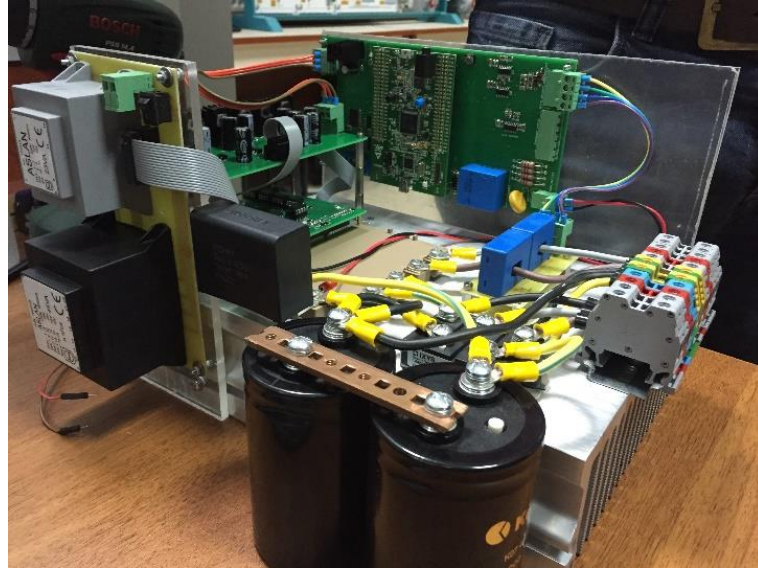
Tüm tasarımları ve imalatı tamamlanan motor için sürücü imal edilmiştir. İmalatı tamamlanan eviriciye ait örnek resimler Şekil 5.15'te verilmiştir. Proteus yazılımı kullanılarak devre çizimleri baskı devre çizimlerine aktarılmıştır. Bu yazılım sayesinde 3 boyutlu devre görüntülerini de elde etmek mümkündür. 3 boyutlu modellemeye örnek olarak Şekil 5.15 (a)'da IGBT sürme devresi görülmektedir. Güç elemanları üzerinde kayıplardan dolayı meydana gelen sıcaklık artışını düşürmek için soğutucu kullanılmıştır. Şekil (c) de şekil (d)'de motor sürücünün tüm bileşenleriyle imal edilmiş prototipi görülmektedir. Tasarlanan sürücü sistemi üzerinden denetimli sürüş sağlanmıştır.



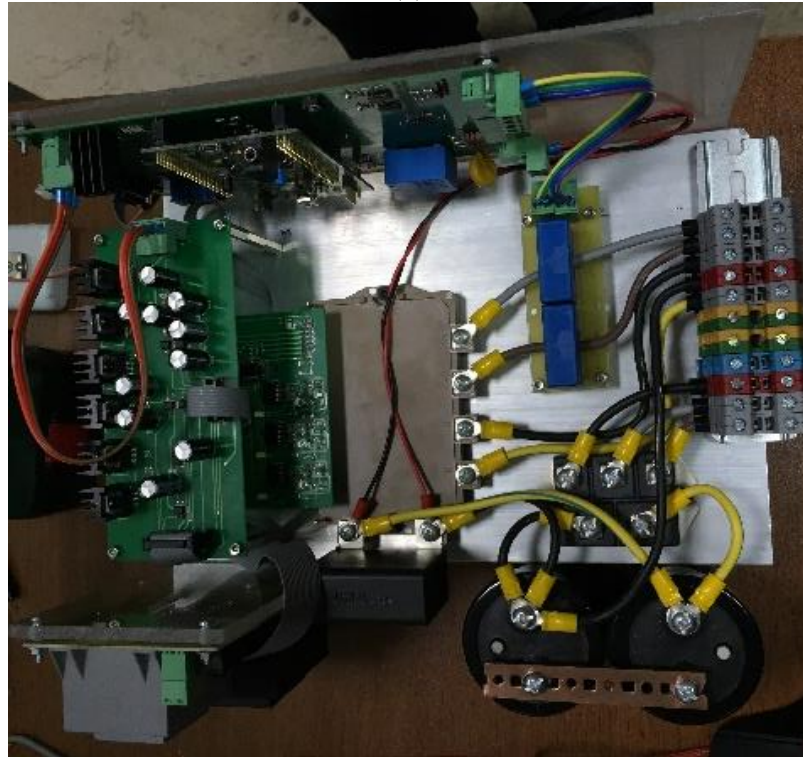
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.15: Evirici/Sürücü prototipi a) IGBT sürücü 3d modeli, b) kullanıcı arayüzü, c) Sürücünün yandan görünüşü, d) Sürücünün üstten görünüşü

## 6. DENETLEYİCİ TASARIMI

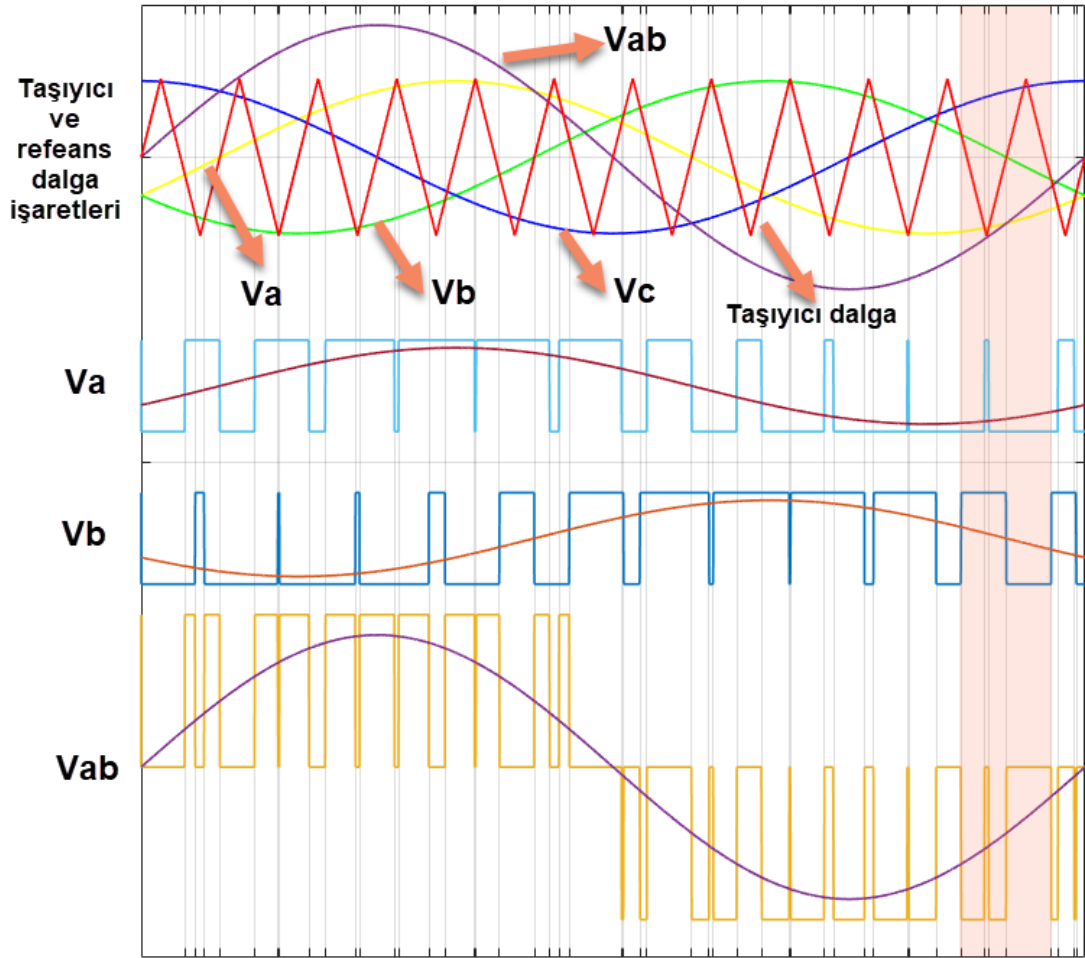
Bu çalışmada elektrikli araçlarda değişken hızları elde etmek için gerilim kaynaklı evirici tasarlanarak motorun kontrolü gerçekleştirilmiştir. Literatürde, motorun durağan haldeki gerilim, akım ve akı parametrelerinin zamanla değişmeyen büyüklüklerini kullanarak skalar kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Performansı düşük olsa da uygulanabilirliği kolay bu yöntemle çıkış gerilimi ve çıkış frekansı kontrol edilebilmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte motor değişkenleri anlık olarak izlenebilmektedir. Diğer taraftan; gerilim, akım ve akı değişkenlerinin anlık değerleriyle motorun kontrolünün sağlanabilmesi vektör kontrol yöntemlerine ilgiyi arttırmıştır. Anlık olarak elde edilen bilgiler doğrultusunda motora uygulanması gereken gerilim vektörleri belirlenerek buna uygun uzay vektör PWM işaretleri üretilir ve yüksek performanslı sürüş kontrolü yapılır. En sık kullanılan vektör kontrol yöntemleri doğrudan moment kontrolü (DMK, DTC) ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK, FOC) yöntemleridir.

### 6.1 Skalar Kontrol Yöntemleri

DRKSM'un hızı motora uygulanan temel frekans ile doğru orantılıdır. Gerilim ve frekans oranı kontrol edilerek hava aralığındaki akı sabit tutulur ve sabit moment (ki bu istenen referans momente uygun olan moment) altında motorun yol olarak istenilen hıza ulaşması sağlanır. Bu kontrol yönteminde kontrolör tarafından üretilen değişken genişlikli kare dalga sinyalleri olarak bilinen PWM sinyalleri anahtar elemanlarının sürücülerine uygulanır (Şekil 6.1). Böylece açık çevrim moment-hız kontrolü yapılır.

Motorun nominal çalışma değerlerinde gerilim/frekans oranı belirlenerek bir kısıtlama gerektiren bu yöntem, düşük hızlarda stator sargılarına düşen gerilim nedeniyle dezavantajlıdır. Bu problemin üstesinden gelmek için gerilimin başlangıç noktası arttırılır. Bir diğer ifadeyle değişken oranlı arttıran gerilim uygulanması ile bu sorunun üstesinden gelinir. Aynı zamanda, başlangıç için gereken momentin kontrollü olarak elde edilmesi sağlanır.





Şekil 6.1: Sinüs Darbe Genişlik Modülasyonu

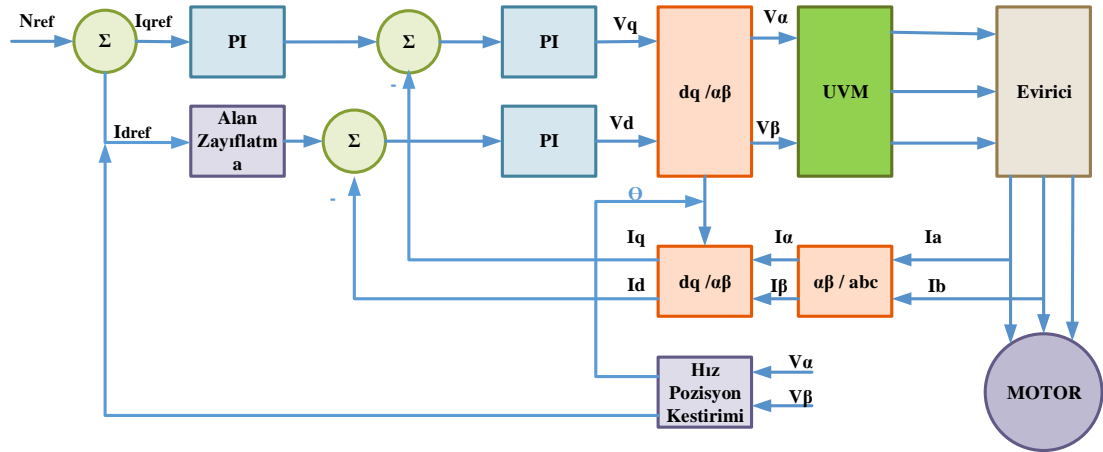
## 6.2 Vektör Tabanlı Kontrol Yöntemleri

Vektör tabanlı kontrol yöntemlerinde en yaygın kullanılan yöntemler DMK ve AYK'dır. DMK yöntemi kullanılarak yapılan kontrollerde motorun moment ve mıknatıslanma akısı birlikte denetlenirken AYK yönteminde, akı denetimi için akımın (akım uzay vektörünün) d-eksenindeki bileşeni ve moment denetimi için q-eksenindeki bileşeni ayrı ayrı denetlenir. Elektrikli araçlarda, değişken DA gerilim altında hareketin başlangıç anında yüksek moment ve yüksek hızlarda hız kontrolü doğruluğu gereklidir. Elektrikli araçlar için ASM ve gerilim kaynaklı evirici ile yapılan çalışmada DMK, AYK ve Uzay Vektör Tabanlı Doğrudan Moment Kontrolü (UVDMK) yöntemleri benzetim ortamında karşılaştırılmıştır. DMK yöntemlerinin AYK'ya göre moment cevabının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Vektör tabanlı doğrudan moment kontrolünün de klasik moment kontrolüne göre daha az akım

bozulması ve daha az moment dalgalanması bakımından üstün olduğu tespit edilmiştir. Fakat vektör tabanlı moment kontrolünün karmaşık algoritma bakımından uygulanabilirliği güçtür (Vasudevan ve Arumugam 2004). Uygulama yapılan bir çalışmada yüksek işlem hızına sahip FPGA kullanılarak motor kontrolü yapılmıştır (Sahoo ve diğ. 2008). Ancak, daha yüksek performanslı ve DSP destekli işlemcilerin varlığı FPGA kullanımını artık gereksiz kılmıştır.

### 6.2.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol Yöntemi (FOC, AYK)

Motor akımlarından belirlenen akı ve moment parametrelerinin anlık olarak kontrol edilmesiyle AYK yapılır (Şekil 6.2). Üç fazlı motor referans modeli kullanılarak 2 eksenli d-q uzayına dönüşüm yapılır. Stator referans alınarak yapılan dönüşüm modelinde moment denklemi DA motor denklemine benzer olur.

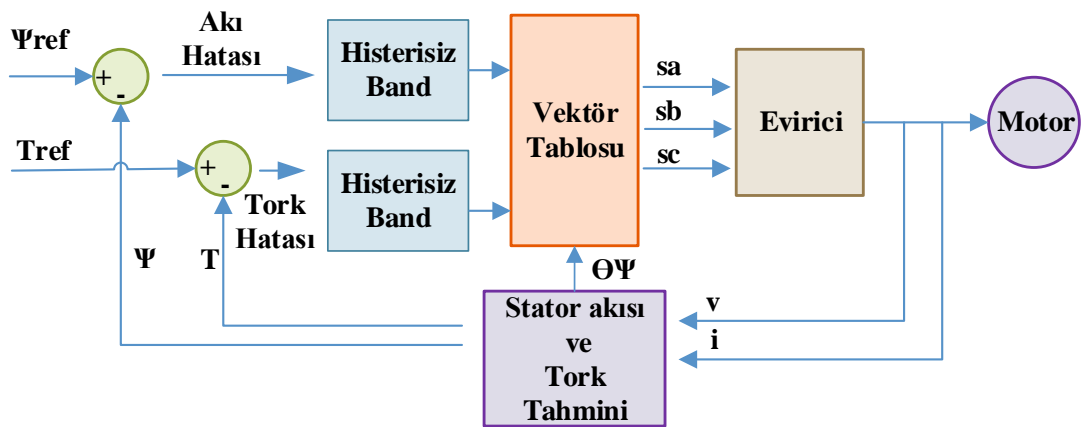


Şekil 6.2: Alan Yönlendirmeli Kontrol Yöntemi

### 6.2.2 Doğrudan Moment Kontrolü

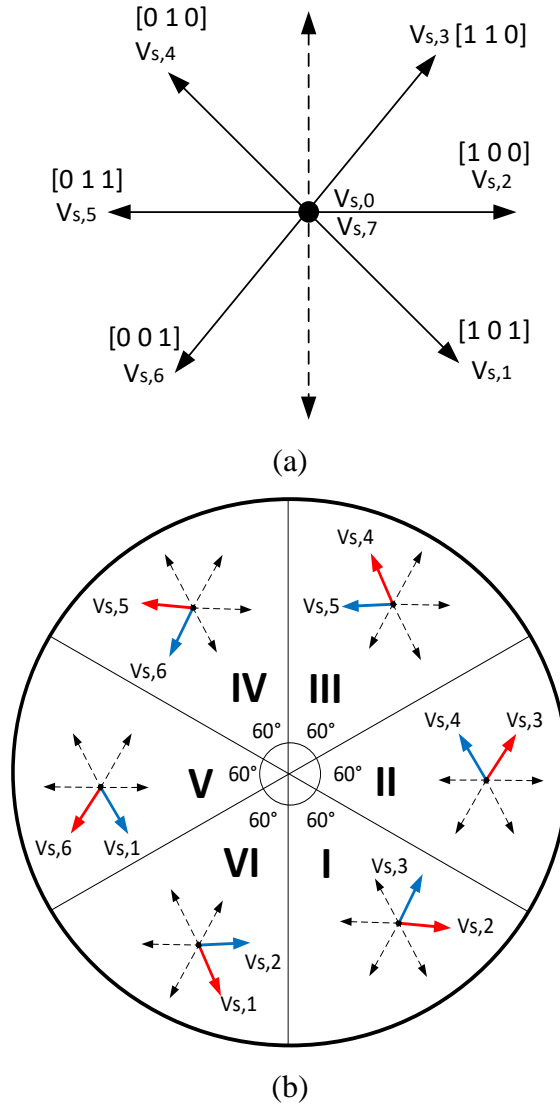
İndüksiyon motorlarda AYK yöntemine alternatif olarak sunulan bu yöntemde daha az işlem ve daha kolay gerçekleştirme sağlanır. Uygun sürüş için moment ve akı birlikte sınırlandırılır. Sağlanması gereken akı, moment veya hız referansına uygun gerilim anahtarlama vektörü; hızlı moment cevabı, düşük anahtarlama frekansı ve olabildiğince az harmonik olacak şekilde önerilen tablodan seçilir. Yapılan çalışmalarda geçici halde en hızlı hızlanma vektörü seçilerek yüksek moment cevabı

elde edilmiştir. Kararlı halde ise sıfır vektörleri kullanılarak düşük frekanslarda momentin sabit kalması sağlanmıştır. Böylece harmonik kayıpları ve gürültü de azaltılmıştır (Takahashi ve Noguchi 1986). Ancak, vektör tabanlı kontrol yöntemlerinin tamamı motor parametrelerinin değişimine oldukça hassastır. Bu nedenle daha gürüz bir denetim için model öngörülü ve uyarlanabilir vektör kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tür iyileştirme yöntemlerinde vektör kontrolün temel mantığına sadık kalınarak, akım ve gerilim ölçümleri sensörler üzerinden kullanılmaktadır. Böylece bir periyot içinde moment ve akı değişimleri hesaplanmaktadır. Bu durumda referans verilen akı ve momenti üretecek gerekli uygun vektörler Uzay Vektör PWM (SVPWM) ile üretilmektedir. Bunun avantajı, moment ve akı bir anahtarlama zamanında iki defa kontrol edilmesinin yanında klasik üçgen kare dalga tabanlı darbe genişlik modülasyonu tekniğine göre hat akımlarındaki dalgalanmalar daha azdır (Habetler ve diğ. 1992). Yazarların bir başka çalışmasında, anahtarlama frekansı sabit tutularak geniş hız aralığında motorun kontrolü sağlanmıştır. Bunu yaparken hız ve rotor direnci kullanılarak düşük hızlarda stator akısının konumunu ve akım ile gerilimlerden akımın büyüklüğü hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan hız sensörü sayesinde geniş hız aralıklarının iyi bir moment kontrolü sağladığı görülmüştür (Habetler ve diğ. 1992). Klasik DMK yöntemine ek olarak anahtarlama frekansına bağlı histerezis bant ekleyerek yapılan kontrol çalışmasında moment cevabının daha iyi olduğu ve moment dalgalanmalarının azaldığı görülmüştür (Mohanty, 2009).



Şekil 6.3: Klasik Doğrudan Moment Kontrolü

Şekil 6.3'te gösterildiği gibi DMK yönteminde motor modeli kullanılarak moment, akı ve rotor hızı parametreleri motor akımlarından tahmin edilir. Motor parametrelerinin belirlenme sıklığı arttıkça motor kontrolü daha yumuşak olur. Fakat motor modelinde kullanılan sabit parametrelerin zamana bağlı olarak sıcaklık gibi değişkenlerden etkilenmesi motor kontrolünü zorlaştırır.



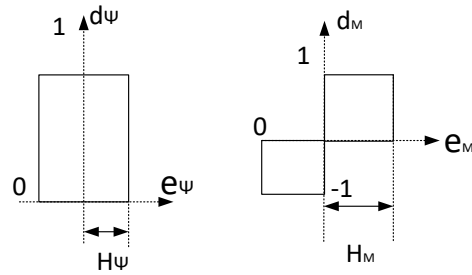
Şekil 6.4: Doğrudan moment kontrolünde a) Gerilim vektör uzayı b) Sektör diyagramı

Tahmin edilen parametreler ile anlık moment ve akı hataları hesaplanır. Hatalar histerezis banttan geçerek açı parametresiyle birlikte en uygun anahtarlama sinyalleri seçilir. Şekil 6.4'te uzak vektörleri ve sektörler üzerinde vektör gösterimi verilmiştir. Bu kapsamda akı k. sektörde yer alıyorsa vektör seçimine göre stator akı ve motor momentini Tablo 6.1'de gösterildiği gibidir.

**Tablo 6.1:** Gerilim vektörlerinin akı konumuna göre akı ve moment üzerindeki etkisi

| Gerilim Vektörü            | Stator Akısı             | Moment       |
|----------------------------|--------------------------|--------------|
| $V_{s,k+1}$ ve $V_{s,k+2}$ | İleri yönde artar        | Artar        |
| $V_{s,0}$ ve $V_{s,7}$     | Zayıflar                 | Azalır       |
| $V_{s,k}$ ve $V_{s,k+3}$   | Hızlı Artar ya da Azalır | Azalır       |
| $V_{s,k-1}$ ve $V_{s,k-2}$ | Ters yönde               | Hızlı Azalır |

Hesaplanan akı ve moment değerinin referans akı ve moment değerlerini hangi sınırlar içinde tutulacağını gösteren histerezis kontrolör Şekil 6.5’de verilmiştir.

**Şekil 6.5:** Akı ve moment histerezis kontrolörleri

Histerezis bandın üretmiş olduğu hata bilgilerine göre her bir sektörde uygulanması gereken en uygun vektör Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 6.2:** Doğrudan moment kontrolü vektör tablosu

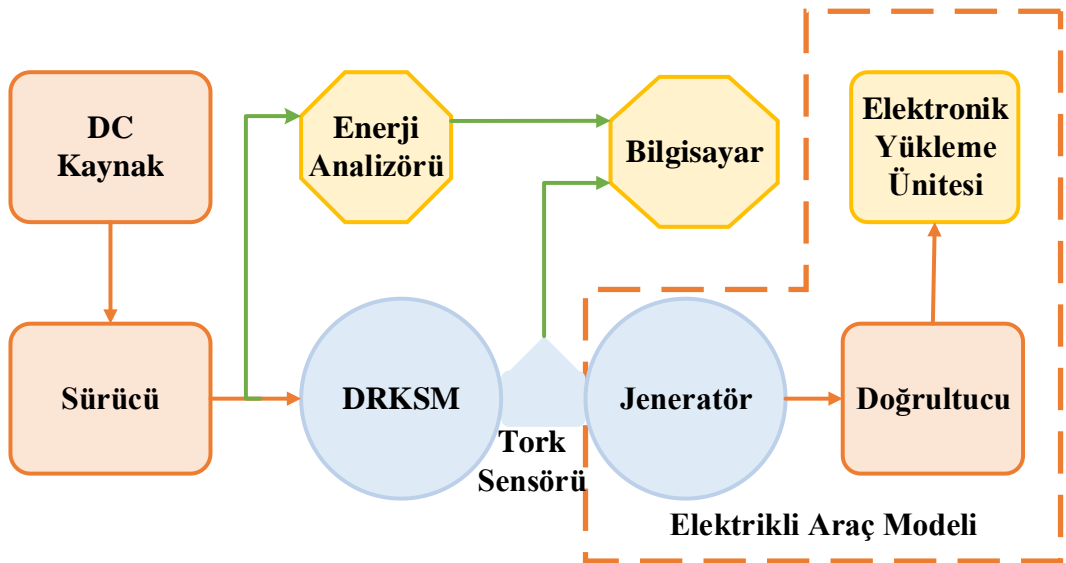
| Akı Hatası | Moment Hatası | Sektör 1  | Sektör 2  | Sektör 3  | Sektör 4  | Sektör 5  | Sektör 6  |
|------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0          | 1             | $V_{s,5}$ | $V_{s,6}$ | $V_{s,1}$ | $V_{s,2}$ | $V_{s,3}$ | $V_{s,4}$ |
|            | 0             | $V_{s,7}$ | $V_{s,0}$ | $V_{s,7}$ | $V_{s,0}$ | $V_{s,7}$ | $V_{s,0}$ |
|            | -1            | $V_{s,3}$ | $V_{s,4}$ | $V_{s,5}$ | $V_{s,6}$ | $V_{s,1}$ | $V_{s,2}$ |
| 1          | 1             | $V_{s,6}$ | $V_{s,1}$ | $V_{s,2}$ | $V_{s,3}$ | $V_{s,4}$ | $V_{s,5}$ |
|            | 0             | $V_{s,0}$ | $V_{s,7}$ | $V_{s,0}$ | $V_{s,7}$ | $V_{s,0}$ | $V_{s,7}$ |
|            | -1            | $V_{s,2}$ | $V_{s,3}$ | $V_{s,4}$ | $V_{s,5}$ | $V_{s,6}$ | $V_{s,1}$ |

Düşük hızlardaki moment ve akı kontrolündeki zorlukları aşmak için literatürde klasik vektör tablosu kullanmak yerine uzay vektör modülasyonu kullanarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bunun sonucunda geçici süreçte moment dalgalanmaları azalmış ve kararlı hal cevabı hızlanmıştır (Kaila ve Jani 2011).

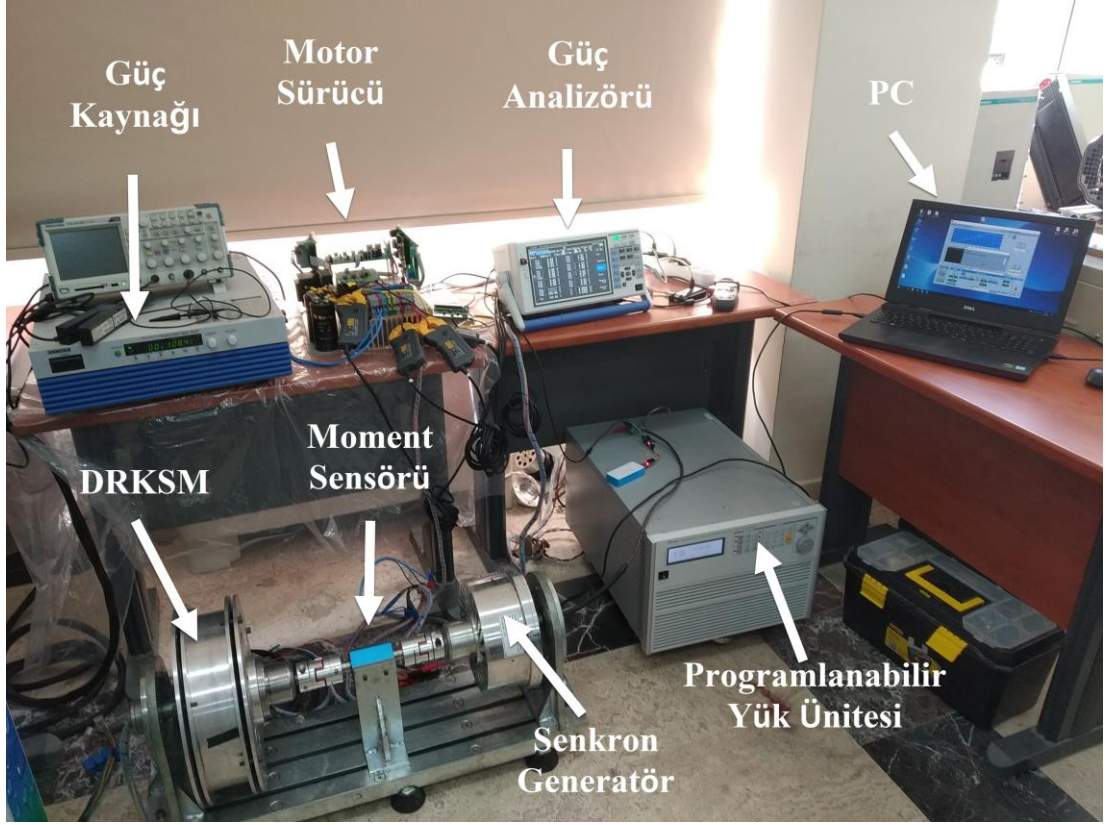
## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 7.1 Test Sisteminin Hazırlanması

Üretimi yapılan motorun dinamik davranışlarını gözlemlemek için Şekil 7.1’de ilkesel modeli verilen deney seti hazırlanmıştır. Prototip motorun DA kaynağı üzerinden beslenen evirici ile “uyarlanabilir V/f- tabanlı açık çevrim hız ve moment denetimi” gerçekleştirilmiştir. Motor miline, elektrikli araçlar için daha önce laboratuvarımızda tasarlanan FDAM bağlanmış olup generatör modunda kullanılmıştır. Ancak, jeneratörün hızına bağlı olarak sabit yükleme yapamayacağı düşünülerek jeneratör çıkışı, programlanabilen elektronik yük ünitesi ile sabit güç programında sürülmüştür. Elektronik yük sayesinde değeri sabit tutulabilen güç, anlık olarak devreye alınabilmekte ya da güç değeri değiştirilebilmekte ya da aniden devreden çıkartılabilmektedir. Ayrıca, yeni model akredite bir güç analizörü ile motor ve yük ünitesinin bütün dinamik değişkenleri gözlenmiştir. Diğer taraftan, jeneratör olarak kullanılan FDAM’nin Hall-etkili sensör çıkışları güç analizörüne aktarıldığından herhangi bir hız algılayıcısı kullanılmasına gerek kalmamıştır. Motorun yüklenme durumunun eş zamanlı olarak gözlenebilmesi için test düzeneğinde motor miline bağlı moment sensörü çıkışları bilgisayar üzerinden gözlenmiş ve elde edilen veriler birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 7.2’de deney seti görseli verilmiştir.



Şekil 7.1: Denetimli sürüş için hazırlanan deney düzeneği ilkesel modeli



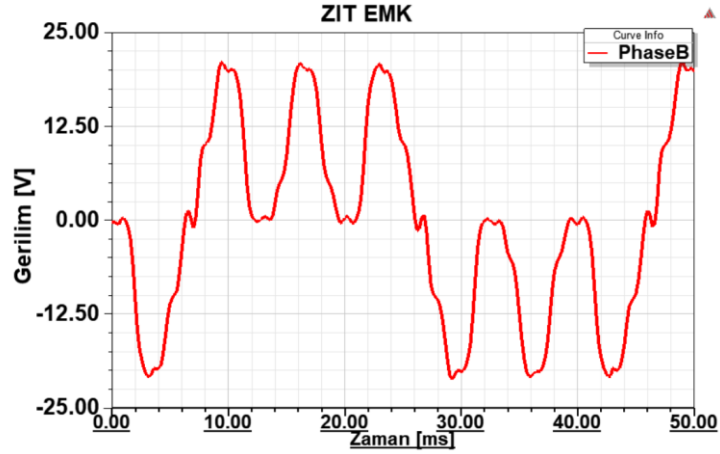
Şekil 7.2: Deney seti

## 7.2 Zıt-EMK Tespiti

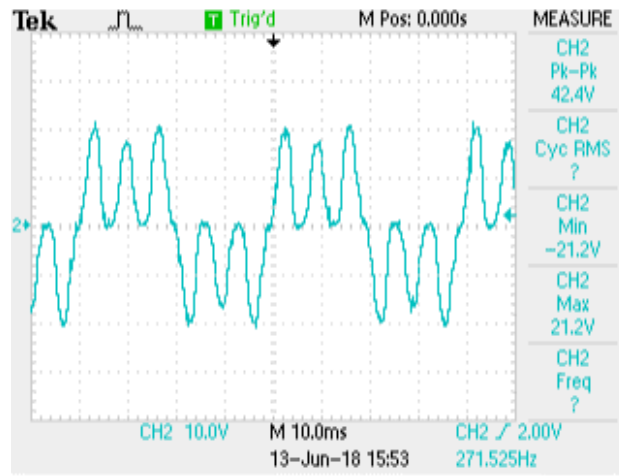
Tasarlanan elektrik motoru milden tahrik edildiğinde diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi generatör olarak çalıştırılabilmektedir. Senkron motora benzer, hız değişimine bağlı olarak gerilimin genliği ve frekansı değişmektedir. Burada, gerilimin genliği ve hız arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır ve Denklem 7.1 verilmiştir. Burada  $k_e$  zıt-EMK sabiti olarak adlandırılır. Bu sabitin tespiti gerilim ve hız değerlerini tespit etmek yeterlidir.

$$k_e = \frac{V_{BEMF}}{\omega_m} \text{ (Zıt EMK sabiti)} \quad (7.1)$$

Üretimi yapılan motorun çeşitli hızlarda sargı üzerinde indüklenen gerilim genlikleri ve Zıt-EMK sabiti Tablo 7.1’de verilmiş olup daha önce tasarım aşamasında elde edilen SEY analiz sonucuyla imalattan sonra elde edilen Zıt EMK deneysel sonucu Şekil 7.3’te kıyaslı olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 7.3:** 380 rpm hızdaki Zıt-EMK değerinin a) SEY analiz sonucu, b) Deneysel sonuç

Benzetim sonuçlarına göre gerilim 22 V maksimum genliğe ulaşırken, deneysel çıktılarda da 21,4 V gerilim genliğine ulaşılmıştır. Zıt EMK sabitinin yaklaşık değeri ise 0,542 olarak ölçülmüştür.

**Tablo 7.1:** DRKSM'nin çeşitli hızlardaki Zıt-EMK değerleri

| Devir (rpm) | Gerilim (V) | Zıt EMK sabiti (ke) |
|-------------|-------------|---------------------|
| 128,50      | 7,60        | 0,565               |
| 251,60      | 14,20       | 0,539               |
| 380,00      | 21,20       | 0,533               |
| 502,17      | 28,78       | 0,547               |
| 628,17      | 35,53       | 0,540               |
| 722,67      | 40,60       | 0,536               |
| 750,00      | 42,06       | 0,536               |

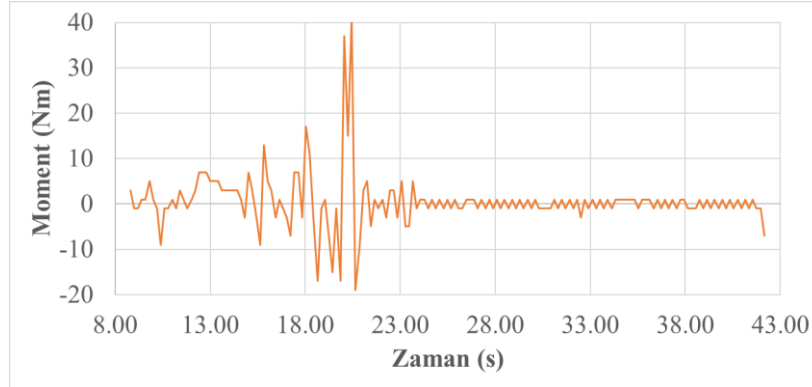


### 7.3 Doğrudan Sürüş Testi

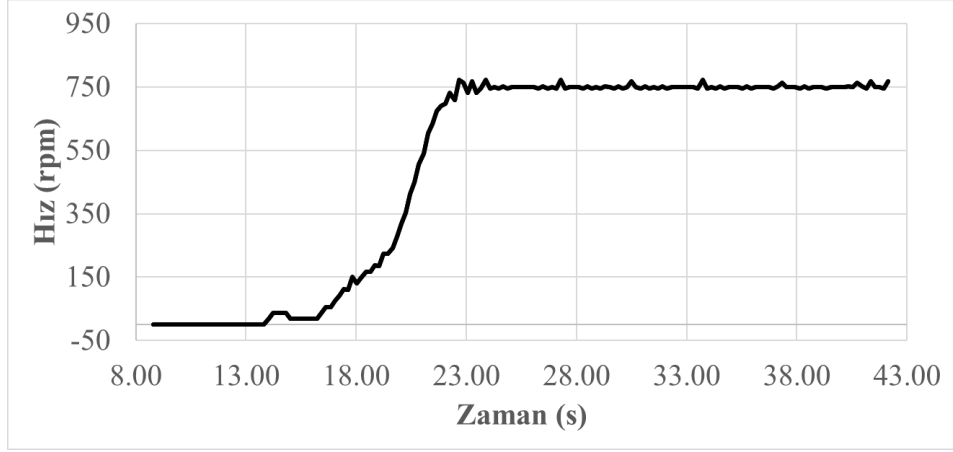
DRKSM için yapılan benzetim çalışmalarına uygun olarak; yüksüz yol alma ve yüklü çalışmadaki davranışlarını gözlemlemek üzere doğrudan sürüş testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler ile motorun yardımsız-sürücüsüz doğrudan şebeke bağlantılı yola alabilmesi, senkron hıza ulaşması, senkron hızda iken yüklenme kabiliyeti ve aşırı yük altında iken asenkron çalışma etkisi incelenmiştir.

#### 7.3.1 Boşta Çalışma

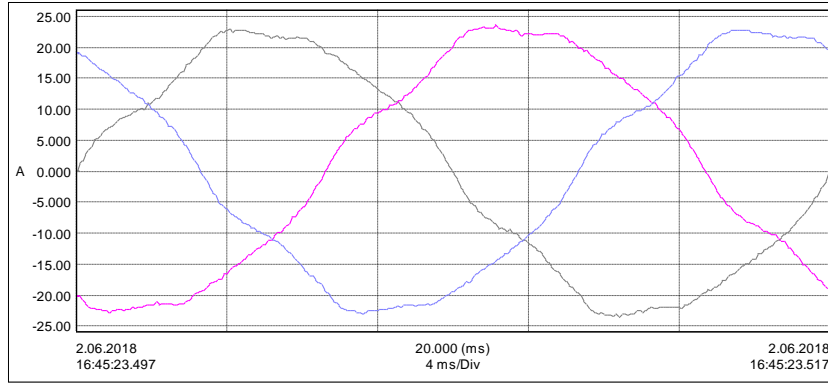
Prototip motor için doğrudan yol vermeli motor davranışları analitik model çözümü, Matlab/Simulink benzetimi ve SEY analizi ile ortaya konulmuştur. Elde edilen bütün sonuçlar birbirini desteklemektedir. Motor prototip imalatı yapıldıktan sonra, daha önce elde edilen benzetim ve analiz model sonuçlarının deneysel olarak da doğrulanmak amacıyla motorun boşta ve yük altında testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da verilmiştir. Deneysel sonuçların örnek olarak SEY analiz sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapıldığında tasarım için yapılan benzetim modellerine en yakın gerçekleştiriminin yapıldığı görülmektedir.



Şekil 7.4: Boşta çalışmada indüklenen momentin değişimi  
(a)



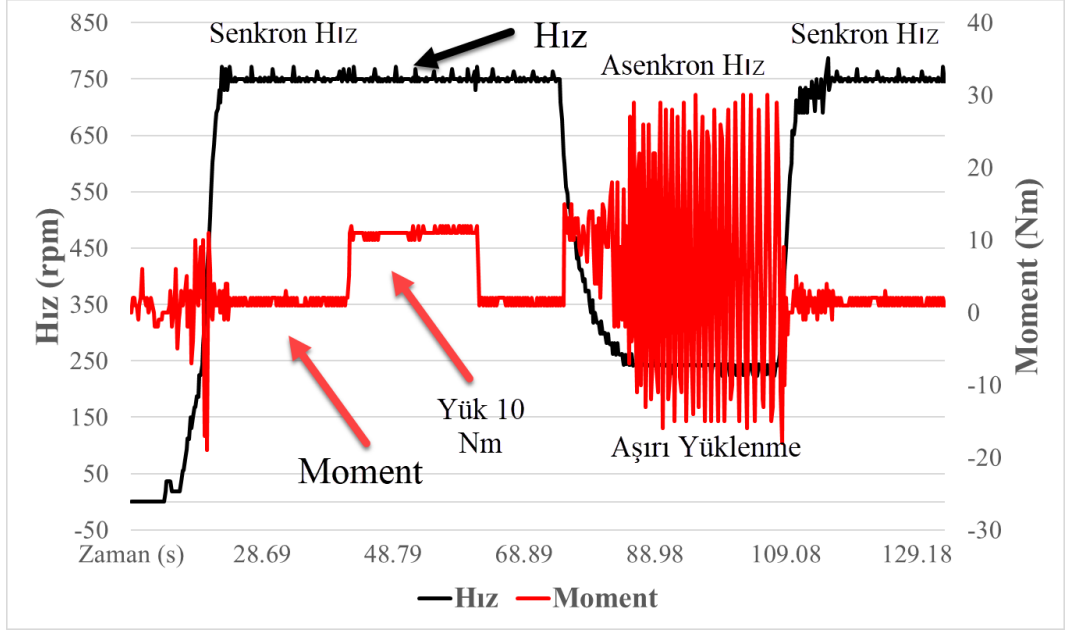
Şekil 7.5: Boşta çalışmada yol alma durumundaki hız değişimi



Şekil 7.6: Boşta çalışmada stator faz akımı değişimi

### 7.3.2 Yükte Çalışma

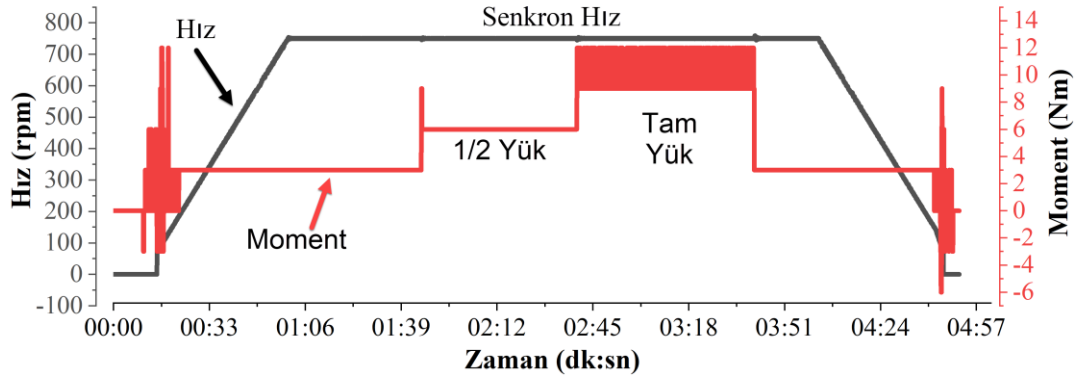
Tasarım parametrelerine göre prototipi yapılan DRKSM'nin yük altındaki davranışını incelemek üzere motorun taşıyabileceği nominal moment ve bu momentin üzerinde hangi yük değerlerinde kopma gerçekleşeceği deneysel olarak test edilmiştir. Senkron motorlar için daha düşük olan kopma yüküne göre karma motorun asenkron davranışı kopma yükünü daha da ileriye taşımış ve asenkron tip devrilme momentine kadar dayanım göstermiştir (Şekil 7.7). SEY sonuçları ile benzer olarak senkron bölgede 7 rpm hız salınımı tespit edilmiştir. 10 Nm yük uygulandığında 750 rpm hızı devam ettirmektedir. Sayısal analizde de 15 Nm yük altında motor asenkron bölgede çalışmaktadır. Yüksüz duruma geçtiğinde tekrar nominal hızına dönerek toparlanmaktadır.



Şekil 7.7: Yük altında motor davranışı, moment ve hız değişimi

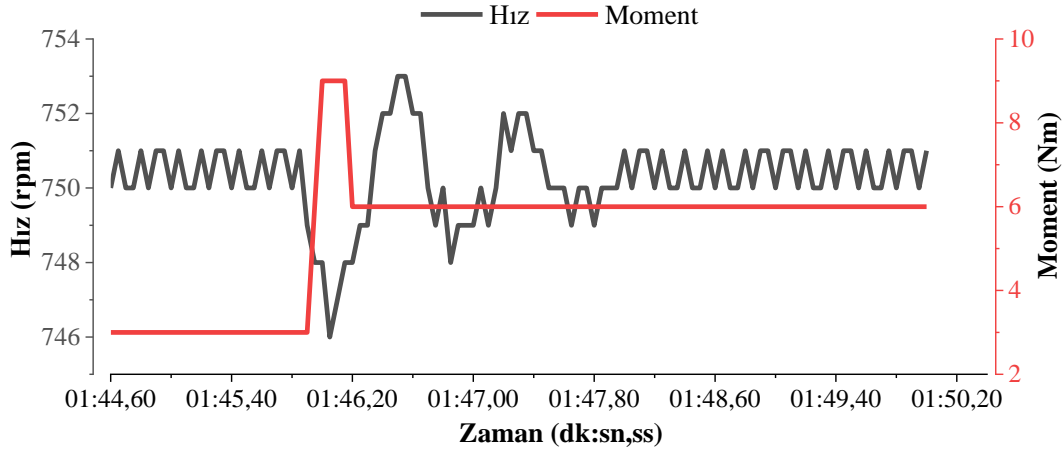
#### 7.4 Değişken Yük Altında V/f-tabanlı Sürüş Testi

Tasarımı yapılan sürücü ile dıştan rotorlu karma prototip motorun sürüşü gerçekleştirilerek yük altında motorun davranışı incelenmiştir. Şekil 7.8'de sabit oranlı V/f kontrollü sürüşte motorun 750 rpm senkron hıza oldukça doğrusal bir tepkiyle ulaştığı görülmektedir. Yüksüz halde yapılan kalkış sürüşü sonrasında yarım yük ve nominal yük uygulamaları sırasıyla test edilerek motorun ürettiği moment ve hız davranışı gözlenmiştir. Bu çalışma şartlarında üretilen motor momentini yük momentine uyum sağlamış olup motor hızı senkron hızda kararlı kalmıştır. Daha sonra yük ani olarak devreden çıkartıldığında motor hızında uzun süreli ve yüksek değerli bir salınım olmadığı, rotor çubuklarının senkron üstü sürüşe izin vermeyerek tekrar hızı senkron hıza sabitlendiği görülmüştür. Dolayısıyla, motor sürekli olarak senkron hızı takip ettiğinden rotor devresindeki çubukların kayıpları da olmamıştır. Sadece hız değişiminde ve yol alma sırasında devrede olan rotor çubukları senkron hızda devre dışı kaldığından motor verimi asenkron tip motora göre daha iyi olmuş, yüke karşı kopma noktası da daha dayanımlı olarak gerçekleşmiştir.



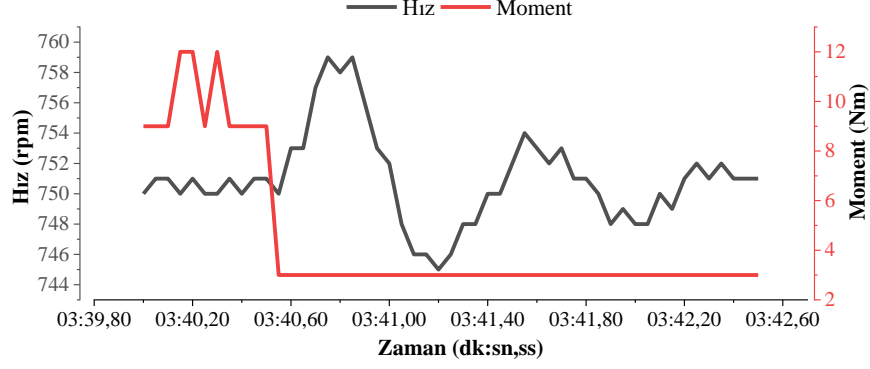
Şekil 7.8: Motorun sürücü ile denetimli kalkışı ve duruşu arasında yüklenme durumları

Şekil 7.9'da motor yükünün aniden  $\frac{1}{2}$  nominal olarak verildiği duruma ilişkin geçici durum analizi deneysel olarak verilmiştir. Yük değişiminde hızın toparlanması oldukça hızlı ve yüksek olmayan salınımla gerçekleşmiştir. Bu deneysel çalışmalarda açık çevrim hız denetimi yapıldığı göz önüne alınırsa sanki kapalı çevrim hız denetimi gibi motorun tepki verdiği görülmektedir.



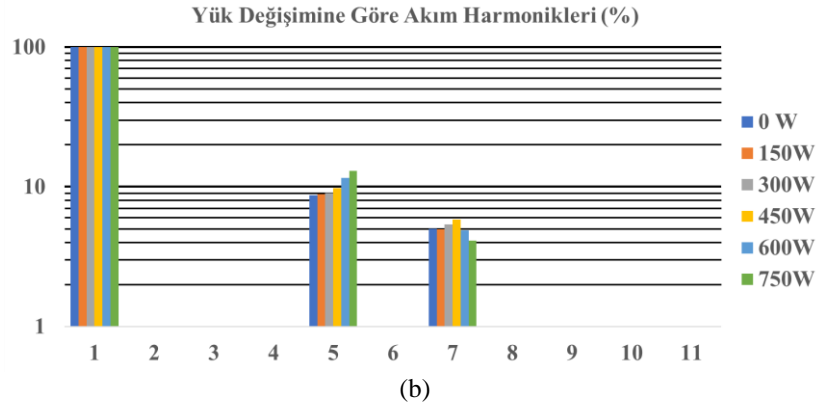
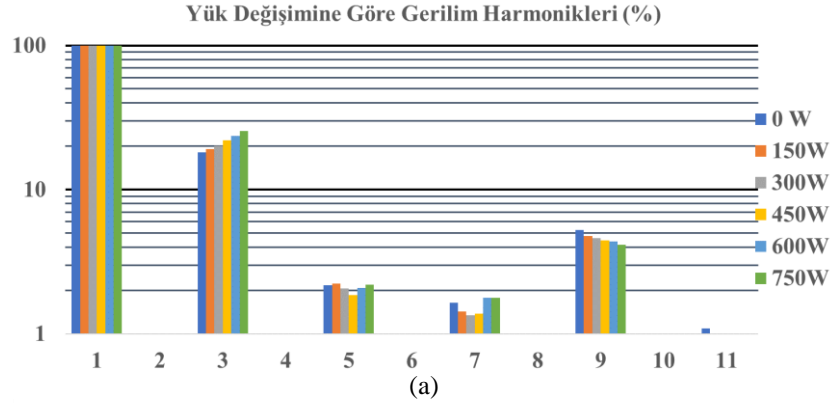
Şekil 7.9: Motorun yükleme anındaki hız moment değişimi

Şekil 7.10'da yükün devreden kaldırılması anında senkron hızın aşılması durumu yine rotor çubukları tarafından kısa sürede telafi edilmiştir. Bu çalışmada hız salınımlarının kısa süreli olduğu ve üretilen momentin kısa sürede mildeki yüke uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu süreç yaklaşık 1 saniye olup salınımlardaki aşım da % 1-2 civarındadır.



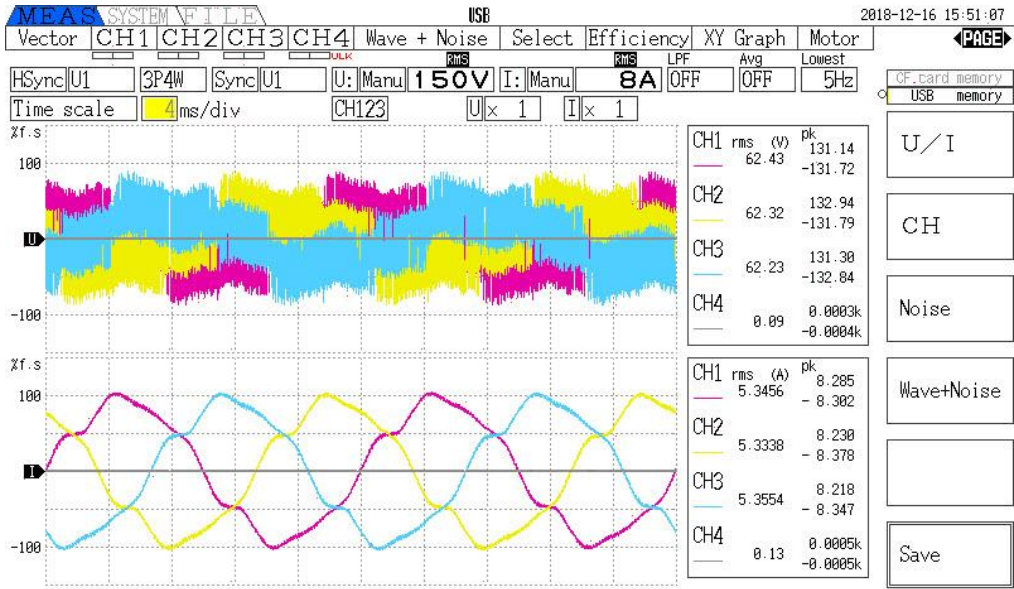
Şekil 7.10: Motorun yüklü duruma geçişi anı için hız moment değişimi

Yapılan test çalışmaları sırasında evirici sürüslü prototip motorun yüklenme anında gerçekleşen akım-gerilim harmonikleri de güç analizörüyle incelenmiştir. Gözlenen gerilim harmonikleri incelendiğinde 3. harmonik bileşeninin daha baskın olduğu Şekil 7.11’de logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Akım harmoniklerinde ise 5. harmonik bileşeni daha etkindir. Ancak, tasarımı gerçekleştirilen eviricinin çıkışında herhangi bir filtre kullanılmadığı göz önüne alınırsa tespit edilen harmonik derecesi ve genliklerinin normal olduğu anlaşılmaktadır. Evirici/sürücü çıkışında kullanılacak filtre reaktör ve kapasitörlerle bile yeterince harmonik kompanzasyon yapılabilmektedir. Burada logaritmik yüzde ölçeğine dikkat edilmelidir.

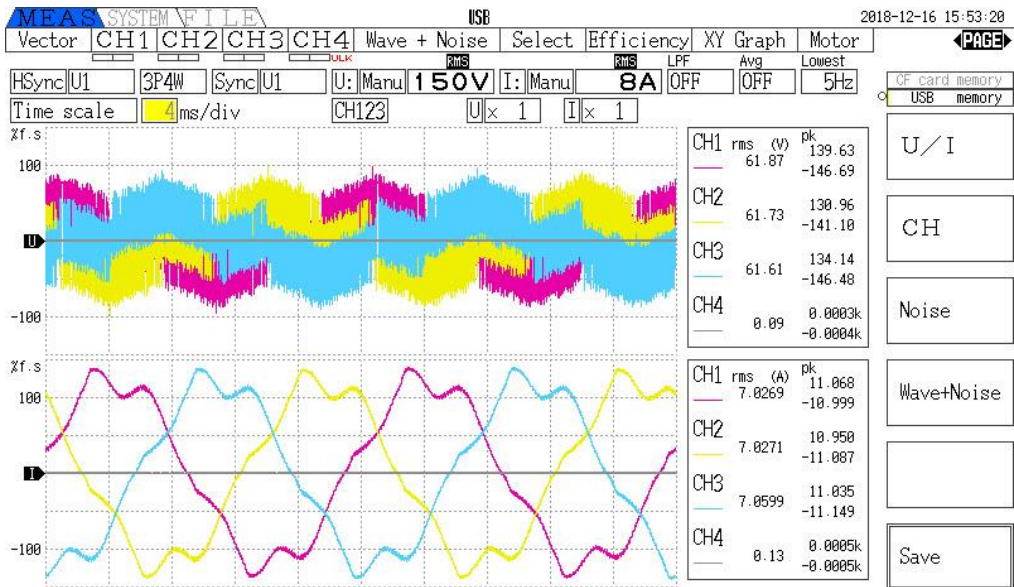


Şekil 7.11: Motorun yüklü durumuna ilişkin harmonik bileşenleri a) Gerilim b) Akım

Motorun boşta ve yük altındaki davranışına ilişkin stator gerilimi ve akım değişimleri Şekil 7.12’de verilmiştir. Özellikle rotor devresindeki mıknatıs-çubuk yerleşim kombinasyonuna bağlı olarak elde edilen zıt EMK gözlemleri doğrultusunda akımdaki harmonik bozunumlar göze çarpmaktadır. Motor sürücüsünün uyguladığı gerilime karşı koyan zıt EMK değişimi, FDAM’deki duruma benzer olarak stator faz akımlarında ve gerilimlerinde etkin rol oynamaktadır.



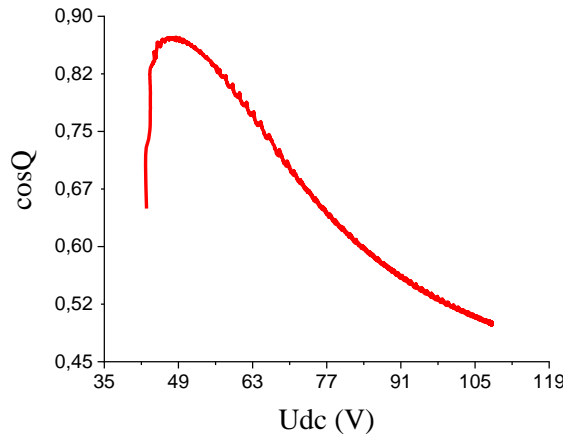
(a)



(b)

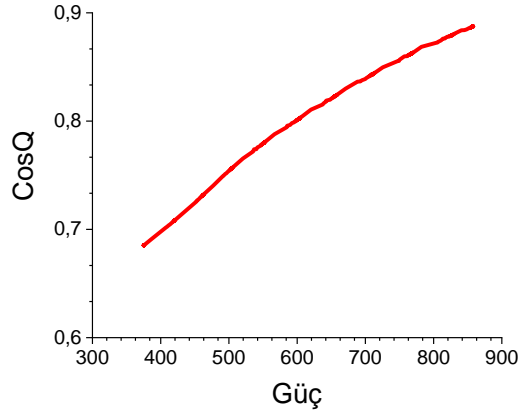
Şekil 7.12: Motorun yüksüz ve yüklü duruma ilişkin stator akımı ve geriliminin değişimi a) Yüksüz durum, b) Tam yüklü durum

Boşta çalışmada güç katsayıları oldukça kötü olan asenkron tip motorlarda, bu duruma büyük kaçak endüktansların ve düzenli olmayan hava aralıklarının sebep olduğu bilinmektedir. Dıştan rotorlu asenkron motorlarda bu durum kendini daha da belirgin göstermektedir. Dıştan rotorlu karma tip motorda da durum bundan çok farklı olmamakla birlikte motorun bir sürücü ile kullanılması durumunda “değişken oranlı uyarlanabilir artıran gerilim ve frekanslı V/f tabanlı kontrol sistemi” ile düşük gerilim yüksek frekans uygulaması ile boşta çalışma güç katsayısının iyileştirilebileceği Şekil 7.11’den görülmektedir. Diğer taraftan, motor yüklendikçe güç katsayısının beklendiği şekilde iyileştiği yapılan testlerin sonucu olarak Şekil 7.12’de gösterilmiştir. Her iki deneysel çalışma birlikte değerlendirildiğinde uyarlanabilir oranlı V/f tabanlı hız denetimi aynı zamanda etkin bir moment ve güç denetimi olarak kendini göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, nominal gerilime yakın bölgelerde güç katsayısı değerinin daha kötü olduğu, yüklendikçe durumun iyileştiği, güç artışı ile birlikte hedeflenen moment de göz önüne alınarak değişken oranlı bir V/f tabanlı bir kontrol sağlanabileceği görülmektedir. Burada, sağlanması gereken güç için ihtiyaç duyulan gerilimin azaltılarak motor akımının aktif bileşeninin artırılması amaçlanmıştır. Böylece, motor yüklendikçe aktif bileşen artarken reaktif bileşen değeri korunarak sistemin güç katsayısının iyileşmesi sağlanmaktadır. Evirici/sürücü besleme gerilimine bağlı olarak güç katsayısı değişimi Şekil 7.13’te gösterilmiştir. Burada, besleme gerilimi olarak kullanılacak olan batarya geriliminin kullanıldıkça azalması göz önüne alındığında güç katsayısının nasıl değişeceği de incelenmiştir. Buna göre, batarya geriliminin düşmesi, talep edilen gücü sağlamak adına daha fazla aktif akım gerektirdiğinden güç katsayısındaki iyileşme tespit edilmiştir.



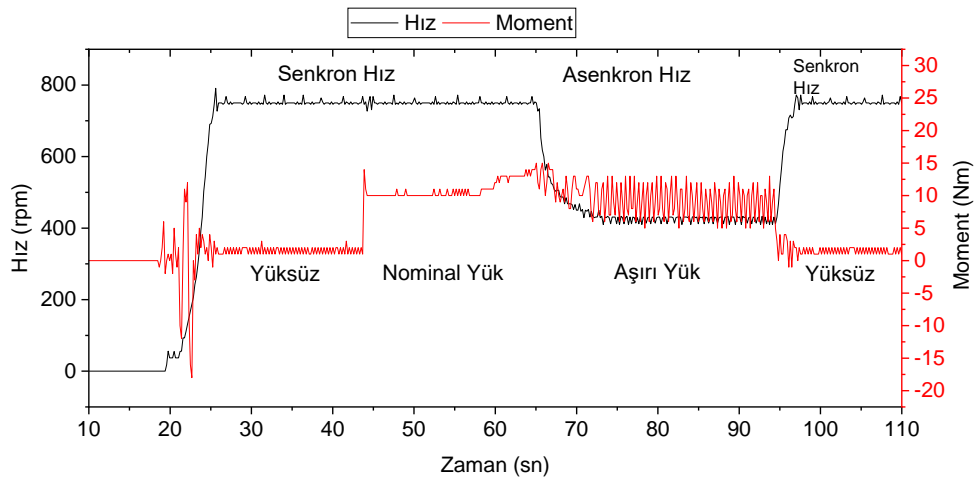
Şekil 7.13: Motor güç katsayısının boşta çalışmada besleme gerilimine göre değişimi

Sabit frekans ve sabit gerilim koşulları altında motorun yüklenmesi ile yapılan deney sonucunda, gücün artışına bağlı olarak güç katsayısının arttığı görülmüştür. Ancak motorun maksimum güçte yüklenebilmesi için yeterli seviyelere ulaşamadığı, mevcut yükleme cihaz kapasitelerinin yeterli olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 7.14).



**Şekil 7.14:** Sabit oranlı V/f ile motor yüklendikçe güç katsayısı değişimi

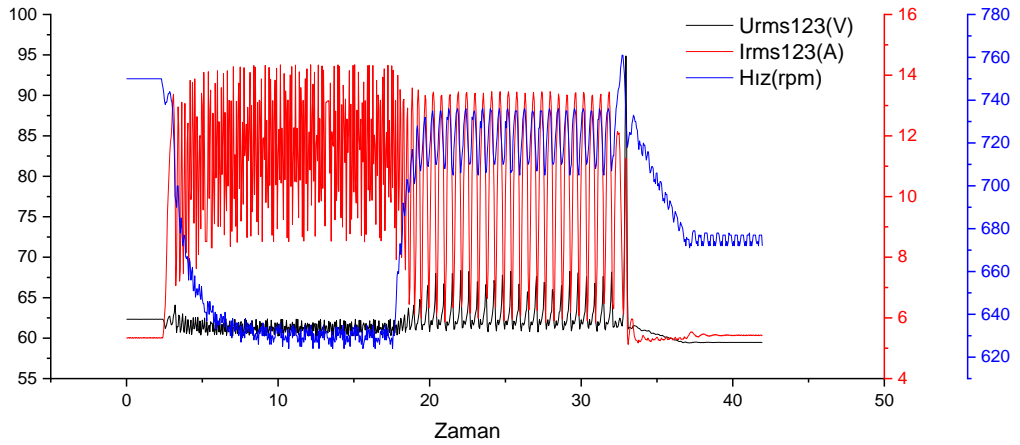
Tezin hedefine uygun olarak, motora yüklenebileceğinden daha fazla yük momenti uygulanması durumunda, motorun kopma yaşamadığı, ayrıca, senkron altı bölgede asenkron sürüşe devam ettiği, yapılan deneysel çalışmada görülmüş olup elde edilen sonuç Şekil 7.15'te verilmiştir. Motor modelinde yer alan kısa devre çubukları senkron hızın altında devreye girerek motorun kopmasını engellemiştir. Aşırı yük (%50 oranında) azaltıldığında motor hızlanarak tekrar senkron hıza ulaşmıştır. Böylece tekrar kayıpsız senkron sürüş moduna geçilmiştir.



**Şekil 7.15:** Motorun aşırı yüklenmesi durumunda hız ve momentin asenkron davranışı



Şekil 7.16’da motorun asenkron durumuna geçiş anında faz akımındaki ani artış ve yüksek frekanslı salınımlar tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulguya göre; asenkron duruma geçiş veya motorun kopma noktasına yakın değerlerde akımların dinamik davranışı algılanarak yeni bir V/f oranına geçmek mümkündür. Böylece, her senkron altı çalışma yeni bir frekans takibi ile her adımda senkron sürüş sağlanacak olduğundan rotor devresi kayıpları olmayacaktır. Aynı zamanda, her hız değişiminde rotor çubukları motorun toparlanmasına destek vermeye devam edecektir.



**Şekil 7.16:** Motorun aşırı yüklenmesi durumundaki asenkron davranışı (Hız/Akım Gerilim)

Tablo 7.2’de, literatürde bugüne kadar çalışılmış ve değerlendirilmesi raporlanmış olan motorlara göre bu tez kapsamında önerilen ve gerçekleştirilen dıştan-rotorlu karma motor için de aynı değerlendirme ölçütleri esas alınarak oluşturulan karşılaştırma puan tablosu verilmiştir. Toplam puanlamada önerilen motorun 3 puan daha iyi olduğu görülmektedir.

**Tablo 7.2:** DRKSM ile geleneksel motorlar ile karşılaştırılması

|                              | <b>ASM</b> | <b>SMSM</b> | <b>FDAM</b> | <b>DRKSM</b> |
|------------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>Verimlilik</b>            | 3          | 5           | 5           | 5            |
| <b>Ağırlık</b>               | 3          | 4           | 5           | 4            |
| <b>Maliyet</b>               | 5          | 4           | 4           | 4            |
| <b>Kontrol edilebilirlik</b> | 5          | 3           | 3           | 5            |
| <b>Moment dalgalanması</b>   | 4          | 5           | 3           | 5            |
| <b>Toplam</b>                | <b>20</b>  | <b>21</b>   | <b>20</b>   | <b>23</b>    |

## 8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere senkron ve asenkron motorların kullanım ve verimli çalışma durumlarını birlikte barındıran, normal şartlar altında senkron, normal dışı şartlarda sistemin sürekliliğini devam ettirmek üzere asenkron motor davranışı gösteren bir elektrik motoru ve onun sürücüsünün sensörsüz açık çevrimli denetleyicisi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tez amacına uygun olarak gerçekleştirilen çalışmada:

- Sürüş sırasında akım, gerilim veya rotor konum sensörü gerektirmeyen,
- Asenkron motorlar gibi kolayca doğrudan yola alabilen,
- Değişken yük momentleri altında nominal yüke kadar senkron hızda rotor bakır kayıpları olmadan sürüşü devam ettirebilen,
- Nominal yük üzerinde sürüldüğünde kopmadan asenkron hız modunda devam edebilen,
- Hızlı toparlanabilen ve sürüş dinamiği daha kolay,
- Araç tekerine gömülü,
- Eksenel boyu kısa, radyal çapı geniş, dolayısıyla teker kısıtlarına uygun bir tasarımda sürüş sırasında ihtiyaç duyulan momenti minimum motor boyutlarında sağlayan,
- Sürüş seyrinde azalan batarya gerilimine karşı güç faktörü gittikçe iyileşen,

dıştan-rotorlu karma tip bir motor tasarlanmış ve sürücüsüyle birlikte imalatı gerçekleştirilmiş olup doğrudan ve denetimli sürüş testleri yapılmıştır. Ayrıca, elektrikli araçlarda kullanılan motorların sensörsüz sürüş dinamiğinde sıkça rastlanan “ilk hareket” sendromu giderilmiştir. Boşta veya yük altında asenkron çalışma özelliklerine dayalı rotor barları desteğinde doğrudan yol alabildiği için fırçasız doğru akım motorları ya da senkron motorlar gibi konum sensörü ya da komut kestirimine dayalı bir sürüş gerektirmediği de yapılan benzetim (SEY, sayısal ve analitik çözüm yaklaşımları, Matlab/Simulink) ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Tez kapsamında, karma bir motorun tasarımı hedeflendiğinden karma rotor içinde kullanılacak mıknatısların yerleşim düzeni, yönlendirme biçimi ve geometrik yapısının etkisi dört farklı karma rotor yapısı üzerinde SEY analizi ile incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada dört farklı rotor tipi için en uygun mıknatıs geometrik yapı ve boyutları tespit edilmiş olup motorun boşa ve yükteki davranışı incelenmiştir. 250 mm rotor iç çapı, 300 mm rotor dış çapı, 40 mm rotor paket boyu olmak üzere 24 slotlu bir rotor yapısında (ki bu boyutlar araç teker kısıtlarına göre belirlenmiştir) stator geometrisi için her bir faz için 4 adet bobin 24 oluk üzerine yerleştirilmiştir. Her bobinin arasında 2 oluk boşluk bulunmaktadır. SEY analiziyle elde edilen sonuçlara göre A tipi, B tipi ve C tipi motor yapılarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Ancak, bu üç tip motorun gösterdiği davranışın çok üzerinde bir performans gösteren D tipi motor bu ölçütlere göre imalatı yapılması gereken motor olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre en düşük hız dalgalanması ve en sürede kararlı hale ulaşan mıknatıs boyutları 20 mm – 2 mm (20/2) olarak tespit edilmiştir.

Prototipinin yapılmasına karar verilen D tipi motor yapısı için; yüksüz durumda 20/2 mm mıknatıslarla tam 750 rpm hız ve 98 ms oturma zamanı elde edilmiş olup toplam 10 rpm (+5, -5) hız salınımı görülmüştür. Ani yüklenmelerde de senkron hızdan kopma olmaksızın 64 ms’de 10 rpm’lik salınımla motor tekrar toparlanmıştır. Tam yük altında yol verme işleminde ise 750 rpm senkron hız, 4-5 rpm hız salınımı, 166 ms oturma zamanı ve 500 ms kararlı hızda tutunma zamanı elde edilmiştir. Denetimsiz yapılan bu sürüş testinde azami hız aşım değeri 25 rpm olarak elde edilmiştir. Denetleyici kullanılmayan doğrudan sürürlü bu çalışmada oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Aşırı (%50 kadar) yüklenmelerde motor davranışın asenkron olarak devam ettiği, nominal yük sınırlarındaki hiçbir yük değişimlerinde, denetim dahi gerektirmeden istenilen momenti sürekli senkron hızda karşılamıştır.

Sürücüyle birlikte yapılan çalışmalarda “değişken oranlı uyarlanabilir başlangıç gerilimli, V/f-tabanlı, açık çevrim hız-moment denetim algoritması” sürücü içine gömülü olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, elektrikli araç kullanıcısının ayak gaz pedalına bağlı, araç sürüşünü her adımda sürekli senkron hıza kilitlenen kayıpsız bir sürüş dinamiği elde edilmiştir. Bu çalışmada, asenkron duruma geçiş veya motorun kopma noktasına yakın değerlerde akımların dinamik davranışı algılanarak yeni bir V/f oranına geçmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Böylece, her senkron altı

çalışma yeni bir frekans takibi ile her adımda senkron sürüş sağlanarak rotor devresi kayıpları da ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda, set edilen her senkron hız değerinin değişiminde rotor çubukları motorun toparlanmasına destek vermeye devam ederek sürekli ve kopmasız bir sürüş sağlamıştır. Tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen prototip motorun; ASM kadar kolay sürülebilen ve yük değişimlerinde asenkron destekli bir toparlanmaya bağlı olarak sabit hızda kendini tutabilen bir davranış sergilediği benzetim ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Azami 5 saniyede yük altında yol aldığı, nominal yük momenti 10 Nm olduğu, 15 Nm civarında yani %50 aşırı yük altında 750 rpm'lik senkron hızdan koptuğu, ancak 450 rpm en düşük asenkron hızda tutunabildiği görülmüştür. Nominal yük altında 750 rpm senkron hızda verimi önemli ölçüde etkileyecek bir rotor kaybı olmadığı, senkron hızda binde sekiz (%0,8) hız salınımla sürüşü devam ettirdiği gözlenmiştir. Aynı çalışmanın sürücü olmadan doğrudan sürüş yapılması durumunda en düşük hız 250 rpm olarak gerçekleşirken moment salınımı kararsızlık göstermiştir. Denetimli sürüşte, elektrikli araç içinde bu motorun mutlaka sürücü ile çalıştırılması zorunlu olduğu göz önüne alınırsa %50 oranlı aşırı yüklenmede en düşük asenkron hız 450 rpm ve en yüksek moment salınımı 5 Nm olarak elde edilmiştir. Bu da motordan istenen aşırı yüklenme durumunu karşılamaktadır. Aynı zamanda aşırı moment talebini sabit güç altında sürdürebilmektedir. Ancak, senkron hızda 750 W talebini karşılarken aşırı moment talebinde 450 rpm asenkron hız için 700 W çıkış gücü üretebilmiştir. Bu da yaklaşık 50 W'lık rotor bakır kayıplarının olduğu anlamına gelmektedir.

Yapılan diğer bir çalışmada, motor besleme gerilimi olarak kullanılacak olan batarya geriliminin kullanıldıkça azalması göz önüne alınmıştır. Bu şartlarda güç katsayısının nasıl değişeceği de incelenmiştir. Literatürde, diğer tip motorlar üzerinde yapılan çalışmalarda (ki bu durum tezin Giriş bölümünde ayrıntılı verilmiştir) düşük uygulama gerilimlerinde veya düşük güç tüketiminde sistemin güç faktörünün oldukça kötü olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte bu test kapsamında tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen motor üzerinde yapılan çalışmada, uygulama geriliminin düşmesi (sürüş boyunca batarya geriliminin azalması) durumunda sistem güç faktörünün gittikçe iyileştiği görülmüştür. 105 Volt'luk başlangıç batarya geriliminin 50 Volt'a düşmesi durumunda sistem güç katsayısındaki iyileşme yaklaşık %60 olarak tespit edilmiştir. Bunda en önemli etkenin, elektromekanik güç dönüşümünde gerekli olan reaktif akım desteğinin büyük bölümüne, mıknatıslardan dolayı, ihtiyaç

duyulmamasıdır. Ancak tez kapsamında gerçekleştirilen bu deneylerde motorun sabit güç altında sürüş testi yapılmıştır. Yani, her durumda besleme gerilimi nasıl değişirse değişsin ihtiyaç duyulan güç, denetimli sürücü sayesinde elektrikli araca sağlanmıştır. Bundan dolayı, besleme gerilimi düşerken sabit güç talebini karşılamak üzere reaktif akım sabit kalırken aktif akım bileşeni artmaktadır. Yani güç faktörü gittikçe iyileşmektedir.

Motor sürüş dinamiği ve rotor-stator yapısına bağlı olarak meydana gelen akım-gerilim harmonik bozunumları (THD) incelendiğinde; yüksüz durumdan tam yük (750 Watt) durumuna kadar kademeli olarak 150 W'lık artışlarla yapılan yükleme testinde akımın 3'üncü harmonik bileşenin hiç oluşmadığı, 5'inci harmonik bileşenin %10'un altında kaldığı, 7'inci harmonik bileşenin ise %5'in altında kaldığı görülmüştür. Yapılan testlerde tez kapsamında gerçekleştirilen sürücü kullanıldığı ve hiçbir filtre uygulanmadığı göz önüne alınırsa akım harmoniklerinin özellikle toplam harmonik bozunum (THD) değerinin %5'in altında olması oldukça önemlidir. Diğer taraftan sürücü çıkış terminalindeki motor uygulama gerilimi (faz-faz arası) için aynı deney şartlarında 3'üncü harmonik bileşen %20'lerde, 5'inci ve 7'inci harmonik bileşen %1'in altında ve 9'uncu harmonik bileşen %4'ün altında kalmıştır. Buna göre sürücü terminaline mutlaka 3'üncü harmonik bileşen bastırma filtresinin kullanılması gerektiği görülmüştür. Aksi halde gerilim için izin verilen THD değeri %3'ün üzerinde olacaktır. Bununla birlikte gerilim harmoniğinde tehlikeli olarak görünen daha yüksek frekanslı 5'inci bileşen %1 civarındadır. Motor sürücüsünün uyguladığı gerilime karşı koyan zıt EMK değişimi, FDAM'daki duruma benzer olarak stator faz akımlarında ve gerilimlerinde etkin rol oynamaktadır. Bu nedenle gerilim harmoniklerinin de bastırılması gerekmektedir.

Dikkate alınması gereken başka bir çalışma durumu da elektrikli aracın sürüşü sırasında sık sık regeneratif moda düşmesidir. Yani sık sık generatör modunda çalışmak zorundadır ki bu şartlarda elde edilen enerji geri kazanımı sistem bataryalarında depo edilmektedir. Tez kapsamında önerilen ve imalatı gerçekleştirilen karma rotorun her bir kutbunda aynı yönlendirmeli sıralı üç mıknatıs bulunduğundan generatör çalışma modunda üretilen faz geriliminin her bir periyodunda doğrultulabilir 6 adet yani iki kat daha fazla sinüs darbesi oluşmaktadır. Bu nedenle üç faz çıkışının tam dalga doğrultulması, sürücünün güç modülündeki IGBT'lerin ters diyotları

üzerinden gerçekleştiği için elde edilen doğrultulmuş çıkış geriliminde %4,5 oranında iyileştirme sağlanmış olmaktadır. Bu da, sistem bataryalarına geri kazandırılacak enerjide %4,5 oranında iyileştirme demektir.

Yapılan deneysel çalışmalarda, sabit frekans ve sabit gerilim koşulları altında motorun yüklenmesi ile yapılan deney sonucunda, gücün artışına bağlı olarak güç katsayısının arttığı-iyileştiği görülse de “deneysel motorun” maksimum güçte yüklenebilmesi için yeterli seviyelere ulaşamaması eleştirel bir bakış olarak değerlendirilmiştir. Burada en önemli faktör, tasarımı yapılan ve analizleri başarılı olarak değerlendirilen motorun imalatı yapılırken, tasarlanan modele göre kaçak reaktansların daha yüksek olarak gerçekleşmesidir. Bunun temel nedenleri arasında; rotor-stator hava aralığının yeterince düzgün imal edilememiş olması, stator slot sayısının 24 olmasından dolayı artan slot içi sarım ve akım yoğunluğu, fiziksel sarım ortamında rotordan uzaklaşan stator sargılarına bağlı büyük değerli kaçak reaktansların oluşması, rotor içinde ferromanyetik nüve içinde gömülü kalan mıknatısların stator sargılarına uzaklığı gibi nedenler gerçekçi olarak sıralanabilir. Bu etkenler göz önüne alınarak tez kapsamında önerilen motor yapısı, sadece imalatının düzgün yapılması şartıyla; stator slot sayısının en az iki kat artırılarak daha az akım yoğunluklu slotlar ve yüzey mıknatıslı rotor modeli ile performansın iyileşebileceği düşünülmektedir.

## 9. KAYNAKLAR

Administration, U. E., "International Energy Outlook 2019 [online]", (22 Ağustos 2019), [www.eia.gov/ieo](http://www.eia.gov/ieo), (2019).

Cha, H. R., "Design of outer rotor type induction motor having high power density for in-wheel system", *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, Japan, 1-4, (2012).

Chan, C. C., "An Overview of Electric Vehicle Technology", *Proceeding of the IEEE*, 81 (9), 1202-1212, (1993).

Chau, K. T., *Electric Vehicle Machines and Drives*, India, Wiley-IEEE Press, (2015).

Chau, K. T. and Wenlong, L. Li., "Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles", *International Journal of Vehicle Design*, 64 (1), 46-71, (2014).

Ehsani, M., Gao, Y. and Miller, J. M., "Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives", *Proceedings of the IEEE*, 95 (4), 719-728, (2007).

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E. and Emadi, A., *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*, New York, USA, CRC press, (2005).

Esmailzadeh, E., Vossoughi, G. R. and Goodarzi, A., "Dynamic Modeling and Analysis of a Four Motorized Wheels Electric Vehicle", *Vehicle System Dynamics*, 35 (3), 163-194, (2001).

Fei, W., Luk, P. C. K., Ma, J., Shen, J. X. and Yang, G., "A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 45 (10), 4724-4727, (2009).

Fudeh, H. R., "Modeling and analysis of induction machines containing space harmonics Part I: Modeling and transformation", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions*, 8, 2608-2615, (1983).

Habetler, T. G., Profumo, F., Pastorelli, M. and Tolbert, L. M., "Direct torque control of induction machines using space vector modulation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28 (5), 1045-1053, (1992).

Hamid A. T. and Kliman, G. B., *Handbook of Electrical Motors*, Florida, USA, Taylor & Francis Group, (2004).

Hayes, J. G. and Goodarzi, G. A., *Electric Powertrain*, Wiley, (2018).

Huang, P. W., Mao, S. H., Tsai, M. C. and Lui, C. T., "Investigation of line start permanent magnet synchronous motors with interior-magnet rotors and surface-magnet rotors", *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, China, 2888-2893, (2008).

Isfahani, A. H. and Vaez-Zadeh, S., "Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities", *Energy*, 34 (11), 1755-1763, (2009).

Isfahani, A. H. and Vaez-Zadeh, S., "Effects of magnetizing inductance on start-up and synchronization of line-start permanent-magnet synchronous motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, 47 (4), 823-829, (2011).

Jedryczka, C., Wojciechowski, R. M. and Demenko, A., "Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor", *IET Science, Measurement & Technology*, 9 (2), 197-203, (2014).

Kaila, S. L. and Jani., H. B., "Direct torque control for induction motor using SVPWM technique", *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, India, (2011).

Kim, W.H., Kim, K.C., Kim, S. J., Kang, D. W., Go, S. C., Lee, H.W. and Lee, J. "A study on the optimal rotor design of LSPM considering the starting torque and efficiency", *IEEE transactions on magnetics*, 45 (3), 1808-1811, (2009).

Larminie, J. and Lowry, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, Chichester, UK, Wiley, (2012).

Lebkowski, A., "Design, Analysis of the Location and Materials of Neodymium Magnets on the Torque and Power of In-Wheel External Rotor PMSM for Electric Vehicles", *Energies*, 11, 2293, (2018).

Lee, B. H., Hong, J. P. and Lee, J. H., "Optimum design criteria for maximum torque and efficiency of a line-start permanent-magnet motor using response surface methodology and finite element method", *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, 863-866, (2012).

Libert, F. S., "Design of a 4-pole Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor", *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Brugge, (2002).

Marčić, T. Š., "Determining parameters of a line-start interior permanent magnet synchronous motor model by the differential evolution", *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (11), 4385-4388, (2008).

Miller, T., "Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet AC Motors", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-103 (7), 1822-1828, (1984).



- Mingardi, D. and Bianchi, N., "FE-aided analytical method to predict the capabilities of line-start synchronous motors", *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2014)*, Pittsburgh, 5123-5130, (2014).
- Mohanty, K. B., "A Direct Torque Controlled Induction Motor with Variable Hysteresis Band", *11th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge, 405-410, (2009).
- Niaz Azari, M., Mirsalim, M., Abedi Pahnehkolaei, S. M. and Mohammadi, S. "Optimum design of a line-start permanent-magnet motor with slotted solid rotor using neural network and imperialist competitive algorithm", *IET Electric Power Applications*, 11, 1-8, (2016).
- Pecho, J. and Hofmann, W., "Analytical approach and solution for start-up behavior of line-start permanent magnet synchronous machines (LSPSM)", *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2017)*, Miami, 1-8, (2017).
- Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B. and Guglielmi, P., "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (6), 2322-2332, (2012).
- Rahman, M. A., Osheiba, A. M. and Radwan, T. S., "Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motors", *Electric Machines and Power Systems*, 25, 577-592, (1997).
- Richter, E. and Neumann, T., "Line start permanent magnet motors with different materials", *IEEE Transactions on Magnetics*, 20 (5), 1762-1764, (1984).
- Sahoo, S. K., Das, G. R. and Subrahmanyam, V., "VLSI design approach to high-performance direct torque control of induction motor drives", *World Journal of Modelling and Simulation*, 4 (4), 269-276, (2008).
- Sarani, E. and Vaez-Zadeh, S., "Design Procedure and Optimal Guidelines for Overall Enhancement of Steady-State and Transient Performances of Line Start Permanent Magnet Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32, 885-894, (2017).
- Shamlou, S. and Mirsalim, M., "Design, optimisation, analysis and experimental verification of a new line-start permanent magnet synchronous shaded-pole motor", *IET Electric Power Applications*, 7, 16-26, (2013).
- Shehata, E. G., "Design tradeoffs between starting and steady state performances of line-started interior permanent magnet synchronous motor",

*7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, Manchester,1-6, (2014).

Singh, J., Singh, K. and Kaur, H., "Designing of three phase squirrel cage induction motor for good efficiency", *Certified International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 5 (7), 40-45, (2016).

Soulard, J. and Nee, H. P., "Study of the synchronization of line-start permanent magnet synchronous motors", *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1, 424-431, (2000).

Tahami, F., Kazemi, R. and Farhanghi, S., "A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52 (3), 683-692, (2003).

Takahashi, I. and Noguchi, T., "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22 (5), 820-827, (1986).

Tiecheng, W. P., "Design characteristics of the induction motor used for hybrid electric vehicle", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (1), 505-508, (2005).

Tsuboi, K., Takegami, T., Hirotsuka, I. and Nakamura, M., "A general analytical method for a three-phase line-start permanent-magnet synchronous motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 131, 692-699, (2013).

Ugale, R. T., Chaudhari, B. N. and Baka, S., "Inset-consequent and inset rotors for line start permanent magnet synchronous motor", *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 333-338, (2012).

Vasudevan, M. and Arumugam, R., "New direct torque control scheme of induction motor for electric vehicles", *2004 5th Asian Control Conference*, 1377-1383, (2004).

Xue, X., Cheng, K. and Cheung, N., "Selection of electric motor drives for electric vehicles", *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC'08*, Sydney,1-6, (2008).

Yamakawa, J. and Watanabe, K., "A method of optimal wheel torque determination for independent wheel drive vehicles", *Journal of Terramechanics*, 43 (3), 269-285, (2005).

Yang, Z., Shang, F., Brown, I. P. and Krishnamurthy, M., "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1 (3), 245-254, (2015).

Yuan, Y., Meng, W., Sun, X. and Zhang, L., "Design Optimization and Analysis of an Outer-Rotor Direct-Drive Permanent-Magnet Motor for Medium-Speed Electric Vehicle", *Energies*, 10 (16), 1-19, (2019).

Zawilak, T., "Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines", *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2b), 177-179, (2013).

Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. and Diallo, D., "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study", *IEEE Transactions on Vehicular technology*, 55 (6), 1756-1764, (2006).

Zhao, J., Zheng, Y., Zhu, C., Liu, X. and Li, B., "A Novel Modular-Stator Outer-Rotor Flux-Switching Permanent-Magnet Motor", *Energies*, 10 (7), 937, (2017).

Zhu, Z. Q., "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles", *Proceedings of the IEEE*, 95 (4), 746-765, (2007).

## 10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa Tümbek

Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli / Pamukkale 10.04.1986

Lisans Üniversite : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : mustafatumbek@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi A-Blok  
Oda: MK-04-65  
Pamukkale / DENİZLİ

### **Yayın Listesi** :

• Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S., Sergeant, P., Ozturk, E. and Tumbek, M. “Energy Management System Optimization for Battery-Ultracapacitor Powered Electric Vehicle”, *Journal of Electrical Systems*, 13(1), (2017).

• Demircali, A., Sergeant, P., Koroglu, S., Kesler, S., Öztürk, E. and Tumbek, M. “Influence of the temperature on energy management in battery-ultracapacitor electric vehicles”, *Journal of Cleaner Production*, 176, 716-725, (2018).

• Tumbek, M. and Kesler, S. “Design and Implementation of a Low Power Outer-Rotor Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor for Ultra-Light Electric Vehicles”, *Energies*, 12, 3174, (2019).

### **Konferans listesi** :

• Tümbek, M., Kıvrak, S., and Kesler, S. “Body-Mounted Speed Control Device Design and Implementation for Using Three-Phase Motors Instead of Single-Phase Motors”, *International Congress on Natural and Engineering Sciences*, Saraybosna, (2015).

- Tümbek M., Öner Y., and Kesler S., “Optimal design of induction motor with multi parameter by FEM method”, *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2015)*, Bursa, (2015).
- Kesler S., Karakaş E., Köroğlu S., Tümbek M., and Demirçalı A., “Verification of Electrical Specification and Parameters of the PMSM with High Accuracy by FEM Models”, *1st International Conference On Engineering Technology And Applied Sciences (ICETAS2016)*, Afyonkarahisar, (2016).
- Köroğlu S., Demirçalı A., Kesler S., Sergeant P., Öztürk E., and Tümbek M., “Energy Management System For Battery Ultracapacitor Electric Vehicle with Particle Swarm Optimization”, *International Conference on Recent Advances in Electrical Systems (ICRAES'16)*, Hammamet, (2016).
- Tümbek M., Kesler S., Yenil V., and Büyükgümüş O., “A Comparison Study On Performance Investigation Of Speed Estimation Methods For The Sensorless DTC Based AC Drives”, *3rd International Conference on Advanced Technology Sciences (ICAT'16)*, Konya, (2016).
- Kilickir, Hande Nevin, Demircali, A., Koroglu, S., Kesler, S., Tumbek, M., and Kilic, A. “RF Telemetry Design for Electric Vehicle”, *6th International Conference on Advanced Technology Sciences (ICAT'Riga)*, Riga, (2017).
- Tümbek M., Kesler S., and Öner Y., “Design and Fem Analysis of Low Voltage Outer Rotor Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Magnet Alignments”, *6th International Conference on Advanced Technology Sciences (ICAT Riga)*, Riga, (2017).
- Aydoğan B., Öner Y., Ersöz M., Kesler S., and Tümbek M., “High Power Density and High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Design”, *International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2019)*, Antalya, (2019).
- Kocabıyık H., Öner Y., Ersöz M., Kesler S., and Tümbek M., “Analysis Of Permanent Magnet Synchronous Motor By Different Control Methods With Ansys Maxwell And Simplorer Co Simulation”, *International Conference on Artificial*

*Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2019)*, Antalya, (2019).

- Tümbek M., Kesler S., and Öner Y., “Parametrical Analysis of a New Design Outer RotorLine Start Synchronous Motor”, *International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2019)*, Antalya, (2019).