



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

**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN SÜRÜCÜ DEVRE  
TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ**

**ÜMİT YAVUZARSLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. SALİH TOSUN**

**DÜZCE, 2019**

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

**FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN**  
**SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ**

Ümit YAVUZARSLAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat PAMUK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 22/07/2019

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22 Temmuz 2019

(İmza)

Ümit YAVUZARSLAN

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında ayırdığı zaman, gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı danışmanım çok değerli hocam Doç. Dr. Salih TOSUN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, Doç. Dr. Murat KALE, Dr. Öğr. Üyesi Emin YILDIRIZ ve Dr. Öğr. Üyesi Furkan AKAR hocalarıma, arkadaşlarım Abdülmuttalip ÖZTÜRK, Ali CENİK, Cenk ANDIÇ, Gökhan YILDIZ ve Uğur GÜRGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

22 Temmuz 2019

Ümit YAVUZARSLAN

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER.....	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	8
2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHİ.....	8
2.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR (EA).....	12
2.2.1. Tümü Elektrikli Araçlar.....	14
2.2.2. Karma (Hibrid) Elektrikli Araçlar .....	15
2.3. ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER.....	16
2.4. BATARYA TEKNOLOJİLERİ.....	17
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN MOTORLAR..	20
3.1. KULLANILAN MOTOR TİPLERİ.....	21
3.1.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM).....	21
3.1.2. Doğru Akım Motorları (DC).....	22
3.1.3. Asenkron Motorlar.....	22
3.1.4. Anahtarlamalı Relüktans Motoru (ARM).....	23
3.2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI (FDAM).....	23
3.2.1. FDAM İç Yapısı.....	27
3.2.1.1. Stator.....	28

3.2.1.2. Rotor.....	29
<b>3.2.2. FDAM Tipleri.....</b>	<b>30</b>
3.2.2.1. Dış Rotorlu FDAM.....	30
3.2.2.2. İç Rotorlu FDAM.....	33
3.2.2.3. Disk Tipi FDAM.....	33
<b>3.3. MOTORLARDA MIKNATIS SEÇİMİ.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1. Mıknatis Türleri.....</b>	<b>37</b>
3.3.1.1. AlNiCo Mıknatislar.....	37
3.3.1.2. Seramik Mıknatislar.....	38
3.3.1.3. SmCo Mıknatislar.....	38
3.3.1.4. NdFeB Mıknatislar.....	38
<b>3.4. MOTORLARDA KONUM ALGILAYICILAR.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.1. Sensörsüz Konum Algılama.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.2. Sensörlü Konum Algılama.....</b>	<b>42</b>
3.4.2.1. Takometre ile Konum Algılama.....	42
3.4.2.2. Çözücü (Resolver) İle Konum Algılama.....	43
3.4.2.3. Kodlayıcı (Encoder) İle Konum Algılama.....	45
3.4.2.3.1. Mutlak (absolute) Kodlayıcı.....	46
3.4.2.3.2. Artımlı (incremental) Kodlayıcı.....	46
3.4.2.4. Hall Alan Etkili Sensör İle Algılama.....	49
<b>3.5. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA GÜÇ GERİ KAZANIMI... 53</b>	<b>53</b>
<b>4. MOTOR SÜRÜCÜLER VE KATMANLARI.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. MİKRODENETLEYİCİ KATMANI.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2. OPTİK İZOLATÖR ( OPTOKUPLÖR) KATMANI.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3. KAPI SÜRÜCÜ (GATE DRIVER) KATMANI.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4. EVİRİCİ (İNVERTER) KATMANI.....</b>	<b>68</b>
<b>4.4.1. Anahtarlama Elemanları.....</b>	<b>69</b>
4.4.1.1. Transistörler ( Bipolar Jonksiyonlu Transistör, BJT) .....	70
4.4.1.2. Mosfetler (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).....	71
4.4.1.3. Igbtler (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	73
<b>4.4.2. Ölü Zaman (Dead Time).....</b>	<b>74</b>
<b>4.4.3. Denetleyiciler.....</b>	<b>76</b>
4.4.3.1. Klasik Denetleyiciler.....	76
4.4.3.1.1. PI Denetleyici.....	76
4.4.3.1.2. PID Denetleyici.....	77
4.4.3.2. Modern Denetleyiciler.....	78
4.4.3.2.1. Bulanık Mantık.....	78

4.4.3.2.2. Yapay Sinir Ağları.....	78
4.4.3.2.3. Genetik Algoritma.....	79
<b>4.4.4. Kontrol Yöntemleri.....</b>	<b>80</b>
4.4.4.1. PWM Kontrol.....	81
4.4.4.2. Histerisiz Bant Kontrol.....	82
4.4.4.3. Değişken DC Hat Gerilim Kontrolü.....	<b>83</b>
<b>5. SÜRÜCÜ TASARIMI.....</b>	<b>84</b>
5.1. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOTOR.....	84
5.2. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MİKRODENETLEYİCİ.....	85
5.3. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOSFET SÜRÜCÜLER .....	88
5.4. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOSFETLER.....	89
5.5. SÜRÜCÜ ŞEMASI VE KURULUMU.....	91
<b>6. SÜRÜCÜNÜN TEST EDİLMESİ ve BULGULAR.....</b>	<b>93</b>
<b>7. SONUÇLAR .....</b>	<b>99</b>
<b>8. ÖNERİLER.....</b>	<b>101</b>
<b>9. KAYNAKLAR.....</b>	<b>103</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>113</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.	Electrobats elektrikli otomobil..... 9
Şekil 2.2.	La Jamais Contente adlı hız rekoru kıran elektrikli araç..... 9
Şekil 2.3.	a) 1904 yılı Alman elektrikli arabası b) 1913 yılı Detroit aracı Edison ..... 10
Şekil 2.4.	1967 yılında üretilen prototip elektrikli araç Comuta..... 11
Şekil 2.5.	Araç tipleri..... 13
Şekil 2.6.	Tümü elektrikli araç..... 15
Şekil 2.7.	Seri ve paralel karma (hibrid) elektrikli araç..... 16
Şekil 2.8.	Zorlu Enerji tarafından kurulumu tamamlanmış bir şarj istasyonu 19
Şekil 3.1.	Elektrik motorlarının sınıflandırılması..... 20
Şekil 3.2.	DC motor çalışma bölgeleri..... 18
Şekil 3.3.	Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının içyapıları..... 25
Şekil 3.4.	FDAM sürücü devresi..... 26
Şekil 3.5.	FDAM’larda kontrol işlemleri ve sinyalleri a) Hall sensör sinyalleri b) Faz gerilimleri c) Zıt Emk gerilimleri..... 26
Şekil 3.6.	FDAM için Hız/Moment eğrisi..... 27
Şekil 3.7.	Bir FDAM’ın yapısı..... 28
Şekil 3.8	Farklı kutuplu stator yapıları a) 2 kutuplu stator b) 4 kutuplu stator..... 28
Şekil 3.9.	Dış rotorlu FDAM’a ait stator..... 29
Şekil 3.10.	Farklı kutup sayılarında FDAM rotoru yapısı a) 2 kutuplu rotor b) 4 kutuplu rotor..... 29
Şekil 3.11.	Dış rotorlu FDAM’a ait rotor..... 30
Şekil 3.12.	Bir dış rotorlu fırçasız doğru akım motorunun yapısı..... 30
Şekil 3.13.	Bir dıştan rotorlu motorun bileşenleri..... 31
Şekil 3.14	Fırçasız doğru akım motoru a) İmalat aşamaları b) Tamamlanmış hali..... 31
Şekil 3.15.	Hub motorlu tasarlanmış bir elektrikli araç şasesi..... 32
Şekil 3.16.	Bir hub motora ait teknik bilgiler..... 32
Şekil 3.17.	Tekerlek içi (hub) motor patentleri a) Wellington Adams’a ait motor tasarımı b) Albert Parcelle’ye ait motor tasarımı c) Edward Parkhurst’a ait motor tasarımı ..... 33
Şekil 3.18.	Yüzey ve gömülü mıknatıslı içten rotorlu FDAM yapısı..... 33
Şekil 3.19	Disk tipi FDAM yapısı..... 34
Şekil 3.20.	Bir dış rotorlu motorda rotora dizilmiş mıknatıslar..... 35
Şekil 3.21.	Mıknatıslı motor yapıları..... 36
Şekil 3.22.	Histeresis eğrisi (çevrimi) ..... 36
Şekil 3.23.	NdFeB mıknatıslar için histeresis eğrisi..... 37
Şekil 3.24.	Ferritik mıknatıs..... 38
Şekil 3.25.	Neodyum mıknatıslar a) Daire b) Kare c) Havşalı ..... 39
Şekil 3.26	Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı..... 41

Şekil 3.27.	Faz besleme gerilimleri ve zıt emk gerilimleri .....	41
Şekil 3.28	İki fazın enerjili ve bir fazın boşta olması durumunda akımın yönü.....	41
Şekil 3.29.	Takometre cihazı ve çıkış sinyali.....	43
Şekil 3.30.	a) Ölçümlerde kullanılan takometre cihazı b) Çalışmada kullanımı.....	43
Şekil 3.31.	Resolver çalışma mantığı ve yapısı.....	44
Şekil 3.32.	Resolver gerilimleri.....	44
Şekil 3.33.	Lodos'a ait fırçasız doğru akım motoruna ait sin/cos çözücü.....	45
Şekil 3.34.	Kodlayıcı çıkış sinyali.....	45
Şekil 3.35.	Mutlak kodlayıcı.....	46
Şekil 3.36.	Artımlı bir kodlayıcının tekerlek tipi motora bağlantısı.....	47
Şekil 3.37.	Artırımlı kodlayıcı.....	47
Şekil 3.38.	Artırımlı kodlayıcı disk yapısı ve çıkış sinyali.....	48
Şekil 3.39.	Çözücü ve artımlı kodlayıcı karşılaştırması.....	48
Şekil 3.40.	Tekerlek motorda kullanılan Hall sensörler ve stator üzerindeki konumu.....	49
Şekil 3.41.	Hall etkisindeki yarıiletken.....	50
Şekil 3.42.	Hall etkisi altındaki yarıiletken plakada gerçekleşen kutuplaşma olayı.....	50
Şekil 3.43.	a) Manyetik alan yok b) Manyetik alan ile Hall geriliminin oluşması.....	50
Şekil 3.44.	a) Hall Effect Latch sensörü b) Lineer Hall Effect sensörü.....	51
Şekil 3.45.	Hall sensörlerinin farklı tipte yerleştirilmesi.....	53
Şekil 4.1.	Birçok motor sürücü için geçerli bir blok şema.....	56
Şekil 4.2.	4N25 Entegresi ve içyapısı.....	62
Şekil 4.3.	Tasarımı tamamlanmış bir sürücü devresi ve katmanları.....	62
Şekil 4.4.	PWM işaretinin TLP 250 ile iletilmesi.....	63
Şekil 4.5.	IR2113 entegresi ve bağlantı tipi.....	64
Şekil 4.6.	Texas Instruments şirketine ait bir mosfet sürücü ve bağlantısı...	64
Şekil 4.7.	Bootstrap sürücüsü.....	65
Şekil 4.8.	IR2110 IGBT/MOSFET sürücü entegresi ve bağlantısı.....	66
Şekil 4.9.	Direkt kapı sürücü devresi.....	66
Şekil 4.10.	Transistörlü totem pole mosfet sürücü devresi.....	67
Şekil 4.11.	MOSFET'lerden oluşan totem-pole MOSFET sürücü devresi ...	67
Şekil 4.12.	Kollektör ve fırça genel görünüm.....	68
Şekil 4.13.	Üç fazlı altı anahtarlı bir evirici devresi.....	69
Şekil 4.14.	Güç elemanları ailesi .....	70
Şekil 4.15.	Güç elemanlarının çalışabileceği akım, gerilim ve frekans alanları.....	70
Şekil 4.16.	Transistör sembol ve içyapısı.....	71
Şekil 4.17.	BJT çalışma bölgeleri.....	71
Şekil 4.18.	Çoğaltan ve azaltan tip mosfet sembolleri.....	72
Şekil 4.19.	MOSFET'lerin içyapısı.....	72
Şekil 4.20.	MOSFET şekli a) Temsili kondansatörler b) Enine kesiti .....	72
Şekil 4.21.	MOSFET karakteristik eğrisi.....	73
Şekil 4.22.	IGBT sembolü ve eşdeğer devre şeması.....	74

Şekil 4.23.	Ölü zaman eklenmemiş ve eklenmiş PWM sinyali.....	75
Şekil 4.24.	Bir PWM sinyalinde oluşturulan ölü zamanın görüntüsü.....	75
Şekil 4.25.	PI kontrol yapısı.....	76
Şekil 4.26.	PID kontrol blok şeması.....	77
Şekil 4.27.	Bulanık mantık kontrol yönteminin kullanan bir motor sürücü blok diyagramı.....	78
Şekil 4.28.	YSA temel yapısı.....	79
Şekil 4.29.	Genetik algoritma akış döngüsü .....	80
Şekil 4.30.	PWM sinyal simülasyonu.....	81
Şekil 4.31.	Bir FDAM motora ait elde edilen sinyaller.....	82
Şekil 4.32.	Histerisiz band kontrol sinyalinin elde edilmesi.....	83
Şekil 5.1.	Tasarlanan sürücünün kontrol ettiği hub motor.....	84
Şekil 5.2.	Arduino Nano ve pinleri.....	85
Şekil 5.3.	Arduino IDE’de açılmış yeni bir sayfa ve bölümleri.....	87
Şekil 5.4.	Sürücüde kullanılan kütüphane ve kodların bir bölümü.....	87
Şekil 5.5.	IR2104 Kapı sürücü entegresine ait bilgi sayfası.....	88
Şekil 5.6.	IR2104 Kapı sürücü entegresinin temel bağlantı şeması.....	88
Şekil 5.7.	Devrede mosfet sürücüler.....	89
Şekil 5.8.	Devrede kullanılan mosfet ve özellikleri.....	89
Şekil 5.9.	Mosfetlerin devredeki yerleşimi.....	90
Şekil 5.10.	a) Silikon izolatör b) Soğutucu boncuk c) MOSFET'in alüminyum soğutucuya montajı .....	90
Şekil 5.11.	Devrenin Proteus çizimi.....	91
Şekil 5.12.	Devrenin PCB çizimi.....	91
Şekil 5.13.	Sürücünün çıkarılması ve elemanların yerleştirilerek tasarımın tamamlanmış hali .....	92
Şekil 6.1.	Sürücü test düzeneği.....	93
Şekil 6.2.	Termal kamera ile a) Motor rulman bölgesi b) Sürücü devresi görüntüsü.....	94
Şekil 6.3.	Kalkış anında kaynaktan çekilen akımın oluşturduğu tepe değerinin görüntüsü.....	94
Şekil 6.4.	Referans hız değerinin kalkış anındaki değerine bağlı olarak kalkış akımı değerleri.....	94
Şekil 6.5.	Çizelgede bilgileri verilen a) Hız değişimine göre akım b) Akım değişimine karşı RPM değişiminin grafiksel gösterimi.	95
Şekil 6.6.	Mekanik frenleme sonucu değişen hıza karşı çekilen akım grafiği.....	96
Şekil 6.7.	Düşük motor hızında Hall sensörlerden alınan sinyaller.....	96
Şekil 6.8.	Yüksek motor hızında Hall sensörlerden alınan sinyaller.....	97
Şekil 6.9.	Motor düşük hızda hareket ederken faz-faz arası gerilim değerleri .....	97
Şekil 6.10.	Şekil 6.10. Motor yüksek hızda hareket ederken faz-faz arası gerilim değerleri.....	98

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

Çizelge 2.1.	Elektrikli araçların tarihçesindeki bazı dönüm noktaları.....	12
Çizelge 2.2.	EA ve İYM karşılaştırılması.....	14
Çizelge 2.3.	Elektrikli taşıt modellerinde kullanılan elektrik motoru tipleri.....	15
Çizelge 2.4.	Elektrikli araç tipleri ve karşılaştırmaları.....	17
Çizelge 3.1.	SMSM'lerin diğer motorlara göre avantajları.....	22
Çizelge 3.2.	FDAM'ların olumlu ve olumsuz yönleri.....	24
Çizelge 3.3.	Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının karşılaştırılması.....	25
Çizelge 3.4.	Mıknatısların sınıflandırılması.....	34
Çizelge 3.5.	Sürekli mıknatısların karşılaştırılması.....	39
Çizelge 3.6.	Artırımlı kodlayıcının teknik bilgileri.....	47
Çizelge 3.7.	Hall sensörlerinin bazı uygulama alanları.....	51
Çizelge 4.1.	Sürücü devrelerinde tercih edilen mikrodenetleyiciler.....	60
Çizelge 4.2.	International Rectifier şirketine ait bazı MOSFET sürücü entegreleri.....	65
Çizelge 4.3.	Anahtarlama elemanlarının karşılaştırılması.....	74
Çizelge 4.4.	PID kontrolde katsayıların sisteme etkileri.....	77
Çizelge 5.1.	Arduino Nano teknik bilgileri.....	86
Çizelge 6.1.	Hız değişim sinyaline karşı kaynaktan çekilen akım ve motorun RPM değeri.....	95

## KISALTMALAR

AA	Alternatif Akım.
AC	Alternatif akım (Alternating Current).
ADC	Analog dijital çevirici (Analog Digital Convertör).
AlNiCo	Alüminyum, nikel ve kobalt içerikli mıknatıs türü.
ARM	Anahtarlama relüktans motor.
Arm	Bir işlemci mimarisi (Advanced RISC Machines).
BJT	Bir anahtarlama elemanı (Bipolar Jonksiyonlu Transistör).
BLDC	Fırçasız doğru akım motoru (Brushless Direct Current Motor).
CAN	Bir haberleşme türü (Controller Area Network).
CPU	Merkezi işlemci birimi (Central Processing Unit).
DA	Doğru akım.
DC	Doğru akım (Direct Current).
DGM	Darbe genişlikli modülasyon (PWM).
DSP	Sayısal sinyal işleme (Digital Signal Processor).
dsPIC	Sayısal sinyal işleme özelliği olan PIC mikrodenetleyici ailesi.
EA	Elektrikli araç.
E-Car	Elektrikli otomobil.
EMK	Elektro Motor Kuvvet
EV	Elektrikli araç (Electric Vehicle).
FDAM	Fırçasız doğru akım motoru (BLDC).
FPGA	Sayısal tümleşik devre (Field Programmable Gate Array).
GA	Genetik algoritma.
GE	Motor üreticisi bir firma (General Electric).
H	Hidrojen.
HUB	Tekerlek tipi , dış rotorlu bir fırçasız doğru akım motoru tipi.
IDE	Yazılım geliştirme ortamı (Integrated Development Environment).
IGBT	Bir anahtarlama elemanı ( Insulated Gate Bipolar Transistor).
İYM	İçten yanmalı motor.
MATLAB	4. nesil programlama dili (Matrix Laboratory).
MCU	Mikrodenetleyici (Micro Control Unit).
MEGA	Bir Arduino geliştirme kartı modeli.
MOSFET	Bir anahtarlama elemanı (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).
NANO	Bir Arduino geliştirme kartı modeli.
NdFeB	Neodyum, demir ve borondan oluşan bir mıknatıs türü.
PC	Bilgisayar (Personel Computer).
PI	Bir denetleme türü (Orantı-integral, Proportional- Integral)
PIC	Bir mikrodenetleyici markası türü (Peripheral Interface Controller).
PID	Bir denetleme türü (Proportional- Integral- Derivative).

PLC	Programlanabilir Lojik Kontrolcü.
PWM	Darbe genişlikli modülasyon (Pulse Width Modulation).
RMS	Karelerinin ortalama karekökü (Root Mean Square).
RPM	Dakikadaki tur sayısı (Revolutions Per Minute).
SCR	Bir anahtarlama elemanı, Tristör (Silicon Controlled Rectifiers).
SD	Mosfet sürücülerde entegre çıkışını kapatma pini (Shut Down).
Sİİ	Sayısal İşaret İşleme (DSP).
SM	Sürekli mıknatıs.
Sm-Co	Samaryum ve kobalt içerikli bir mıknatıs türü.
SMSM	Sürekli mıknatıslı senkron motor
STM32	STMicroelectronics tarafından üretilen 32-bit mikrodenetleyici.
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu.
UNO	Bir Arduino geliştirme kartı modeli.
USB	Evrensel seri veri yolu (Universal Serial Bus).
YSA	Yapay sinir ağları.

## SİMGELER

A	Akım birimi (Amper).
B	Manyetik akı yoğunluğu.
$B_r$	Kalıcı akı yoğunluğu
$B_{sat}$	Doyma manyetizasyonu.
d	Kalınlık.
e(t)	Kontrol sistemi denkleminde hata fonksiyonu.
$\tau$ (s)	Elektriksel zaman sabiti
F	Kuvvet.
H	Manyetik alan şiddeti.
$H_{cB}$	İç koersif kuvvet.
$H_e$	Koersivite
I	Akım.
$I_{DS}$	Drain source akımı.
$I_s$	Sürekli akım.
$k_d$	Türevsel denetleyici katsayısı
$k_E$ (V.srad)	Ters EMK sabiti.
kHz	Frekans birimi (kilo hertz).
$k_i$	İntegral denetleyici katsayısı
$k_p$	Oransal denetleyici katsayısı
$k_T$ (N.m A)	Moment sabiti
$m\tau$ (s)	Mekanik zaman sabiti.
P	Güç (Power).
q	Elektrik yükü.
r (t)	Kontrol sistemi denkleminde referans sinyali.
u (t)	Kontrol sistemi denkleminde kontrol sinyali.
V	Gerilim birimi (Volt).
V.srad	Mıknatısların sargılarda oluşturduğu gerilim.
$V_{GS}$	Gate source gerilimi.
$V_H$	Hall olayı sonucu oluşan Hall gerilimi.
W	Güç birimi, Watt.
watt/kg	Güç yoğunluğu.
y (t)	Kontrol sistemi denkleminde çıkış sinyali.

## ÖZET

### FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Ümit YAVUZARSLAN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik ve

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Salih TOSUN.

Temmuz 2019, 112 sayfa

Güç elektroniği uygulamalarında motor sürücüler önemli bir yer tutmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaştığı günümüzde (otomobil, motosiklet gibi) bu araçlarda kullanılan motorların da doğru bir şekilde hızının kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu kontrol ile bataryalarda depolanan enerjinin en üst düzeyde verimlilikle kullanılması gerekmektedir. Elektrik motoru ile çalışan araçlarda farklı motorlar kullanılsa da çoğunlukta İngilizcesi Brushless DC Motor (BLDC) Türkçe FDAM ile kısaltılan Fırçasız Doğru Akım Motorları kullanılmaktadır. Bu motorlarda konum bilgisi için ya sincos denilen çözücü, kodlayıcı ya da Hall sensörleri kullanılmaktadır. Sargıların konum bilgisi motoru kontrol edebilmek için önemli bir etkidir. Konum bilgisi alındıktan sonra kontrolör tarafından gerekli anahtarlama elemanları kontrol edilerek motorun sargılarına enerji sağlanır. Bu şekilde mıknatıslar ile sargılar arasında oluşan itme ve çekme kuvveti sonucu motorun hareketi sağlanır.

**Anahtar sözcükler:** Güç elektroniği, BLDC motor, Motor sürücü, MOSFET, IGBT.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF DRIVER CIRCUIT FOR BRUSHLESS DC MOTORS (BLDC)**

Ümit YAVUZARSLAN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences,

Department of Electric Electronics and Computer Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Salih TOSUN

July 2019, 112 pages

Motor drives play an important role in power electronics applications. Nowadays, when electric vehicles become widespread (such as automobiles and motorcycles), the speed of the engines used in these vehicles should be controlled accurately. Furthermore, with this control, the energy stored in the batteries should be used with the highest efficiency. Although different motors are used in vehicles running with electric motors, Brushless DC Motors (BLDC) are used mostly in English. In these motors, either solvent, encoder or Hall sensors called sincos are used for position data. The position information of the windings is an important factor for controlling the motor. After the position data is obtained, the necessary switching elements are controlled by the controller and the motor windings are energized. In this way, the movement of the motor is provided as a result of the pushing and pulling force formed between the magnets and the windings.

**Keywords:** Power electronics, BLDC motor, Motor driver, MOSFET, IGBT.

# 1. GİRİŞ

Artan hava kirliliği, azalan yer altı kaynakları (fosil yakıtlar) ve daha konforlu bir ulaşım isteği, motor ve batarya teknolojilerinde gelişmesiyle, aslında geçmişi çok eski olan elektrikli araçlara talebi günümüzde arttırmıştır.

İlk çıktığı 1800'lü yıllarda, çok popüler olan elektrikli araçlar, içten yanmalı motorun bulunmasıyla eksik yönlerinden dolayı önemini yitirmeye başlamıştır. En büyük dezavantajı batarya-şarj ve buna bağlı olarak mesafe problemi olan elektrikli araçlar yerini fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara bırakmıştır.

Yaşanan yüksek enerji talebinden dolayı ortaya çıkan petrol krizi ile tekrar gündeme gelmiş, gelişen güç elektroniği ve batarya teknolojileri ile tekrar üretime yönelik çalışmalar başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının da yayılmasıyla "sıfır emisyon" hedefine hızlı bir şekilde ilerlemektedir.

Bir elektrikli otomobil veya taşıyıcı temel olarak batarya, motor, konum algılama sensörleri, mikrokontrolcü ve inverterden oluşmaktadır. Mikrokontrolcü bataryadan aldığı enerji ile, sensörlerden gelen konum bilgisine göre motoru inverter devresi kontrol etmektedir. Bu sistemdeki elektronik kısım (sensörler-mikrokontrolcü-inverter) bazen sadece bir kart üzerinde birleşir ve sürücü olarak anılmaktadır. Sürücüler çok hızlı çalışan, yüksek akımlara dayanıklı, yazılım ile sistemi kontrol eden yapılardır. Proportional Integral (PI), Proportional Integral Derivative (PID) gibi kontrol sistemleri ile sistemi kontrol edebildiği gibi günümüzde genetik algoritma, yapay sinir ağları gibi üst düzey kontrol sistemleri ile de sistemi kontrol edebilmektedir. Günümüzün olmazsa olmaz teknolojisi yapay zekanın da çok yakında sürücülerde kullanılması kaçınılmazdır.

Elektrikli araçlarda günümüzde en çok mıknatıslı motorlar tercih edilmektedir. Mıknatısların sağlamış olduğu sürekli manyetik alan çok daha yüksek tork, az bakım, kontrol edilebilir hız aralığı gibi faydalar sunabilmektedir. Özellikle son yıllarda fırçasız doğru akım motorları endüstriden küçük ev aletlerine kadar birçok cihazda kullanılmaya başlanmıştır. Şu anlık yüksek fiyatı nedeniyle istenilen hızda yaygınlaşmasa dahi zamanla düşen fiyatı ile daha da çok yayılacağı kesindir.

## 1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Birçok araştırmacı gerek fırçasız doğru akım motorları gerekse motor sürücüler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Genellikle daha ekonomik ve basit sürücü tasarlamak temel hedef olmuştur. Bunun yanında farklı mikrokontrolcülerin performansları incelenmiştir. Yine güncel kontrol algoritmalara karşı sürücülerin verdiği tepkiler de yapılan araştırmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Yılmaz ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunun kontrolünde bir yöntem olan sensörsüz kontrol tekniğinde dalgacık teorisini kullanmışlardır ve başarılı olmuşlardır [1].

Erginer yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında sürücü devrelerin inverter katı üzerinde yoğunlaşmış inverterlerin farklı çalışma durumları incelenmiş, araç uygulamaları için alan zayıflatma bölgesinde çalışmanın son derece önemli olmasından dolayı kare dalga çalışma ile uzay vektör modülasyonu detaylı şekilde ele alınmıştır [2].

Bingöl ve arkadaşları yayınlamış oldukları makalede Microchip firmasına ait mikrokontrolcülerle çalıştıklarını, yüksek performansından dolayı 8 bitlik bir mikrokontrolcü ile değil, frekansı daha yüksek olan dsPIC ailesine ait bir ürünle çalışmayı tercih etmiştir. Sistem başarılı bir şekilde çalışmıştır [3].

Aydoğdu makalesinde bir fırçasız doğru akım motorunu 8 bitlik bir mikrokontrolcü ile kontrol ettiğini anlatmıştır. Aydoğdu, güç devresi ile mikrokontrolcü birimini optokuplörlerle de korumayı hedeflemiştir. Sistemin basit, ucuz ama verimli çalıştığını gözlemlemiştir [4].

Karakulak ve arkadaşları fırçasız doğru akım motoruna 8 bit PIC16F877 mikroişlemcisi ile motor sürücü devresi tasarlamıştır. Tasarımında piyasada yaygın kullanılan ve ekonomik fiyata bulunabilen devre elemanlarını tercih etmiş bu sayede düşük maliyete, basit ama verimli bir sürücü yapmış ve çalıştırmıştır [5].

T. Hemanand ve T. Rajesh, akım ve hız bilgilerine dayalı, PI denetimli bir sürücüyü Digital Signal Processor (DSP) ile uygulamış ve fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmeyi başarmıştır. Hard chopping yöntemi ile de sönümleme zamanını kısaltmışlardır [6].

Çalışmalarını mini bir araç üzerinde test eden Alexander Rowe ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunun hızını kontrol etmeyi başarmışlardır. PI kontrol sistemi ile sistemi kontrol etmiş ve C8051F020 mikrokontrolcü kullanmışlardır [7].

Ming-Fa Tsai ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunu matlab programında modellemişler ve Field Programmable Gate Array (FPGA) kartı ile de uygulamışlardır. Uygulama sonuçları ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır [8].

Radu Duma ve arkadaşları TexasInstruments firmasının LM3S8962 mikrokontrolcüsü ile gerçek zamanlı fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmişlerdir. Kontrol sistemi olarak da PID yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca sistemi uzaktan kontrol edilebilen bir hale getirmişlerdir [9].

Karapınar ve arkadaşları ise birçok çalışmadan farklı olarak fırçasız doğru akım motoru kontrolü üzerine Matlab/Simulink programında kaskad bir denetleyici tasarlamış ve tasarlanan denetleyiciyi dsPIC ile uygulamışlardır [10].

Köse ve arkadaşları yaptıkları sürücüde PID ve Bulanık mantık kontrol yöntemlerini kullanmış olup mikrokontrolcü olarak Arm Cortex M4 tabanlı STM32F407 Discovery geliştirme kitini kullanmıştır. Sistem girişine farklı ve sürekli değişen referans sinyalleri uygulanarak motor hızının her iki kontrol yönteminde de istenilen referans değerinde tutulması amaçlanmıştır [11].

M. Terashima ve arkadaşları klasik iki tekerlek tipi motor yerine araçlarında dördü de tekerlek tipi (hub) motor kullanmış, motoru da sürücüsünü de kendileri tasarlamıştır. Kontrolcü mikro işlemci tabanlı olup üç fazlı inverter yapısındadır. Motorda Sm-Co mıknatısları kullanılmış bu motorla yüksek çıkış torku sağlanmıştır. Ayrıca anahtarlama elamanı olarak Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) yerine IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kullanılmıştır. Bu sayede değişimlere hızlı cevap verebilen akım ve moment kontrolü sağlamışlardır [12].

Acar çalışmasında bir inverter devresi tasarlamıştır. Çalışması Tübitak 1003 projesi kapsamından da desteklenmiştir. Motor olarak 3 fazlı asenkron motor tercih edilmiş olup elektrikli araçlar için asenkron motorlarda bir tercihtir. Mikrokontrolcü olarak ise Texas Instruments firmasında ait TMS320F28335 DSP tercih edilmiştir [13].

Matsui ve arkadaşı, DSP kullanarak fırçasız doğru akım motorlarını kontrol etmeye çalışmışlardır. Motora uyguladıkları üç faz akım işaretlerini eş zamanlı DSP'ye de uygulamışlar ve bu sinyalleri DSP kontrolünde gerçek hız sinyaline dönüştürmüşlerdir.

Referans hız sinyali ile gerçek hız sinyali karşılaştırılmış, üretilen hata sinyali ve bu sinyal PI denetleyicisinden oluşan bir kontrol devresinden geçirilerek referans akım değeri bulunmuştur [14].

Yazıcı DSP kullandığı sürücü çalışmasında PI denetimi kullanarak kontrol sağlamıştır. Değişik hızlarda ve yüklerde sistemin hız ve akım değerlerini incelenmiştir. Yüklü ve yüksüz kalkış durumlarında hızlı bir kalkış gözlenmiş ama kısa sürede referans değere yerleştiği gözlemlenmiştir [15].

Yıldız ise yaptığı çalışmasında sürücülerde bulanık mantık yöntemini uygulamıştır. Hazır alınan sürücülere göre daha ucuza üretebildiği sürücünün bulanık mantık ile çok daha verimli çalıştığı sonucuna varmıştır. Ayrıca yüksek hızlara daha kısa sürede ulaşmıştır [16].

Albayrak çalışmasında Tip 2 bulanık mantık yöntemi ile çalışmıştır. Ayrıca PID ve bulanık mantık ile de denemeler yapıp sonuçları karşılaştırmıştır. Denemelerini yüksüz, yarı yüklü ve tam yüklü durumları için gerçekleştirmiştir. Tasarladığı sistemin kalkış anındaki sarsıntıları azalttığı, yumuşak kalkış ve güveli bir sürüş sağladığını tespit etmiştir [17].

Kahveci'de çalışmasında motor olarak fırçasız doğru akım motoru kullanmıştır. Kontrolünde ise Programlanabilir Lojik Kontrolcü (PLC) kullanmış, iki farklı anahtarlama yöntemini kıyaslayarak, çakışık zamanlı anahtarlama göre ayırık zamanlı anahtarlama motorun daha düzgün çalıştığını gözlemlemiştir [18].

Kahveci'nin çalışmasından 14 yıl sonra Aktuna ve arkadaşı yine bir PLC kullanarak bir sürücü tasarlamıştır. Projelerinde Siemens Simatic S7 200 PLC modelini kullanmışlardır. Rotor konumu için bir sensör kullanmamışlardır. Sensörlü tasarımların ulaştığı hız seviyelerine ulaşamadıklarını görmüşlerdir. Sonuç olarak PLC ile kontrol sağlanmış fakat yüksek hızlara çıkılamamıştır [19].

Bektaş fırçasız doğru akım motorları için bir deney seti geliştirmiştir. Bu deney setinde motorlar durum uzay modelleri türetilerek incelenmiştir. Motorların moment hız ve konum kontrolü Histeresiz bant kontrolü, Pulse Width Modulation (PWM) kontrolü ve Ayarlı doğru akım hat gerilim kontrolü yöntemleri ile yapılmıştır. Yöntemler içinde ayarlı doğru akım hat gerilim kontrolü metodunun moment salınımlarının, anahtarlama kayıplarının az olması, frekans tayfinin diğer yöntemlere göre düzgün ve düşük çıkması sonucunda, en iyi yöntem olduğunu görmüştür [20].

Gençer ve arkadaşı fırçasız doğru akım motorunu Matlabta modellemiş ve simüle ederek kontrol etmiştir [21].

Limei Xu ve Qian Wu'da Matlab ile çalışarak fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmede hızlı bir gelişme yöntemini kullanarak gerçekleştirmişler [22].

Atan çalışmasında fırçasız doğru akım motorunun hız kontrolünü yapmıştır. Hem simülasyon hem de deneysel olarak sistem uygulanmıştır. Diferansiyel denklemlerin çözümünde Runge Kutta yöntemi kullanılmıştır. PID ve PWM denetimli çalışmalar denenmiştir. Simülasyon olarak Matlab programı kullanılmıştır ve sensörlü bir fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. 50W güce ulaşabilen motorun hızını hem teorik olarak hemde uygulamalı olarak kontrol etmeyi başarmıştır [23].

Wu ve Tian yaptıkları çalışmada, fırçasız doğru akım motor kontrolünde dsPIC30F4012 mikrokontrolcüsünü kullanmış, devre tasarlanmış, fan ve pompaların kontrolünde güvenle kullanılacak bir performans göstermiştir [24].

Ulu yaptığı sürücü devresinde PI ve PID kontrol üzerinde çalışmıştır. Mikrokontrolör olarak dsPIC30f tercih edilmiş, fırçasız doğru akım motoru kontrol edilmiştir. Çalışmada sürücü ve motorlarla ilgili birçok bilgiye de yer verilmiştir [25].

İlzuka inverter devresindeki anahtarlama elemanlarını bilgisayar ile sürmüş geri besleme kullanmadan fırçasız doğru akım motorunun hız kontrolünü sağlamıştır [26].

Aduc 812 mikrokontrolörünü çalışmasında kullanan Zkariah ve arkadaşı PWM yöntemi ile yüksek hızlı bir sürücüdevresi tasarlamıştır. Ekonomik olarak da tasarlanan sistemin performansının iyi olduğu gözlenmiştir [27].

Gedikpınar çalışmasında sensörsüz olarak hız ve konum kontrolü sağlamıştır. Kullandığı fırçasız doğru akım motorunda kayma mod kontrol teorisini kullanmıştır. Kayma mod kontrol yöntemi ile değişken parametreleri olan veya harici olarak bozucu sinyallerin etkisi altında bulunan sistemlerin kontrol edilmesinde tercih edilen bir kontrol yöntemi türüdür. Yapılan yaklaşımın simülasyonunu yapmış ve olumlu sonuçlar elde etmiştir [28].

Microchip firması adına uygulama notu hazırlayan Yedemale çalışmasında fırçasız doğru akım motorlarının yapısı hakkında bilgi verdikten sonra sensörlü ve sensörsüz kontrolü, kapalı çevrim kontrolü ve zıt emk gerilimleri hakkında bilgiler vermiştir [29].

Singh ve Jain, kalıcı mıknatıslı fırçasız bir motoru DSP ile kontrol etmiş ve sürücünün matematiksel analizini gerçekleştirmiştir. En az sayıda devre elemanı ile devreyi gerçekleştiren ekip, yük altında, ilk kalkınma anında ve sürekli çalışma altında sistemi test etmiştir [30].

Aydoğdu ve arkadaşı fırçasız doğru akım motoru sürücüsünde DSP kullanarak, konum sensörsüz bir şekilde bulanık mantık ile rotorun pozisyonunu belirlemiş, bunda da zıt emk geriliminden faydalanmış ve hız kontrolünü sağlamıştır [31].

Bu çalışmada da elektrikli otomobillerde ve motosikletlerde kullanılan bir fırçasız doğru akım motoru kontrol edilmiştir. Çalışmada kullanılan FDAM, 3 kW gücünde bir motordur. Motorun içerisinde dahili Hall sensörleri mevcuttur. Bu sensörler sayesinde döner manyetik alan, rotoru takip etmektedir. Sensörlerden gelen konum bilgisi mikrodenetleyicide işlenerek, evirici katındaki MOSFET'ler kontrol edilmekte dolayısı ile motor sargılarına uygulanan gerilimin değeri ve faz sırası belirlenmektedir. Motorun gücü diğer tüm elemanların parametrelerini belirlemede önemli bir etkidir. Aslında devre tasarlanırken birçok sistemde olduğu gibi, yükten geriye doğru tasarlanmıştır. Motor gücüne göre evirici katında kullanılacak olan anahtarlama elemanlarının modeli belirlenmiştir. Anahtarlama elemanı olarak hem fiyat uygunluğu hem boyutları hemde kontrol kolaylığı nedeniyle MOSFET tercih edilmiştir. Çalışmada 43 A ve 150 V değerlerinde çalışabilen IRF3415 kullanılmıştır. MOSFET'ler gerilim kontrollü devre elemanlarıdır. Transistörler gibi akım ile kontrol edilmezler. Tam ilettime geçmesi için bir eşik değerini üzerinde gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle MOSFET'lerin daha sağlıklı kontrol edilmesi için MOSFET sürücü entegreleri üretilmiştir. Mikrodenetleyici çıkış sinyalleri MOSFET sürmede yeterli olamayacağı için birçok araştırmacı ve tasarımcı sürücülerinde MOSFET sürücü entegreleri kullanmıştır. Bu çalışmada da IR serisi 2104 modeli MOSFET sürücü entegresi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olarak Arduino Nano modeli tercih edilmiştir. Arduinonun son dönemde çok yaygınlaşması, kolay bulunması, ucuz olması, kaynak kod ve dökümanlarının olması çalışmada tercih edilmesindeki en büyük etken olmuştur. Nano modelinin seçilmesinin sebebi ise boyutlarının diğer Arduino modellerine göre daha küçük olması, analog giriş pinlerinin sayısının daha fazla olmasıdır. Sistemde kullanılan potansiyometre motorun hızını kontrol etmektedir. Potansiyometrenin değerine göre PWM sinyalinin doluluk oranı değişmektedir. Bu şekilde de motorun gerilim kontrolü yani hızı kontrol edilmektedir. Ayrıca motora bağlı bir hız sensörü

yoktur, geri besleme yapılmamıştır. Hall sensörleri ile sadece konum bilgisi alınarak kontrol edilecek faz sırası belirlenmiştir.

Sonuç olarak bir temel sürücü devresi, motordan alınan rotor konum bilgisi ile (sensörlü veya sensörsüz), kullanıcının istediği hız (potansiyometre, gaz pedalı) bilgisini alarak, mikrodenetleyici (Arduino Nano) ile işleyip, uygun kontrol sinyallerini (PWM) üretir. Üretilen sinyaller ile evirici katında kullanılan anahtarlama elemanları (transistör, MOSFET, IGBT) istenilen sırada ve zamanda kontrol edilerek motorun hız kontrolü sağlanmaktadır.



## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araç teknolojisi azalan yer altı kaynakları ve artan hava kirliliği nedeniyle çok önemli bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu araçların enerji kaynağı olan elektriğin de tamamen yenilenebilir enerji kaynağı ile üretilmesi başarıldığında sıfır atık (emisyon) ile çalışacağı söylenebilir.

Elektrikli araçların tarihi aslında çok eskilere dayanmaktadır. Lakin batarya teknolojisindeki yetersizlikler ve içten yanmalı motorların kabiliyetlerinin daha fazla olması nedeniyle gelişimi sekteye uğramıştır. Artan hava kirliliği, enerji kaynaklarındaki azalma ve fiyat artışı nedeniyle ciddi bir şekilde tekrar gündeme gelmiş, alt dalları olan güç elektroniği, batarya teknolojileri ve motorlarında geliştirilmesi ile pazarda artan bir ivme ile pay sahibi olmaya başlamışlardır.

Bu bölümde elektrikli araçların tarihi, elektrikli araç tipleri, batarya teknolojileri ve elektrikli bisikletler hakkında bilgiler verilmiştir.

### 2.1. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHİ

Elektrikli araçların bulunmasında birçok mucit ve bilim adamının adı geçmektedir. Kendi tasarladığı elektrik motoruyla 1828 yılında Macar Ányos Jedlik küçük boyutlarda bir araç tasarladı. Ondan 4-5 yıl sonra ise 1832’lerde İskoçyalı Robert Anderson elektrikli bir araç icat etti. 1835 yılında ise Hollandalı Profesör Stratingh’in bir araç yaptığı bilinmektedir [32].

Thomas Davenport, ABD’de elektrikli aracı tamamladığında yıl 1836 idi. Araç şarj edilemeyen bataryalarla çalıştırılmış ve sadece üç tekerlekli olarak tasarlanmıştır. Davenport’tan 4 yıl sonra Robert Davidson elektrikli lokomotif çalışmasını tamamlamıştır. Kurşun asit bataryalar bu dönemde geliştirilmiştir [32].

İngiltere, Fransa ve Amerika’da pek çok şirket 19. yüzyılın sonlarına doğru elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden Electrobats isimli iki koltuklu aracı geliştiren Electric Carriage and Wagon Company şirketi idi. Şekil 2.1’de Electrobats görülmektedir.



Şekil 2.1. Electrobats elektrikli otomobil [33].

Belçikalı yarışmacı Camille Jenatzy'nin 1899 yılında "La Jamais Contente" isimli araçla kırdığı hız rekoru ile 1899-1900'lü yıllarda elektrikli araçlar altın çağını yaşamıştır. Şekil 2.2'de La Jamais Contente isimli elektrikli aracın eski ve günümüzde otomobil müzesinde sergilenen hali görülmektedir.

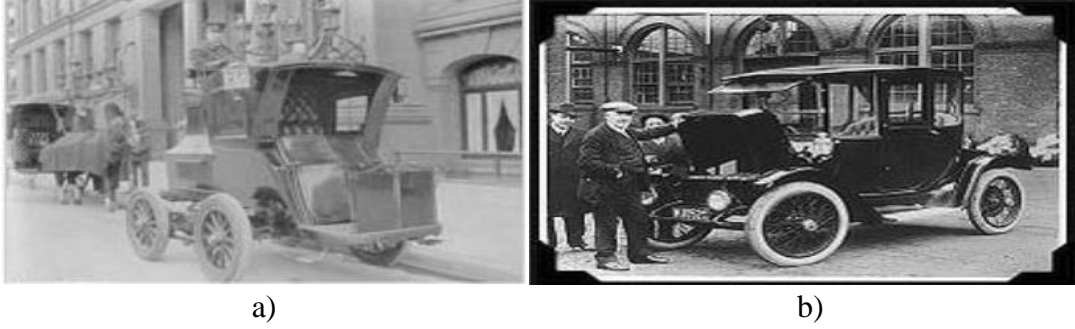


Şekil 2.2. La Jamais Contente adlı hız rekoru kıran elektrikli araç [34].

İçten Yanmalı Motorları (İYM) çalıştırmak için aracın önündeki bir kolun çevrilmesi gerekmekteydi. 1911 yılında marş dinamosunun icadıyla bu zorunluluk kalkmış, kullanım kolaylaşmıştır. Yer altı kaynaklarına yani petrole ulaşımında kolaylaşması neticesinde İYM araçlarını tekrar avantajlı hale getirmiştir. Seri üretim fikri ile maliyeti daha da düşürülen İYM'li araçlar tekrar yaygınlaşmaya başlamıştır [33].

Elektrikli araçlar ile Karl Benz tarafından Almanya'da tanıtımı yapılan Motor Wagen isimli İYM araçtan sonra iki araç türü de yaygınlaşmaya başlamıştır. İYM araçların en büyük dezavantajı gürültülü çalışması, duman ve kötü koku, bir dönem ilk hareketin kol ile verilmesi iken elektrikli araçların bugünde devam eden batarya ve menzil problemleri vardı [35].

Kayıtlı bilgilere göre 1900 yılında Amerika'da satılan araçların 1684 tanesi buharlı, 963 adedi İYM ve 1575 tanesi de elektrikli. 1897 yılında ilginç bir gelişme olarak İngiltere'de 15 tane elektrikli taksi trafiğe çıkmıştır [36]. Şekil 2.3'de 1904 yılına ait bir Alman elektrikli aracı ve Thomas Edison bir Detroit elektrikli araç ile görülmektedir.



Şekil 2.3. a) 1904 yılı Alman elektrikli arabası b) 1913 yılı Detroit aracı Edison [37].

1912 yılında elektrikli araç sayısı patlama yapmıştır. Amerika için konuşacak olursak 1918 yılında 50.000 elektrikli araç trafikte yer almıştır. Yerleşim yerleri arasındaki yolların kalitesi arttıkça insanların daha uzağa gitmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu nokta da elektrikli araçların menzil dezavantajı ortaya çıkmıştır. İYM'lerde ise böyle bir durum yoktur. Bu yıllarda bu ihtiyaçlardan ötürü hem benzin hem elektrikle çalışan yani karma (hibrid) araç fikri ortaya çıkmıştır. İlk karma araç Paris fuarında Ferdinand Porsche tarafından sergilenmiş ama karmaşık yapısı nedeniyle tutunamamıştır [38]. Takvimler 1930'lu yılları gösterdiğinde elektrikli araçlar neredeyse tamamen yok olmuştur denilebilir [39].

Elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar devam etse de giderek yollardan kaybolmasına engel olunamamıştır. 1960 yıllarında İYM'lerin çevreye verdiği zararlar görüldüğünde tekrar elektrikli araç fikri canlanmaya ve çalışmalara başlanılmıştır. İlk etapta İYM'li araçlar elektrikliye çevrilmiştir. Renault Dauphine Eureka model araç Williams şirketi tarafından elektrikli hale getirilmiştir. Bu dönüşüm işleri bazı firmalarca yapılırken baştan sona elektrikli araçlar üzerinde de çalışmalar devam ediyordu. Ford, Comuta isimli tamamen elektrikli bir araç tasarlamıştı. Şekil 2.4'de Comuta görülmektedir. İki doğru akım motoru öndeki iki tekeri kontrol ediyordu, enerji kaynağı olarak dört adet kurşun asit batarya kullanılmıştı, 64 km menzilli aracın hızı saatte 40 km idi [36].



Şekil 2.4. 1967 yılında üretilen prototip elektrikli araç Comuta [36].

Comuta'yı takiben 1968 yılında GE Delta isimli araç General Electric tarafından duyuruldu. Azami 89 km/saat hıza ulaşabilen bu araç, 64 km menzile çıkabiliyordu. Kurşun asit batarya yerine Nikel-demir bataryalar kullanılmıştı. Nikel-Kadmiyum batarya ile çalışan E-Car prototipini Ford geliştirdi. 1970'li yıllarda çıkan petrol krizi elektrikli araçlar için bir avantaja dönüşmüş, çalışmalar hız kazanmıştır. Birçok devlet bu süreçte ulusal markalarını desteklemiştir [36].

90'lı yıllarda California Air Resources Board (CARB-California Temiz Hava Ajansı) çevreyi ve havayı koruma adına daha çevreci ve verimli araçlar üzerine bir çalışma başlatmıştır. Bu süreçte Ford Ranger EV pickup truck, CryslerTEVan, GM EV1 ve S10 EV pickup, Nissan lityum-iyon bataryalı Altra EV minivagon, Honda EV plus hatchback, ve Toyota RAV4 EV gibi birçok elektrikli araç modeli geliştirilmiştir [37].

Artan çalışmalar sonucunda, 2000 yılında karma araçlarında gelişmesiyle elektrikli araç kullanımı tekrar yaygınlaşmaya başlamıştır. Elektrikli araç çalışmaları, elektrikli, karma ve yakıt hücreli olmak üzere 3 grupta ilerleme göstermektedir. Tamamen elektrikli olan araç grubu enerjisini bataryadan aldığı ve dışarıdan şarj olabildiği için en verimli araç türüdür [40].

Yakıt tüketimini azaltmak için daha küçük boyutlu tasarımlar ve tahrik olarak hibrit ve tamamen elektrikli araçlar üzerindeki çalışmalar 2000'li yıllarda ivme kazanmıştır. 2004 yılında Tesla Roadster geliştirilmiş ve satışa 2008 yılında çıkarılmıştır. Sonrasında çıkarılan bazı elektrikli araç modelleri 2010 yılında Mitsubishi MiEV ve Nissan Leaf, 2012 yılında Citroen C1 EV, REVAi, Transit Connect Electric, Mercedes-Benz Vito E-cell, Mia Electric, Tazzari Zero, Smart ED, Buddy, Wheego Whip LiFe, BYD e6, Ford Focus Electric, BMW ActiveE, Coda, Tesla Model S., Renault Fluence Z.E., Honda Fit EV şeklinde satışa sunulmuştur [37]. Elektrikli

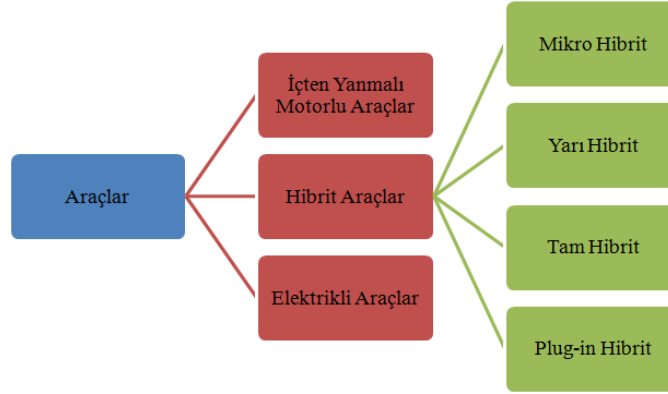
araçların gelişimine katkı sağlayan ve yön veren bazı olaylar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Elektrikli araçların tarihçesindeki bazı dönüm noktaları.

1800	Volta, primer hücre ve bataryayı geliştirdi.
1821	Faraday, elektrik motorunun temel prensibini ortaya koydu.
1834	Davenport, primer bataryalı ilk elektrikli yol aracının uygulamasını yaptı.
1859	Plante, sekonder hücre ve bataryayı geliştirdi.
1869	Gramme, 1 BG’ den daha fazla ilk DC elektrik motorunu yaptı.
1881	Trouve, sekonder bataryalı ilk elektrikli aracı yaptı.
1885	Benz, ilk İYM’li aracın uygulamasını gerçekleştirdi.
1887-1898	Avrupa’da ve Amerika’da kullanılan Elektrikli Araçların menzili geliştirildi.
1899	Camille Jenatzy, 105.9 km/saat ile 3 yıl boyunca dünya hız rekorunu kırmıştır.
1900	Eşit sayıdaki buharlı, elektrikli ve benzinli araçlar birbirleriyle yarıştı.
1900-1912	Elektrikli Araçların altın dönemi yasandı.
1921-1960	İYM araçlar tamamen yaygınlaşmaya EA ise yok olmaya başladı.
1960-1990	Elektrikli Araçlar çok az sayıda da olsa tekrar görünmeye başladı.
1990	Yeni batarya teknolojileri ile artan sayıda elektrikli araç görülmeye başladı.

## 2.2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR (EA)

İnsanın hayatını kolaylaştıran araçların başında arabalar (taşıyıcılar) gelmektedir. Gerek insan gerek hayvan ve gerekse yük taşımacılığında araçlar hayatımızı oldukça kolaylaştırmaktadır. Gelişen teknoloji ile de araçlar da birçok değişime uğramıştır. Bu değişimler sonucunda konfor, özellik, güvenlik artmış, tüketilen enerji azaltılmıştır. Şekil 2.5’de mevcut araçların çalışma türlerine göre bir sınıflandırması görülmektedir.



Şekil 2.5. Araç tipleri [41].

Elektrikli araçlar temel olarak elektrik olarak akülere depolanan enerjiyi, bir kontrol birimiyle, tahrik sistemi olarak bir elektrik motorunu kullanan araç türüdür. Mutlaka bu motorun da demir ve bakır kayıpları olacağı için yüzde yüz verimle çalışmaz. Ama iyi bir soğutma sistemi ile hem sessiz hem de daha verimli çalışması sağlanabilir [42].

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla araç kaynaklı çevre kirliliğinin zararları azalmaya başlamıştır. Ayrıca elektrikli araçların verimliliği, sessiz olmaları, motor güçleri ve torkları büyük avantaj sağlamaktadır. Güvenli ve kontrollü sürüş tekniklerinin uygulanmasıyla, elektronik ve batarya sistemlerinin de gelişimiyle daha da yaygın hale gelmeye başlamıştır. Yine elektrikli araçlarda İYM araçlardaki gibi hareket aktarımı için mekanik ekipmanlar olmadığı için çalışması daha kolaydır. Tekerlek tipi motorlarında gelişmesiyle üretilen hareket direk tekerleğe verilmektedir [42].

Araçlarda 1930 yılında ilk defa radyo ile başlayan elektronik sistemlerin kullanılması, transistörün icadından sonra da çok daha fazla kullanılmaya başlanmıştır [43]. Elektronik sistemler araçlara birçok özelliğin gelmesine sebep olmuştur. Mekanik kontrol sistemlerinin yerini elektrikli sinyallerle kontrol sağlayan sistemler almıştır [44].

Enerji kaynakları genellikle akü tarzı bataryalar ile süperkapasitörler kullanılmaktadır. Dışarıdan şarj imkanı olduğu gibi, motorların frenleme esnasında ürettiği enerji ile de rejeneratif olarak şarj olabilmektedir.

Her araç türünün mutlaka olumlu ve olumsuz yanları mevcuttur. Çizelge 2.2’de elektrikli araçların İYM’lere göre olumlu ve olumsuz yanları görülmektedir [45].

Çizelge 2.2. EA ve İYM karşılaştırılması [45].

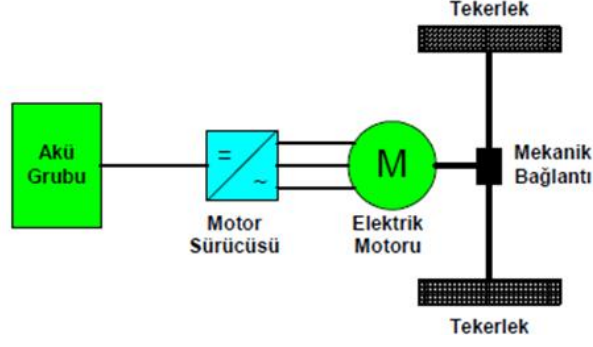
EA'ların Olumlu Özellikleri	EA'ların Olumsuz Özellikleri
* Sessiz çalışma.	* Fiyatı.
* Çevreye daha duyarlı.	* Batarya maliyeti.
* Daha az mekanik parça.	* Batarya ömrünün az, ağırlığının fazla olması.
* Daha verimli.	* Bataryaların iklim değişikliğinden etkilenmesi.
* Bakım maliyeti daha az.	* Su ve nem izolasyonu gerektirmesi.
* Daha kısa sürede kalkış.	* Mesafe, menzil.
* Ucuz ve uzun ömürlü motor.	* Şarj istasyonlarının azlığı.

### 2.2.1. Tümü Elektrikli Araçlar (EA)

Elektrikli araçların (EA) tümünde en az bir elektrik motoru bulunmaktadır. Bu motorun enerji kaynağına göre araçlar tiplere ayrılmıştır. Eğer bir elektrikli araç, enerji kaynağı olarak bataryaları yani aküleri kullanıyorsa bu araç tümü elektrikli araç grubuna girmektedir. Akülerden aldığı enerji ile hem motor hızını kontrol edilir hem de diğer elektronik sistemlere de enerji verilmektedir. Sistemin kontrolcüsü, kullanıcının istediği hız bilgisine göre tekerin hız bilgisini sensörlü ve ya sensörsüz yöntemlerle elde ederek, iki hız bilgisini karşılaştırıp buna göre evirici katındaki anahtarlama elemanlarının çalışma hızını kontrol ederek, motorun gerilimini değiştirip hızını kontrol etmektedir.

Tümü elektrikli araçların çevreye verdikleri zarar en az hatta sıfır emisyon kabul edilse de aracın şarj edildiği elektriğin üretim metodu, aracın bu özelliğini etkilemektedir. Eğer ki araç yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik ile şarj ediliyorsa gerçekten de sıfır emisyon bahsetmek mümkün olacaktır. Bir ülke elektriğini tamamen fosil yakıtlardan üretiyor ama elektrikli araç kullanıyorsa o ülkedeki araçlarda sıfır emisyon bahsedilemeyecektir [46].

Yüzde 46 verimle çalıştığı ve giderek veriminin arttığı bilinen elektrikli araçlar, yüzde 18-25 aralığında çalıştığı bilinene İYM araçlara kıyasla hala çok verimlidir [47]. Şekil 2.6'da tümü elektrikli araçları oluşturan temel bileşenler görülmektedir.



Şekil 2.6. Tümü elektrikli araç [36].

Çizelge 2.3’de elektrikli araçlarda kullanılan motor tipleri görülmektedir. İlk zamanlar doğru akım motorları ile kontrol edilen araçlar, güç elektroniğinin gelişimi sayesinde, doğru akım kaynağı bataryaların enerjisinin alternatif akıma çevrilebilmesi sonucu alternatif akım motorları da kullanılmaya başlanmıştır [48].

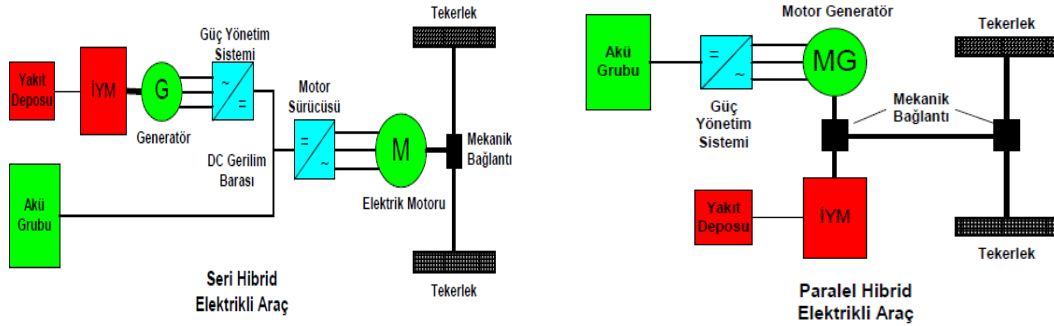
Çizelge 2.3. Elektrikli taşıt modellerinde kullanılan elektrik motoru tipleri [36].

Elektrik Motoru Tipi	Kullanıldığı Elektrikli Araç
DC motor	Citroen AXSaxo, Peugeot Electic, Lada Rapan
Fırçasız DC motor	Daimler Chrysler Zyteck Smart EV
SM senkron motor	Honda EV Plus, Nissan Hypermini, Dahatsu Hijet EV
Üç fazlı indüksiyon motor	Ford Think City, GM EV1, Fiat Seicento, Ford e-Ka
AC indüksiyon motor	Renault Clio Electric
AC motor	Mazda Road Ster EV

### 2.2.2. Karma (Hibrid) Elektrikli Araçlar (HEA)

Karma (hibrit) araç, birden fazla ve farklı enerji kaynağı barındıran, en az birinin elektrik enerjisi verebildiği araç tiplerine verilen addır. Bu tip ile hedeflenen, İYM’lerin zararlarını azaltmaktır. Gerektiği zaman bataryalar gerektiğinde de İYM bölümü devreye girecektir. Özellikle şehir içi trafiğindeki durma kalkma durumunda elektrikle kalkış yapmak daha ekonomik olmaktadır. Ayrıca elektrik motorunun karakteristiği nedeniyle frenleme anında dinamo olarak da kullanılabilen motor, batarya şarjında kullanılabilir. Üç tip hibrit yapı vardır. Bunlar seri, paralel ve seri paralel hibrid yapılarıdır. Şekil 2.7’de seri ve paralel hibrid araç temel yapıları görülmektedir [50]-[50]. Ayrıca uzun mesafeli yolculuklarda İYM ile elektrikli araca takviye yapmak aracın menzilin arttırmaktadır [51].

İlk karma aracın Ferdinand Porsche tarafından yapıldığı bilinmektedir. “Mixte-Wagen” isimli aracında Daimler motoru kullanmış, araca akü, dinamo ve elektrikli motor bağlamıştır. Araçta benzinli motor dursa bile akülerden aldığı elektrikle çalışmaya devam etmiştir [48].



Şekil 2.7. Seri ve paralel karma (hibrid) elektrikli araç [36].

### 2.3. ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER

Günümüzde elektrikli araçlar kadar elektrikli bisiklet ve motorsikletlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle düz bir coğrafya sahip bölgelerde tercih nedenidir. Elektrikli bisikletlerde şu an hub motor denilen tekerlek tipi fırçasız doğru akım motorları sensörlü olarak kullanılmaktadır.

Ticari değeri önemli bir yere sahip olan bisikletlerin yaygınlaşması hukuki zorunlulukları da beraberinde getirmiştir. EN 15194 numaralı Avrupa standardı ile elektrikli bisikletlerin özellikleri ve sınırları belirlenmiştir. Bir elektrikli bisiklet en fazla 250 Watt anma gücünde olmalıdır. 25 km/saat hızı geçmemelidir. Yukarı hızlara sürücü kendi beden gücü ile ulaşmalıdır. Pedal destekli araçlar önceki bölümlerde anlatıldığı gibi karma araç (hibrit) girmektedir. Pedal destekli olduğu için bataryadaki enerji bitse dahi hareketine devam edebilmektedir. Elektrikli araçların günlük yaşantımıza girişini hızlandıran bir rolü vardır.

Güvenlik nedeniyle 48 V batarya sınırı koyulmuştur. Bu kuralların koyulma nedeni, elektrik destekli bisikletlerin normal bisiklet sınıfında kalabilmesi içindir. Normal bisikletler için geçerli olan tüm kurallar pedal destekli bu elektrikli bisikletler içinde geçerlidir.

Elektrikli bisikletler için de birçok çalışmalar mevcuttur. Tañç'da çalışmasında EN15194 standartlarını benimsemiş, tasarladığı elektrikli bisiklet motorunda maksimum

gücü 250 Watt olarak belirlemiştir. Enerji kaynağını ise 36 V akü ile sağlamıştır. Ek güç aktarma organları kullanmamak için ise rotor tipi olarak dış rotorlu yani tekerlek tipini seçmiştir. Elektrikli bisikletlerin tüm bileşenleri elektrikli araçlar için gerekli olan bileşenlerle aynıdır. Batarya, sürücü ve motordan oluşan bir sistem yapısına sahiptir. Motor farklı konumlarda yerleştirilebilse dahi en verimli konum arka tekerdir. Bu nedenle birçok avantajından dolayı hub motor tercih edilmektedir [52].

## 2.4. BATARYA TEKNOLOJİLERİ

Batarya teknolojisi elektrikli araçların gelişmemesindeki en büyük neden olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan bataryalar ile başlayan süreç bugün 500-600 km mesafeye gidebilen araçlar durumuna gelmiştir.

Thomas Davenport'un 1836 yılında tamamladığı araç şarj edilemeyen bataryalarla çalıştırılmıştır. Davenport'tan 4 yıl sonra Robert Davidson elektrikli lokomotif çalışmasını tamamlamıştır. Kurşun asit bataryalar bu dönemde geliştirilmiştir [2].

Bataryanın türü kadar şarj etme de elektrikli araçlar için büyük bir problem olmuştur ve olmaktadır. Bu sorunu çözmek için farklı yöntemler ortaya konulmuştur. Örneğin kullanıcılara değiştirilebilir batarya hizmeti sunan şirketler kurulmuştur. Bu sistemde araç bir firmadan batarya ise değiştirme hizmeti veren firmalardan alınıyordu. Mil başına bir ödeme yapıyorlardı. Bu yöntem ile 1910 ile 1924 yılları arasında 6 milyon mil den fazla bir ulaşım hizmeti sağlanmıştır [37].

Çizelge 2.4'de elektrikli araç tiplerine göre kullanılan batarya, tahrik sistemi, enerji kaynağı gibi etkenlerin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.4. Elektrikli araç tipleri ve karşılaştırmaları [36].

EA Çeşitleri	Tümü EA'ları	Karma EA'ları	Yakıt Pilleri EA'lar
<b>Tahrik</b>	* Elektrik motorlu tahrik	* Elektrik motorlu * İYM'lu tahrik	* Elektrik motorlu tahrik
<b>Enerji Sistemi</b>	* Batarya * Süperkapasitör	* Batarya * Süperkapasitör * İYM üretim birimi	* Yakıt pilleri

Çizelge 2.4 (devam). Elektrikli araç tipleri ve karşılaştırmaları [36].

<b>Enerji Kaynağı ve Altyapı</b>	* Elektrik şarjı	*Benzin * Normal menzil * Alternatif yakıtlar	* Benzin * Elektrik şarjı * Alternatif yakıtlar
<b>Karakteristikler</b>	* 0 emisyon * 100-200 km kısa menzil * Pazarda mevcut	*Çok düşük emisyon * Normal menzil * Pazarda sınırlı	*Çok düşük emisyon * Hidroje depolama
<b>Ana Sorunlar</b>	* Batarya teknolojisi * Şarj özellikleri	*Batarya teknolojisi * Enerji yönetimi	*Yakıt pili teknolojisi *H Teknolojisi

Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan bataryaların yüksek özgül güç ve enerji, yüksek şarj deşarj ömrüne sahip olması istenir. Özgül enerji yoğunluğundan kasıt enerji kaynağının birim kütlesi başına depoladığı enerjidir. Özgül güç ise aynı kütlenin verdiği güçtür. Bataryalar (akü ve piller) ve süper kapasitörler başta olmak üzere volan gibi enerji depolama yöntemleride araçlarda kullanılabilir [36].

Bataryaların özgül güç yoğunluğunun fazla olması tek başına yeterli olmayacaktır. Bu bataryaların en kısa sürede de şarj edilmesi ve ömrünün artması da önem arz etmektedir [54]. Bu alanlarda çalışmalar sürerken şarj sistemleri üzerinde de çalışmalar, iyileştirmeler devam etmektedir. Günümüzde yaygın olarak ferrezonanslı şarj cihazları, anahtarlamalı şarj cihazları ve Tristör (SCR) şarj cihazları kullanılmaktadır. Ferrezonans ve Tristör kontrollü şarj cihazları güvenli, sağlamdırlar ve yıllardır kullanılmaktadırlar. Lakin gelişen güç elektroniği ile birlikte anahtarlamalı şarj cihazları yüksek verimleri, küçülen boyutu, hızlı ve hafif olması nedenleriyle diğerlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir [54].

Ülkemizde de giderek artan elektrikli araç sayısının, yapılan pazar analizlerine göre önümüzdeki birkaç yıl içinde daha da hızlı artacağı belirtilmektedir. Bu nedenle bazı Türk şirketleri, ürettikleri şarj istasyonlarını ülke çapında yerleştirmeye çalışmaktadır. Vestel tarafından üretilen ve tasarımı ile ödüllü şarj istasyonlarının kurulumları devam etmektedir. Şekil 2.8’de bir elektrikli araç ve şarj istasyonu görülmektedir. Zorlu Enerji grubu 2019 yılı sonuna kadar 200 adet şarj istasyonunun kurulumunu tamamlamayı hedeflemektedir [55].

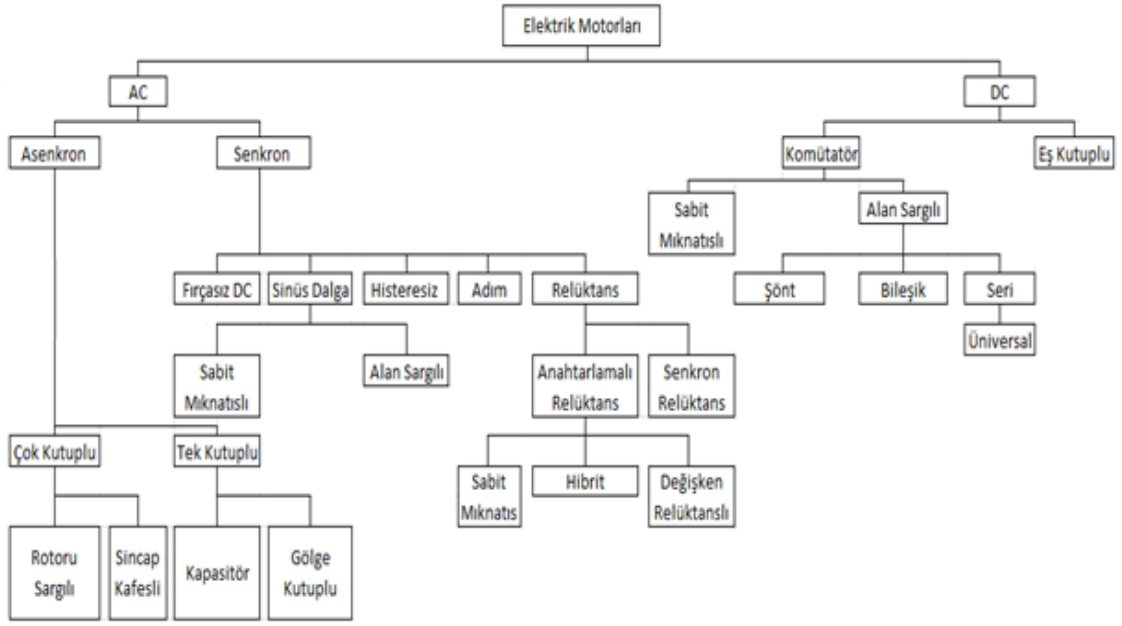


Şekil 2.8. Zorlu Enerji tarafından kurulmuş tamamlanmış bir şarj istasyonu [55].



### 3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN MOTORLAR

Motor bir elektrik makinasıdır. Elektrik makinası manyetik alan ve indüksiyon etkisi ile ya elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirir ki bu durum motor çalışma olur ya da mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevir bu da elektrik makinasının generatör/dinamo çalışması olmaktadır. Şekil 3.1'de mevcut motorların bir sınıflandırılması görülmektedir [56].



Şekil 3.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması [56].

Günümüzde DA motorları ekonomik olmadıkları için çok kullanılmamaktadır. Bakım ihtiyacı az olan AA motorlar ve fırçasız DC motorlar hem daha verimli hem de bakım maliyetleri az olduğundan tercih edilmektedirler [56].

Elektrikli araçlarda tahrik sistemi için normal olarak elektrikli motor kullanılması gerekmektedir. Çok farklı tipte, beslemede elektrik motoru geliştirilmiştir ve piyasaya sunulmuştur. Zamanın şartlarına göre elektrikli araçlarda birçok farklı tipte motor denenmiştir. İlk dönemlerde güç elektroniği gelişmediği için, bataryalar doğru akım kaynağı olduğundan doğrudan DC motorlar kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ile DC/AC çevrimi mümkün olduğundan AC motorlar da tercih edilmiştir.

Türü ne olursa olsun bir elektrikli araç için motor seçiminde dikkat edilen özellikler şunlardır:

Kalkış anı için yüksek güç.

Yüksek güç yoğunluğu.

Düşük hızlarda bile yüksek tork.

Sabit tork ve sabit güç aralığında ayarlanabilen geniş hız aralığı.

Yüksek verim.

Güç geri kazanımında (rejeneratif) yüksek verim.

Sağlamlık

Ekonomiklik [36].

Bu şartları sağlamak koşuluyla elektrikli araçlarda genellikle DC motor, Asenkron motor, Sürekli (daimi) mıknatıslı motor ve Anahtarlama Relüktans Motor (ARM) kullanılmıştır [36].

### **3.1. KULLANILAN MOTOR TİPLERİ**

Bir elektrikli aracın kullanım alanı ve şartlarına göre farklı motor tipleri kullanımı tercih edilse de en çok kullanılan motor tipleri DC motor, Asenkron motor, Sürekli (daimi) mıknatıslı motor ve ARM'dır.

#### **3.1.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM)**

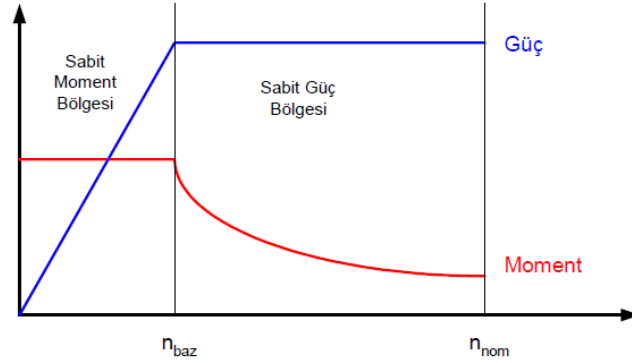
Gelişen teknoloji ile daha güçlü mıknatısların üretilmesi, güç elektroniğindeki gelişmeler ve mikrodenetleyicilerdeki hız ve kontrol kabiliyetinin artması SMSM'lere olan ilgiyi arttırmaktadır. SMSM'ler FDAM ve SMSM olmak üzere iki grubu ayrılır. En belirgin farkları ise ürettikleri zıt emknın şeklidir. FDAM'larda yamuk (trapezoidal) şeklinde bir sinyal gözlenirken SMSM'lerde sinüsoidal bir sinyal şekli görülmektedir. Bu dalga şekli motora ait sürücünün de tasarımını etkilemektedir. SMSM'lerin diğer motorlara göre tercih edilmesindeki etkenler Çizelge 3.1'de görülmektedir. Bu avantajlarına rağmen yüksek sıcaklıklarda çalışmaması, mıknatıslarının özelliklerini kaybetme riski ve fiyatının yüksek olması nedeniyle her uygulamada kullanılamamaktadır [57].

Çizelge 3.1. SMSM'lerin diğer motorlara göre avantajları [57].

Değişimlere ani tepki.	Uzun çalışma zamanı.
Sessiz çalışma.	Yüksek güç yoğunluğu.
Yüksek tork/eylemsizlik oranı.	Yüksek tork/hacim oranı.
Yüksek hava aralığı akı yoğunluğu.	Tepkisinin doğrusallığı.
Yüksek güç katsayısı.	Verimli olması.
Bakım maliyetinin azlığı.	Tümleşik yapı.

### 3.1.2. Doğru Akım Motorları (DC)

DC motorlar fırçalı yapıya sahip, rotoru da statoru da sargılardan oluşur. Bir sargının üretmiş olduğu manyetik alan, diğer sargıda bir akım, dolayısıyla yeni bir manyetik alan oluşmasına neden olur. Bu alanların itme ve çekme kuvveti ile hareket elde edilir. Fırçalı motorların fırça kayıpları nedeniyle verim azalmakta, bakım giderleri artmaktadır. Bu nedenle sanayide tercih edilmediği gibi elektrikli araçlarda da kullanımı azdır. Şekil 3.2'de bir dc motorun çalışma bölgeleri görülmektedir.



Şekil 3.2. DC motor çalışma bölgeleri [36].

### 3.1.3. Asenkron Motorlar

Basit ve sağlam olması nedeniyle sanayide çok kullanılan asenkron motorlar elektrikli araçlarda da çok tercih edilen bir motor türüdür. İhtiyaca ve yüke göre üç ya da tek faz üretilir. Kısa devre kafesli (rotoru sargısız) ve bilezikli (rotoru sargılı) olmak üzere iki türü vardır. Statora uygulanan alternatif akım döner manyetik alanı oluşturur. Rotordaki iletken yapıda ise indüksiyon ile bir gerilim indükler ve akım oluşturur.

Sağlam yapısı sebebiyle elektrikli araçlarda sincap kafesli asenkron motorlar tercih edilir. Hız kontrolü DC motorlara göre daha karmaşıktır. Elektronik sürücüler ile anahtarlama yöntemleri kullanılarak DC gerilimin AC'ye çevrilmesi ile kontrol edilir.

Motorların hız kontrol yöntemleri vektörel kontrol ve skaler kontrol diye iki gruba ayrılmaktadır. Klasik asenkron motor kontrol yöntemi olan V/f yani gerilim frekans kontrolü skaler bir kontrol yöntemidir. Lakin elektrikli araçlarda kontrol yöntemi olarak vektörel kontrol yöntemleri tercih edilir. Çünkü elektrikli araçlar yüksek performans isterler ve bu da vektörel kontrol yöntemleri ile motora uygulanan gerilimin genliği ve faz açısı değiştirilerek sağlanır [36].

#### **3.1.4. Anahtarlama Relüktans Motoru (ARM)**

Bu motorun en belirgin özelliği mıknatıs ve sargılardan oluşmayan bir rotor yapısına sahip olmasıdır. Stator ve rotor ince çelik tabakalardan meydana gelmektedir. Statorda birbirinden bağımsız sargılar vardır ve sırasıyla DC kaynak ile beslenirler. Dönüş yönü kontrolü fazların ters çevrilmesi ile mümkündür. Basit yapısı, üretim maliyeti gibi avantajları vardır. EA'lar için yeterli moment/hız karakteristiğini gösterebilmektedir. Kayıpların çoğunluğu statorda oluşur ve bu da soğutmayı kolaylaştırır. Çok fazlı yapısı sayesinde sargılardan biri bozulsa bile hareketine devam edebilir [36].

Değişken hız uygulamalarında basit ve dayanıklı olan yapısı, ekonomik olması, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimli olması ile değişken hız uygulamalarında tercih edilir hale gelmiştir. Ofis araçlarından, uzay araçlarına, elektrikli otomobillerden radarlara, madencilik teknolojilerinden otomatik kapı sistemlerine, su pompalarından elektrikli ev aletlerine kadar yaygın bir kullanım alanı vardır [36].

#### **3.2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI (FDAM)**

Gelişen yarıiletken teknolojisi, hızlanan ve kararlı çalışan mikrodenetleyicilerin üretilmesi, mıknatısların güç yoğunluklarının artması ve farklı algoritma yöntemlerinde bulunmasıyla FDAM'larının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [59], [59].

FDAM'lar AC senkron motor grubuna girmektedir. Doğru akımla beslendiği için doğru akım motoru adını alsada doğru akım sürücü devresi için gereklidir. Aslında sürücü devresi içerisindeki evirici (inverter) katı bu DC gerilimi AC'ye çevirmektedir. Bu nedenle AC motor olarak sınıflandırılır [60]. Elektronik komutasyonla kontrol edilir ve

rotor konumunun bilinmesi gerekir. Rotor ile döner manyetik alan aynı hızda döner, asenkron motorlardaki gibi bir kayma yoktur. Rotor konumu sensörlü ve sensörsüz yöntemlerle tespit edilebilir. Fırçalı motorlarda konum bilgisine gerek yoktur, rotor üzerindeki mekanik komutatör sayesinde değişim kendiliğinden sağlanır. FDAM'ın en belirgin özelliği yamuk şeklinde (trapezoidal) olan zıt emk'sıdır. Bu yüzden kare dalga biçiminde akımla kontrol edilirler. Yamuk biçimli emk'ların işlenmesi zor bir süreçtir, birçok farklı yöntem ile (Fourier dönüşümü, sonlu elemanlar yöntemi, parçalı lineer metot vb) analiz edilir [61].

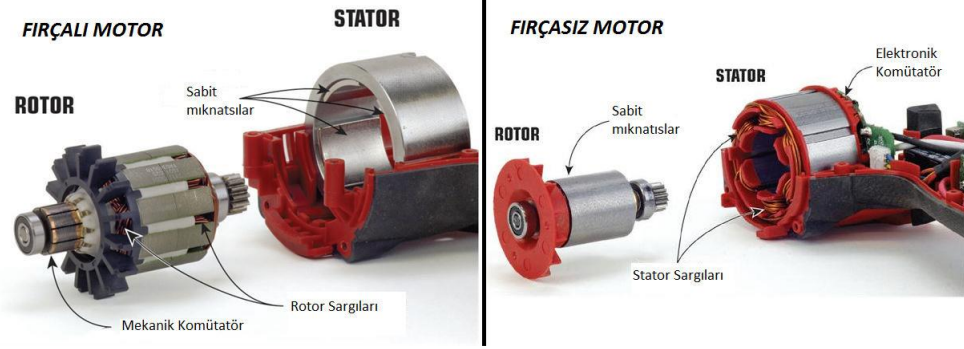
Fırçalı motorlarda fırçalarla oluşturulan manyetik alan FDAM'larda doğal yollarla oluşturulduğundan fırça ve diğer ekipmanlara gerek duyulmaz. Bu bölgede oluşan kayıplarda doğal olarak engellenmiş olur. bu nedenle fırçalı motorlara göre çok daha verimlidirler. Aynı güçteki fırçalı ve fırçasız motor karşılaştırıldığında FDAM'ların veriminin fazla, atalet momentinin düşük, hız denetiminin kolay ve kütle başına yüksek moment sağladığı görülür [3]. FDAM'ların olumlu ve olumsuz yanları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [62], [63].

Çizelge 3.2. FDAM'ların olumlu ve olumsuz yönleri [62], [63].

<b>OLUMLU YANLARI</b>	<b>OLUMSUZ YANLARI</b>
Kolay hız kontrol imkanı.	Karmaşık elektronik kontrol devresi vardır.
Yüksek verim.	Rotor konum sensörlerine ihtiyaç duyar.
Fırçasız tasarım nedeniyle ark oluşmaz.	Maliyetleri yüksektir.
Kütle başına yüksek moment.	
Uyarma akımı ihtiyacı yoktur.	
Güvenlik ve kolay soğutma.	
Yüksek hızda ve sessiz çalışma.	

FDAM'larını kontrol etmek için iç kontrol ve dış kontrol çevrimi olmak üzere iki çevrim kullanılır. İç kontrol yönteminde motorun akımı veya momentini kontrol edilir. Bu yüzden sargı akımları sürekli izlenir. Dış kontrol yönteminde ise rotor konum sensörlerinden gelen bilgi ile hız kontrolü sağlanır [4].

Şekil 3.3'de fırçalı motor ile fırçasız motorun içyapısı görülmektedir. Çizelge 3.3'de ise iki motorun temel özelliklerin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.3. Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının içyapıları [15].

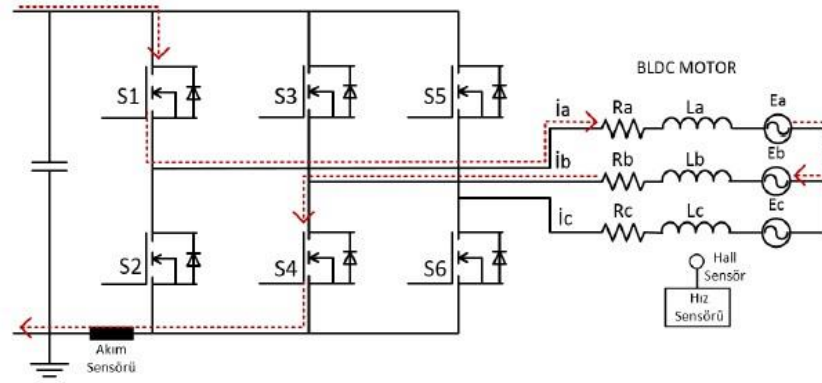
Çizelge 3.3. Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının karşılaştırılması [15].

	Fırçalı tip d.a makinası	Fırçasız tip d.a makinası
Komutasyon	Mekanik	Elektronik
Boyut	Büyük	Küçük
Güç(watt)	Yüksek	Düşük
Güç Yoğunluğu(watt/kg)	Düşük	Yüksek
Maksimum Hız (rad/d)	Düşük	Yüksek
Hız Kontrolü	Basit	Karmaşık
Atalet	Yüksek	Düşük
Bakım	Gerekli	Gereksiz
Soğutma	Zayıf	İyi

FDAM'ları farklı sayıda fazlarda üretilebilir. En yaygın olanı üç fazlı olan modelidir. Üç fazdan sadece ikisine enerji verilir, üçüncü faz o anda boşta kalır. Enerji verilecek fazlar rotor pozisyonuna bağlıdır ve konum sensörlerinden gelen bilgiye göre enerjilendirilir. Düşük maliyetli ve basit ürünler için bir ve iki fazlı FDAM'lar tercih edilir [20].

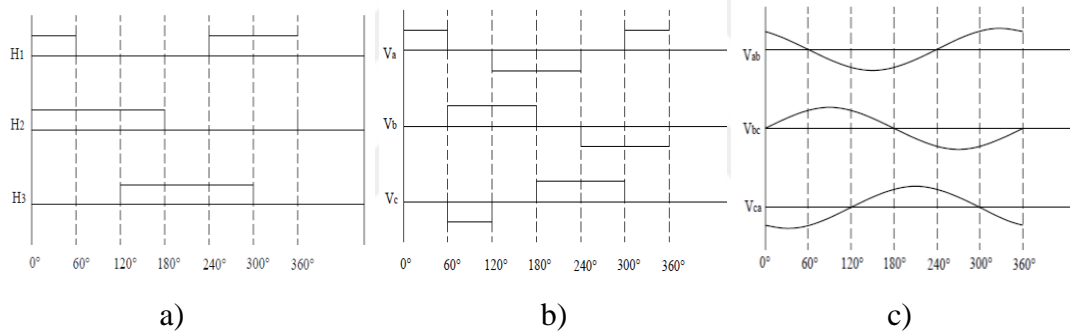
Motorun sargısı ne kadar çok ise o kadar kararlı hareket eder ve güç tüketimi de azalmaktadır. 15 faza kadar üretilebilirler lakin bu özel tasarım gerektirir. En yaygın olanı üç, dört ve beş fazlı motorlardır [62].

Altı adım sürücü yöntemi üç fazlı FDAM'larda kullanılan en basit yöntemlerden biridir. Şekil 3.4'de bu yöntem ile oluşturulmuş sistem ve herhangi bir andaki akımın yönü görülmektedir.



Şekil 3.4. FDAM sürücü devresi [52].

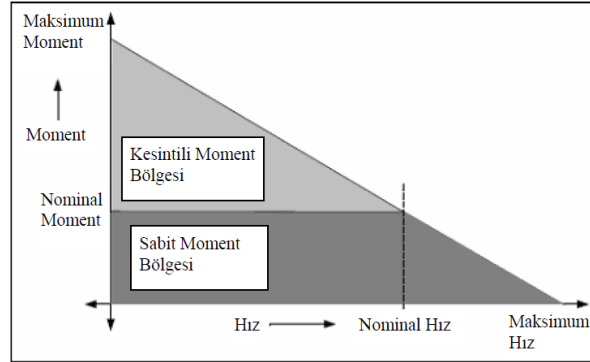
Şekil 3.5.a'da görüldüğü gibi sensörlerden gelen konum bilgisine göre motor sargılarına Şekil 3.5.b'deki gerilimler uygulanır. Bu gerilim, sürücü devresindeki anahtarlama elemanlarının açılıp kapanmasıyla elde edilir. Boşta kalan üçüncü fazlarda ise Şekil 3.5.c'deki zıt emk sinyalleri elde edilir [64].



Şekil 3.5. FDAM'larda kontrol işlemleri ve sinyalleri a) Hall sensör sinyalleri b) Faz gerilimleri c) Zıt Emk gerilimleri [64].

Bir motor ile ilgili bir tasarım yapmadan önce birçok tasarımcı benzetim programlarında sistemini simüle etmektedir. Bu nedenle birçok elektriksel yükün temsil edildiği matematiksel ifadeler vardır. Bu matematiksel modelleme olarak bilinir. Sistemde mevcut olan bütün değişkenler, parametreler, yükler vs modellemede ifade edilmelidir. Değişken katsayılarda modellemeler sırasında genellikle ya sabit ya da doğrusal kabul edilir. Bu kabulün adı doğrusal yaklaşım yöntemidir. FDAM'lar içinde bazı matematiksel modellemeler ve kabuller vardır. Bu kabullerle tasarlanan benzetim üzerinden sistemdeki motorun akımı, momenti, hızı ve rotor konumu kontrol edilebilir [65].

Bir motorun kontrolünde moment hız grafiği önemli yer tutar. Bu grafiğe göre motorun çalışma bölgesi incelenerek kontrol sağlanır. Şekil 3.6'da FDAM için hız moment grafiği görülmektedir.



Şekil 3.6. FDAM için Hız/Moment eğrisi [66].

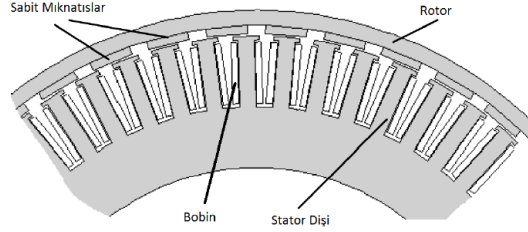
FDAM'ların kataloglarında bazı terimler çalışmalar için önemlidir. Durdurma anındaki sürekli RMS akımı değeri olan  $I_s$  (A), 40 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda motor belirtilen bu akımda durdurulabilir ya da düşük hızlarda sürekli çalıştırılabilir.  $kT$  (N.m A), moment sabitidir ve moment duyarlılığı olarak da bilinir. Bir faz akımı değeri için ürettiği moment miktarını ifade eder.  $kE$  (V.srad) ters emk sabiti, motorda kullanılan mıknatısların oluşturduğu alanın mukavet değeridir. Mıknatısların manyetik alanının sargılarda oluşturduğu gerilimdir.  $V.srad$  veya  $V.dak dev$  ile ifade edilir.  $m\tau$  (s) mekanik zaman sabiti olarak bilinen terim motor terminallerine uygulanan birim adım geriliminin motor hızındaki başlangıç artım oranıdır. Elektriksel zaman sabiti  $e\tau$  (s) duran motor şaftının sıfır empedans değerinde iken bataryadan gerilim uygulanması halinde stator akım cevabının zaman cinsinden değeridir [67].

FDAM'larda rotor konumunun hassas bir şekilde ölçülmesi için denetleyici kullanılması zorunludur. İki grupta denetleyici kullanılmaktadır. Birinci grup klasik yapıdaki PI ve PID tipi denetleyicilerdir. İkinci grup denetleyiciler ise modern yapılı denetleyicilerdir. Bu yöntemlerden bazıları bulanık mantık, yapay sinir ağları, lineer karesel, genetik algoritma ve kutup geri beslemedir [68].

### 3.2.1. FDAM İç Yapısı

FDAM'lar birçok motor gibi duran parçası stator ve hareketli parçası rotordan oluşmaktadır. Eğer hub motorlarda olduğu gibi sensör motora dahili olarak üretilirse sensör de motorun bir parçası sayılır. Rotor konumunu belirlemek için kullanılır. Rotor, mıknatısları taşımaktadır. Stator ise sargıların olduğu bölümdür. Yapı itibari ile AC

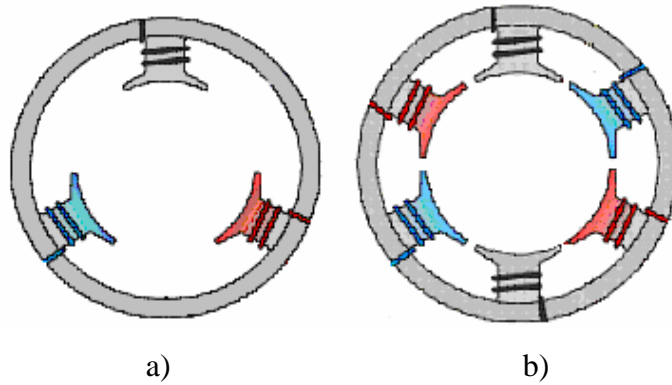
motorlara çok benzemektedir. Şekil 3.7’de bir FDAM’ın bileşenleri görülmektedir. Rotorun konumu (içerde, dışarıda) değişebilir ve buna göre FDAM’lar üç gruba ayrılır [69], [70].



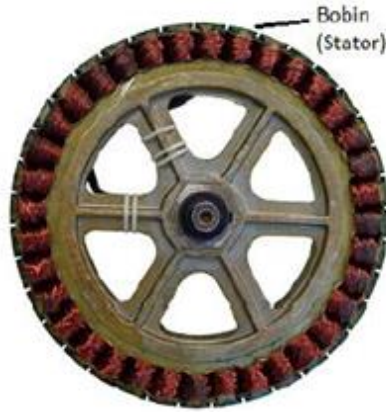
Şekil 3.7. Bir FDAM’ın yapısı [17].

### 3.2.1.1. Stator

Hareketsiz olan bu bölüm sargı iletkenlerinden oluşur. Farklı faz sayısında sargılardan oluşabilir. Motor güçlü ise o aranda akım çekecektir. Bu yüzden sargı iletkenleri de daha kalın olacaktır. Bu da motorun büyümesine neden olacaktır. Sargılar çıkıklara sarılır ve kayıpları azaltmak için silisli saçlardan yapılır [23]. Şekil 3.8’de farklı kutup sayılarına göre tasarlanmış stator yapıları ve Şekil 3.9’da gerçek bir dış rotorlu FDAM’a ait stator görülmektedir.



Şekil 3.8. Farklı kutuplu stator yapıları a) 2 kutuplu stator b) 4 kutuplu stator [23].

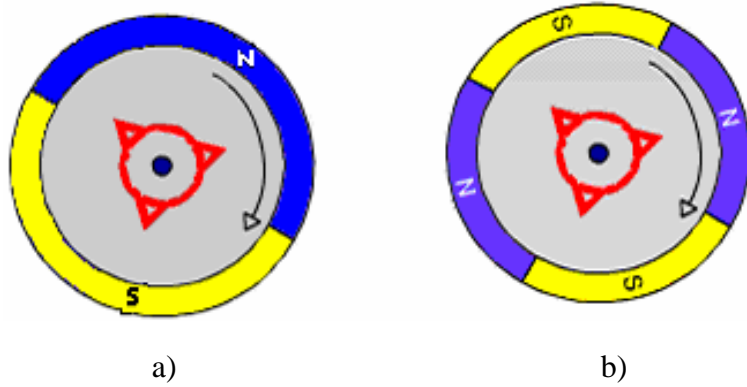


Şekil 3.9. Dış rotorlu FDAM'a ait stator [17].

### 3.2.1.2. Rotor

Fırçasız doğru akım motorları, fırça kullanmadığı için, rotoru mıknatıslı yapıdadır. Çalışmanın konusu olan motor, rotoru dışta yani tekerlek tipi bir motordur. Rotor motorun hareketli yani dönen bölümüdür. Eğer rotor mıknatıslı ise bilinmelidir ki rotor sabit mıknatıslardan oluşmuştur ve manyetik alanın kaynağı mıknatıslardır. Rotoru mıknatıslı motorlarda fırça sistemi olmadığı bilinmelidir. Dolayısı ile fırçalı motorlarda oluşan ses, ışık gibi verimi düşüren, aşınma ve eskime gibi bakım gerektiren durumlar oluşmamaktadır [23].

Şekil 3.10'da farklı kutuplarda rotor yapıları görülürken Şekil 3.11'de gerçek bir motora ait rotor görülmektedir. Rotorlarda kullanılan mıknatıs türleri; alnico, ferrit veya nadir toprak elementi mıknatıslarıdır [19].



Şekil 3.10. Farklı kutup sayılarında FDAM rotoru yapısı a) 2 kutuplu rotor b) 4 kutuplu rotor [23].



Şekil 3.11. Dış rotorlu FDAM'a ait rotor [17].

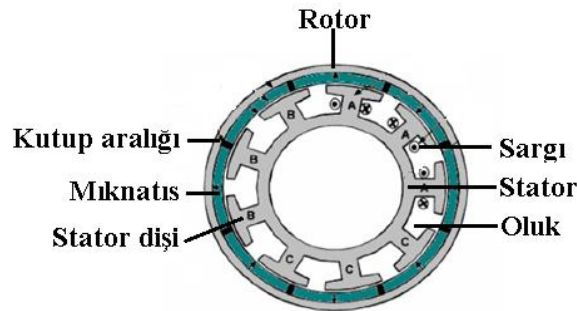
### 3.2.2. FDAM Tipleri

FDAM motorlar rotor yapısına göre gruplara ayrılmıştır. Rotor dış yüzeyde ise dış rotorlu, iç yüzeyde ise iç rotorlu, rotor ile stator karşılıklı ve bir disk üzerinde ise disk tipi motor adını almaktadır [25].

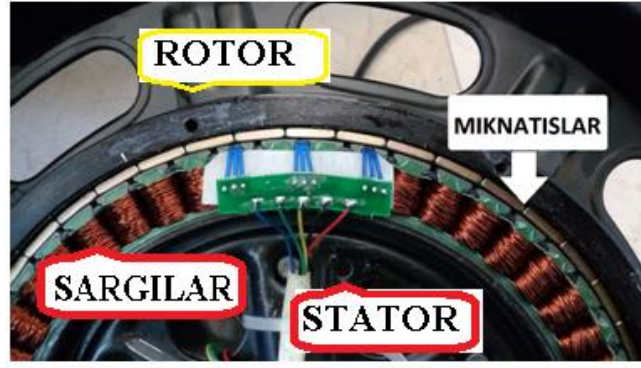
Ayrıca motorun sensörlü olup olmamasına göre de motorlar iki gruba ayrılmaktadır. Sensörlü motorlar rotor konumunu daha hassas verebildiği için kontrol etmek daha kolaydır ve daha verimlidir. Sensörsüz yapıda ise boşta enerjisiz kalan faz sargısında oluşan zıt emk yorumlanarak konum belirlenmeye çalışılır bu da zor ve pahalı bir işlemdir. Ayrıca bu motorlar sensörlü motor kadar yüksek hızlara ulaşamazlar [71].

#### 3.2.2.1. Dış Rotorlu FDAM

Rotor yani hareketli kısım motorun dış kısmındadır. En çok kullanılan tiptir. Yapı olarak fırçalı sabit mıknatıslı doğru akım motorlarına benzemektedir. Şekil 3.12'de dıştan rotorlu bir motorun yapısı görülmektedir. Şekil 3.13'de ise incelemek için söktüğümüz gerçek bir motor görülmektedir. Elektrikli bisiklet, motorsiklet ve arabalarda artık bu tip motorlar sıkça kullanılmaktadır. Çünkü ek olarak diferansiyel sistemine ihtiyaç duymamaktadırlar [16].

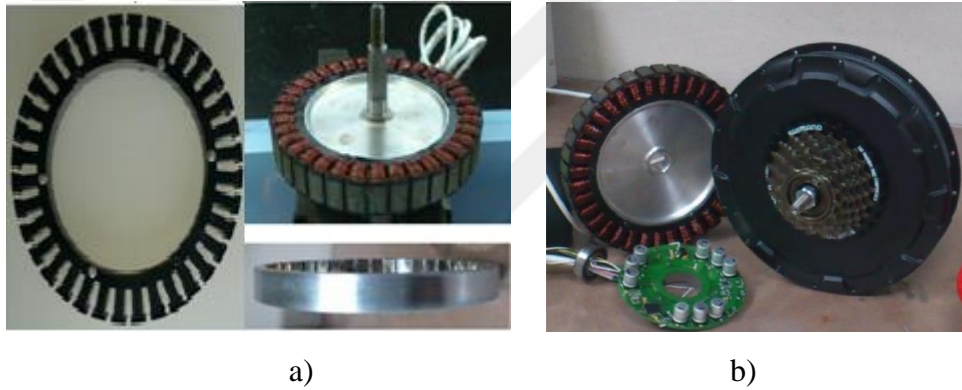


Şekil 3.12. Bir dış rotorlu fırçasız doğru akım motorunun yapısı [1].



Şekil 3.13. Bir dıştan rotorlu motorun bileşenleri.

Birçok araştırmacı kullanımın yaygınlaşması nedeniyle bu tip motor tasarımı üzerine araştırmalar yapmakta, prototipler üreterek motorda geliştirmeler yapmaya çalışmaktadır. Şekil 3.14’de Tanç’ın elektrikli bisikletler için yapmış olduğu bir dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru görülmektedir.

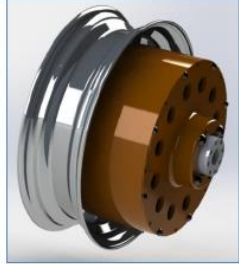


Şekil 3.14. Fırçasız doğru akım motoru a) İmalat aşamaları b) Tamamlanmış hali [52].

Öztürk’ün çalışmasında kullandığı elektromobil aracında kullanılan FDAM’lar Şekil 3.15’de görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.16’da motorun teknik özellikleri verilmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2005 yılından beri düzenlenen alternatif enerjili araç yarışmalarının bir kategorisi de elektrikli araç kategorisidir. 2014 yılında çağın bir gereksinimi olarak yarışmaya eklenen bu kategoride üniversite öğrencileri tasarlamış oldukları elektrikli araçlarda tahrik sistemi olarak elektrik motorunu, son zamanlarda ise hub motor olarak bilinen dış rotorlu türünü kullanmaktadırlar. TÜBİTAK bu yarışmalarda bazı parçaların yerliliğini zorunlu tutmakta, hazır parçalar için ceza puanı vermektedir. Motor ve motor sürücü de bu parçalardandır.

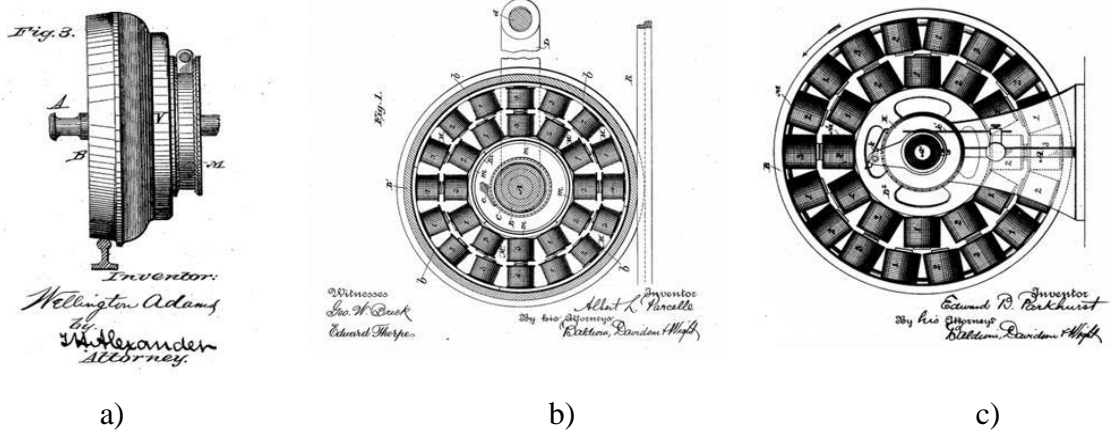


Şekil 3.15. Hub motorlu tasarlanmış bir elektrikli araç şasesi [41].

Tasarım Parametreleri	Motor Verileri	
Anma Gücü	2.5 KW	
Anma Hızı	880 rpm	
Çalışma Gerilimi	48 V	
Verim	~ %90	
Kutup Sayısı	26	
Çalışma Frekansı	50-200 Hz	
Anma Momenti	27.15 Nm	
Rotor Materyali	ST37 Steel	
Stator İç Çapı	120 mm	
Rotor Dış Çapı	188 mm	
Motor Boyunduruğu	38 mm	
Çalışma Tipi	Direct Drive	
Mıknatıs Dayanım Sıcaklığı	150 °C	
Rotor Tipi	Sabit Mıknatıslı (Nikel Kaplamalı N40SH Tipi Neodyum Mıknatıslar)	
Rulman Tipi	SKF/FAG Ring	
Stator ve Rotorun Toplam Ağırlığı	~ 4.2 kg	

Şekil 3.16. Bir hub motora ait teknik bilgiler [41].

Şekil 3.17’de ilk tasarlanan ve patenti alınan tekerlek motorlar yani hub motorlar görülmektedir. İlk patenti Şekil 3.17.a’da görülen motor için Wellington Adams 1884 yılında almıştır. 1890 yılında Şekil 3.17.b’deki motor tasarımı için Albert Parceller ve ardından ilk düşük hız yüksek momentli hub motorunun patentini Edward Parkhurst almıştır (Şekil 3.17.c).

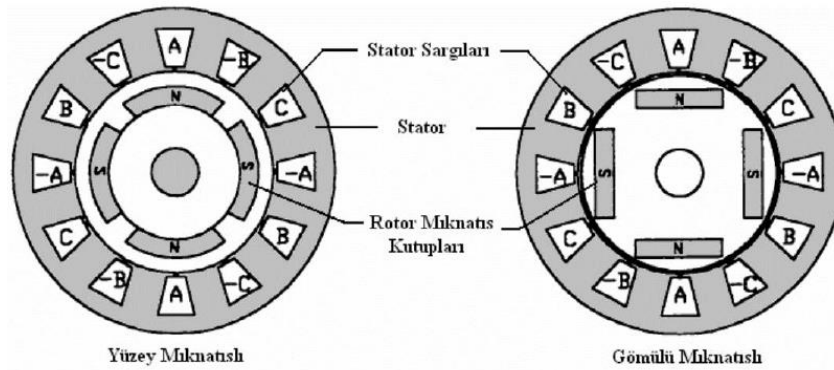


Şekil 3.17. Tekerlek içi (hub) motor patentleri a) Wellington Adams'a ait motor tasarımı b) Albert Parcelle'ye ait motor tasarımı c) Edward Parkhurst'a ait motor tasarımı [72]-[74].

Elektrikli araçlar dışında bilgisayar sabit diski, fan ve çamaşır makinesi gibi uygulamalarda da kullanılırlar [61].

### 3.2.2.2. İç Rotorlu FDAM

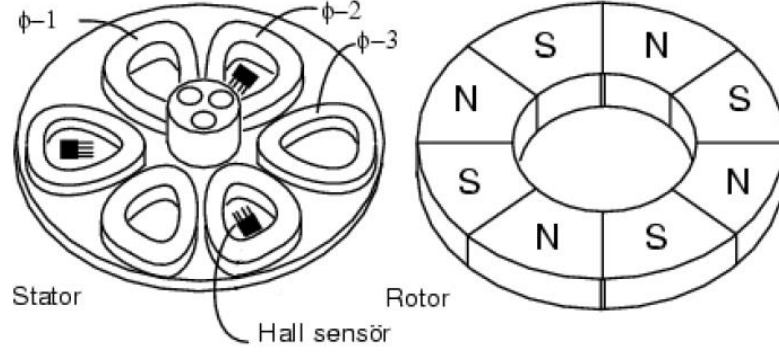
Bilinen geleneksel motorlar gibi dönen kısım iç kısımdır. Dış gövde sabittir. Hız olarak dıştan rotorlu motorlara göre çok daha yüksek hızlara çıkabilmektedir. Fakat ürettikleri tork daha azdır. Kullanım ve montaj kolaylığı sağlarlar ve fırçalı motorlara çok benzerler. Şekil 3.18'de iç rotorlu bir fırçasız doğru akım motorunun yapısı görülmektedir.



Şekil 3.18. Yüzey ve gömülü mıknatıslı içten rotorlu FDAM yapısı [61].

### 3.2.2.3. Disk Tipi FDAM

Yüksek hızlarda ısındıkları için pek tercih edilmeyen bu türde mıknatıslar, disk biçimindeki rotora yerleştirilmiştir. Mıknatıslarla sargılar karşılıklı gelecek şekilde tasarlanır. Şekil 3.19'da disk tipi fırçasız doğru akım motorunun yapısı görülmektedir [16].



Şekil 3.19. Disk tipi FDAM yapısı [61].

### 3.3. MOTORLARDA MIKNATIS SEÇİMİ

Bir defa manyetik özellik kazanınca bu özelliğini uzun süre muhafaza eden malzemeler sürekli mıknatıs olarak tanımlanmaktadır. Ticari olarak 1940 yıllarında görülmeye başlanmış, günümüzde gelişen teknoloji ile de yüksek enerji seviyelerine gelmiştir [15]. Mıknatıslar bazı özelliklerine göre sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 3.4’de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Mıknatısların sınıflandırılması [18].

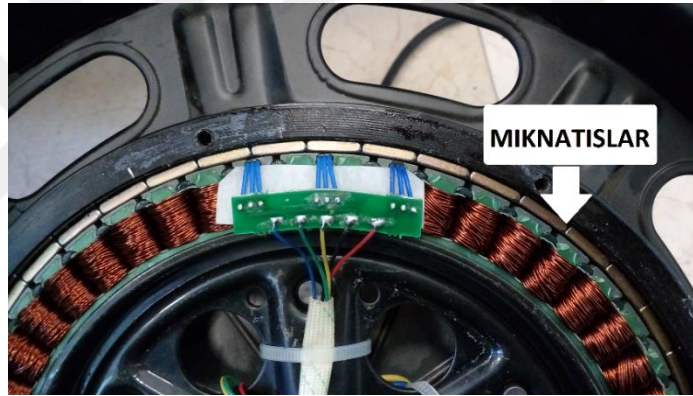
<b>Mıknatıslık Özelliğini Kazanma Şekline Göre</b>	
1. Doğal mıknatıslar	2. Yapay mıknatıslar
<b>Mıknatıslar Özelliğini Saklama Süresine Göre</b>	
1. Geçici mıknatıslar	2. Sürekli mıknatıslar
<b>Biçimine Göre</b>	
1. Çubuk biçiminde	2. U biçiminde
3. Dairesel biçimli	4. İbre biçiminde

Mıknatıslar fırçasız doğru akım motorları için önemli malzemelerden biridir ve tercihinde dikkatli olunması gerekmektedir. En önemli tercih sebepleri ise motorun birim hacmine düşen moment miktarı, çalışma sıcaklığı ve sertliğidir [75]. Özellikle sıcaklık mıknatısın özelliğini korumasında önemlidir. Yüksek sıcaklık akı yoğunluğunu ve malzemenin manyetik kararlılığını olumsuz etkiler. Curie noktası denilen bir sıcaklık noktası vardır ve bu noktaya ulaşan mıknatıs, özelliğini yitirir ve yeniden

mıknatıslanması gerekir [15]. Bu üç temel kriterin dışında mıknatısın teknik özelliği de tercih nedenini belirlemektedir. Bir mıknatıstan beklenen teknik özellikler:

- Yüksek enerji üretim değeri (B-H),
- Yüksek artık akı yoğunluğu (Br) değeri,
- Yüksek koersivite (He) değeri,
- Doğrusal mıknatıslanma (B-H) eğrisidir [15].

Sabit mıknatıslar pek çok malzemeden üretilebilmektedir. Ferrit (seramik), AlNiCo, toprak elementi neodmiyumironboron (NdFeB) ve samaryumkobalt (Sm-Co) bunlardan en sık kullanılanıdır. Son yıllarda güç yoğunluğundan dolayı NdFeB türü mıknatıs kullanımı revaçtadır. Ucuzluğundan dolayı ferrit mıknatıslar hala en yaygın mıknatıs türüdür. Şekil 3.20’de çalışmalarımız esnasında incelemek için söktüğümüz bir fırçasız doğru akım motorunun rotorundaki mıknatıslar görülmektedir.



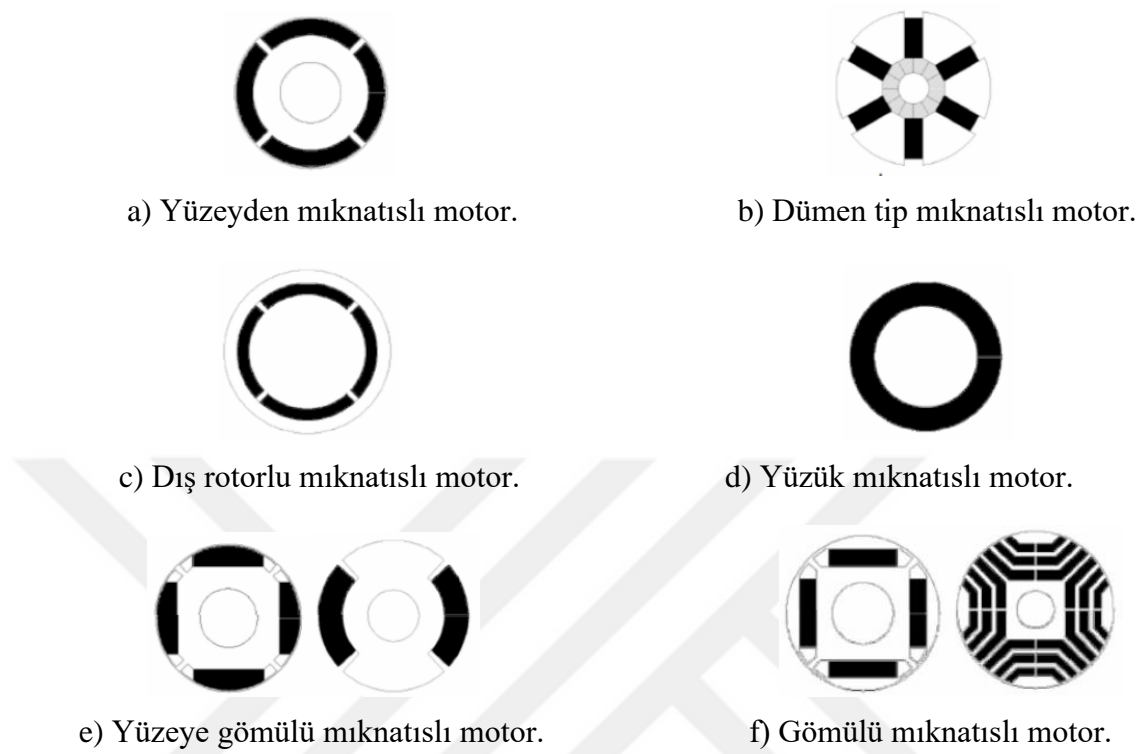
Şekil 3.20. Bir dış rotorlu motorda rotora dizilmiş mıknatıslar.

Mıknatıslar rotora farklı şekillerde yerleştirilebilir. Bazı modellerde rotor yüzeyinde olabilir. Farklı yönlerde yine rotora monte edilir. Son olarakta rotor tamamen mıknatıstan oluşabilir [76].

Şekil 3.21’de mıknatıslı motor tipleri görülmektedir. Sürekli veya daimi mıknatısların elektrik makinalarında kullanılması uyartım kayıplarının olmaması, basit yapıları, verimli olmaları, birim hacimde ürettikleri gücün fazla olması gibi nedenlerle tercih edilmektedir [77]. Sürekli mıknatıslardan beklenen özellikler:

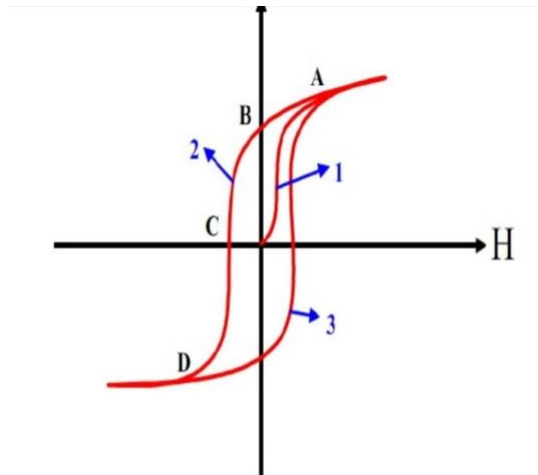
- Yüksek iç koersif kuvvet ( $H_{cB}$ )
- Yüksek doyma manyetizasyonu ( $B_{sat}$ )
- Yüksek kalıcı akı yoğunluğu ( $B_r$ )

- Yüksek enerji yoğunluğu  $(BH)_{\max}$
- BH Karakteristiği 2. kısmının lineerliği [79].



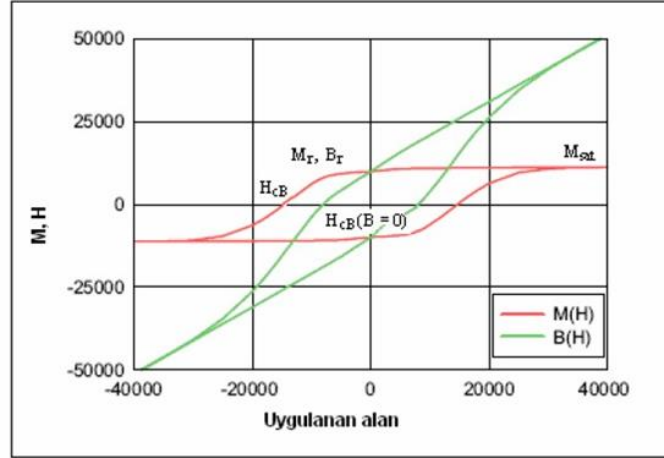
Şekil 3.21. Mıknatıslı motor yapıları [78].

Teknik özelliklerin bir çoğu histeresiz eğrisi denilen bir eğri üzerinden okunabilir. Bu eğride H manyetik alan şiddetini B ifadesi de manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. Şekil 3.22'de örnek bir eğri görülmektedir. 1881 yılında Warburg demirin histerizisliğini ilk kez gözlemlemiştir.



Şekil 3.22. Histerezis eğrisi (çevrimi) [80].

Eğrideki bölgeler malzemenin manyetik davranışından ötürü şekillenir. Bu bölgeler üzerinden malzemenin sertliği, doyma mıknatıslık değeri, kalıcı mıknatıslık değeri (remenans) ve koersivite değeri hakkında bilgi edinilebilir [80]. Şekil 3.23’de NdFeB türü mıknatıslar için histerezis eğrisi verilmiştir [79].



Şekil 3.23. NdFeB mıknatıslar için histerezis eğrisi [79].

### 3.3.1. Mıknatıs Türleri

Yapılacak uygulamaya göre motor tasarımı, motora göre de hem teknik olarak hem de ekonomik olarak en verimli mıknatıs türü seçilir. Piyasa yaygın olarak birkaç çeşit mıknatıs bulunmaktadır. Ticari olarak ilk üretilen mıknatıs türü 1930’ lu yılların sonuna doğru üretilen AlNiCo mıknatıslardır. Ferrit mıknatıslar 1960’lı yıllarda görülmeye başlanmış, 1975’te ise SmCo mıknatıslar üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde yüksek güç yoğunluğundan dolayı en çok tercih edilen mıknatıs türü olan NdFeB ise son geliştiren bir mıknatıs türüdür [81].

#### 3.3.1.1. AlNiCo Mıknatıslar

Ticari olarak ilk geliştirilen mıknatıs türü AlNiCo mıknatıslardır. Alüminyum, kobalt, nikel ve demirin basit elementlerle yaptıkları bileşiklerden oluşur. Sadece bir yönde en uygun mıknatıslık gösterir. Sertliklerinden dolayı bir kez şekillendirilirler ve işlenmesi çok zordur. İçeriğinde iletken maddeler olduğundan iletken özellik gösterir. En büyük avantajı ise yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda (500 °C) çalışabilmesidir. Koersivitesi düşüktür. Yüksek akı yoğunluğuna karşı dayanma güçleri azdır. Bu nedenle sürekli mıknatıslı motor uygulamalarında tercih edilmez.

### 3.3.1.2. Seramik Mıknatıslar

Sert ve kırılğan olan seramik mıknatıslar demiroksitlerin baryum ve stronsiyum bileşikleriyle üretilirler. Koersitivesi ve manyetik akısı AlNiCo mıknatıslara göre yüksektir. Lakin çalışma sıcaklığı daha düşüktür (250 °C). Çok kolay bulunması, özelliklerini kaybetmemesi, ekonomik olması nedeniyle çok tercih edilirler. Şekil 3.24’de çeşitli tiplerde seramik (Ferritik) mıknatıslar görülmektedir [82].



Şekil 3.24. Ferritik mıknatıs [82].

### 3.3.1.3. SmCo Mıknatıslar

Nadir toprak elementlerinden Samaryum ile Kobaltın birleşimi sonucu oluşan bu tür 1960’lı yılların sonlarında keşfedilmiştir.  $SmCo_5$  ve  $Sm_2Co_{17}$  olmak üzere türleri vardır. Kırılğan yapısı nedeniyle özel yöntemlerle şekillendirilirler. Yüksek artık akı yoğunluğu ve koersitiveye sahiptir. Nadir elementler olması nedeniyle pahalıdırlar, maliyetleri yüksektir. Yoğunluğu fazla olduğu için ağırdır. Akı yoğunluğu ve dayanıklılığının çok fazla olduğu görülmektedir. Manyetik olarak en iyi mıknatıs türü denilebilir. AlNiCo mıknatıslar gibi yüksek sıcak ortamlarda çalışabilirler. Curie sıcaklıkları 700-800 °C arasındadır ve sürekli çalıştıklarında 300 °C bir ortamda çalışabilirler. Yeni yapılan bileşikleriyle 500 °C gibi daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkabilmektedir. Birçok uygulamada elektromıknatısların yerine hala pahalı olmasına rağmen SmCo alaşımli sürekli mıknatıslar kullanılmaya başlanmıştır [79].

### 3.3.1.4. NdFeB Mıknatıslar

Günümüzde en çok kullanılan mıknatıs türü olup yüksek güç yoğunluğuna sahiptir [83]. Lakin çok yüksek sıcaklıklarda çalışamaz, 180 °C üzerinde hemen özellikleri kötüleşmeye başlar. Oksitlenme ve korozyon oluşumuna tedbir amaçlı çinko ya da nikel ile kaplanabilir. SmCo ile karşılaştırıldığında daha dayanıklıdır, daha güçlüdür, yüksek koersitiveye sahiptir [62]. Şekil 3.25’de farklı tiplerde neodyum mıknatıslar görülmektedir.



Şekil 3.25. Neodyum mıknatıslar a) Daire b) Kare c) Havşalı [83].

Üretim metodlarına göre NdFeB mıknatıs türleri üçe ayrılır. Bu üç yöntem sinterleme, ısı deformasyonu ve polimer bağlamadır. Sinterlenmiş grubun özelliği üstün manyetik özellik, iyi maliyet ve yüksek verimlilik. Buna karşın ısıl ve çevresel kararlılığı açısından olumsuz yanları vardır. Enerji yoğunlukları sinterlenmiş türde  $400 \text{ kJ/m}^3$ , polimer bağlı mıknatıslarda ortalama  $80 \text{ ila } 145 \text{ kJ/m}^3$ , ısı deformeli mıknatıslar da ise  $120\text{-}370 \text{ kJ/m}^3$ 'dür [79]. Çizelge 3.5'de sürekli mıknatısların çalışma sıcaklığı, enerji yoğunluğu, ekonomik verimliliği ve koersiviteyi karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.5. Sürekli mıknatısların karşılaştırılması [62].

Malzeme	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	Maksimum Manyetik Enerji	Maliyet	Demagnetizasyon Direnci
NdFeB	150° C	48 MGOe	Yüksek	Yüksek
SmCo	300° C	32 MGOe	Çok Yüksek	Yüksek
AlNiCo	550° C	7,5 MGOe	Orta	Orta
Seramik	300° C	4 MGOe	Çok Düşük	Düşük

### 3.4. MOTORLARDA KONUM ALGILAYICILAR

Fırçasız doğru akım motoru, rotorun oluşturduğu manyetik alan ile statorun oluşturduğu manyetik alanın itme çekme kuvveti sonucu çalışan bir motor türüdür. Bu nedenle rotor konumunun döner manyetik alana göre konumunun bilinmesi gerekir. Bu sayede daha verimli bir kontrol sağlanmaktadır [10].

Konum algılama için çeşitli sensörler kullanılır. Ama maliyeti ve boyutu arttırması nedeniyle sensörsüz konum algılama teknikleri ve yöntemleri üzerinde de yoğun

çalışmalar yapılmaktadır. Konum bilgisi, sürücü devresi içindeki anahtarlama elemanlarının doğru bir sırada anahtarlanması için gereklidir.

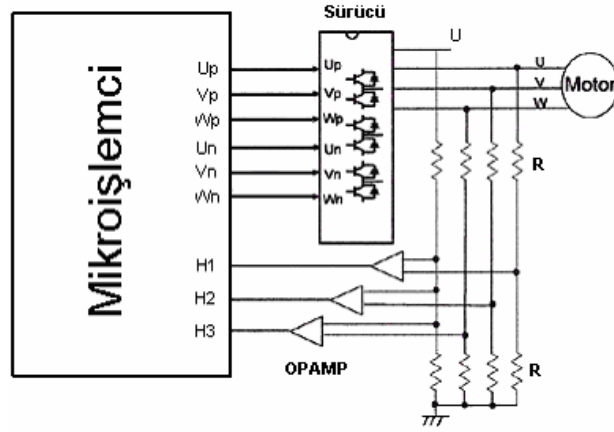
Fırçalı doğru akım motorlarında komütatörler komutasyonu sağlar iken fırçasız doğru akım motorlarında bu işlem için elektronik devreler gerekmektedir. İç ve dış kontrol olmak üzere iki ayrı kapalı kontrol bölümü vardır. İç bölümde motor sargılarının aktiflik sırasına göre komutasyon algoritması bulunur. Bu kontrol sistemine akım sensörleri ve Hall sensörleri geri besleme sağlamaktadır. Dış bölümde ise konum ve hız kontrolü yapılır ki geri besleme olarak kodlayıcı (encoder), takometre, çözücü (resolver) ve yine Hall sensörleri kullanılabilir. Maliyetleri düşürme adına birçok araştırmacı sensörsüz kontrol üzerine çalışmalar yapmaktadır. Sensör yerine motorun sargılarında oluşan zıt emk analiz edilir [84].

Rotor konumu için kullanılacak sensör seçiminde bazı parametreler göz önünde bulundurulur. Bunlar çevresel etkenler, rotorun hareket açısı, sensör için ayrılan alan ve mesafe, kontrolde beklenen hassasiyet ve doğruluk, sensörün çalışma gerilimi ve sensörün bulunabilirliğidir [1].

#### **3.4.1. Sensörsüz Konum Algılama**

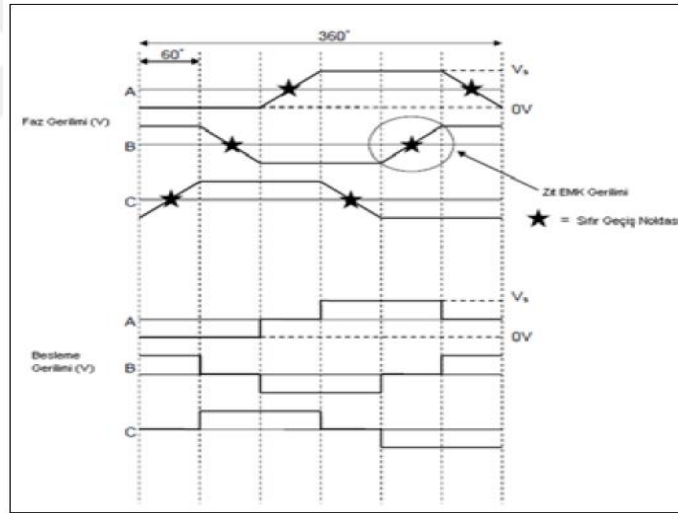
Rotor konumun belirlenmesi için sensör kullanmak maliyeti ve boyutları arttırması nedeniyle üreticiler tarafından pek tercih edilmemektedir. Bu nedenle sensör konum tespiti için çalışmalar giderek artmaktadır. Günümüzün en bilinen kontrol yöntemlerinden yapay zekâ ile bile bu alanda çalışmalar yapılmaktadır. Motorlarda ilk kalkış anındaki konumun bilinmesi özellikle önem arz etmektedir. Algılayıcısız motor sürücüleri fan, su pompası, hava koşullandırma kompresörleri, buzdolabı kompresörleri gibi uygulamalar için uygundur [78].

Sensörsüz konum belirlemede çok bilinen bir yöntem olan sıfır geçiş dedektörü yöntemi, faz sargılarında indüksiyonla oluşan zıt emk'den faydalanarak rotor konumunun tespitinde kullanılır. Hareketli parçalardan oluşmaması, motorun hareket eden parçalarına bağlı olmaması en büyük avantaj iken yüksek frekanslı harmoniklerin oluşmasıdır. Şekil 3.26'da bir sıfır geçiş dedektörünün devre şeması ve sisteme bağlantısı görülmektedir.

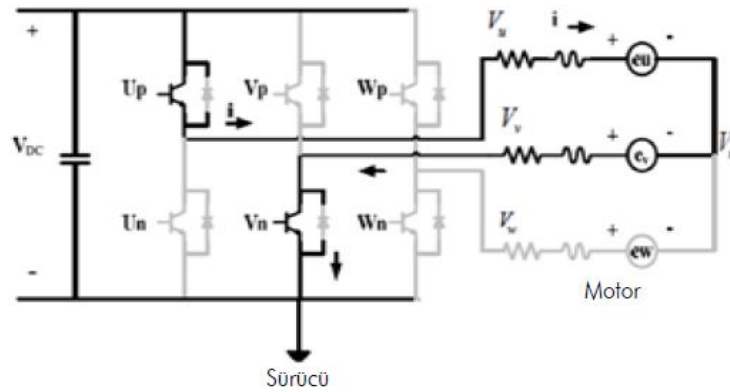


Şekil 3.26. Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı [23].

Şekil 3.27’de ise sıfır geçiş noktaları görülmektedir. Üç fazlı motorlarda iki fazın enerjili olduğu durumda üçüncü faz enerjilendirilmez ve bu fazda oluşan emk incelenir. Şekil 3.28’de ise iki faz enerjili iken (A ve B fazları) diğer fazdan (C fazı) ölçülen zıt emk’nın sıfır geçiş noktasına göre anahtarlama yapılmaktadır [85].



Şekil 3.27. Faz besleme gerilimleri ve zıt emk gerilimleri [85].



Şekil 3.28. İki fazın enerjili ve bir fazın boşta olması durumunda akımın yönü [85].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde sensörsüz kontrol çalışmalarının üç grupta toplandığı söylenebilir:

Akım ve gerilim ölçümü ve motor denklemleri ile işlemler yaparak kontrol,  
Gözlemleyiciler kullanarak kontrol,  
Zıt emk kullanarak yapılan sensörsüz kontroldür [86], [87].

Fırçasız doğru akım motorlarının akı dağılımları yamuk (trapezoidal) ve sinüsoidal olacak şekilde üretilir. Bu nedenle konum algılama algoritmaları ve yöntemleride buna göre belirlenir. Genellikle yamuk tip üretilen motorlarda üç faz sargısından ikisi enerjili iken bir faz boşta kalır. Boşta kalan sargıda oluşan zıt emk'nın davranışı bir sensör gibi kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem ise anahtarlama elemanlarının açık ve kapalı konumlarından faydalanılmaktadır. Bir başka yöntem ise motorun akım gerilim modelinden faydalanılır ve ölçülen değişkenler ile tahmin edilen değişkenler arasındaki farkın analizi ile konum algılamadır [88], [89].

Sensörsüz kontrol yöntemlerinde bazı teoriler uygulanmaktadır. Bunlardan en güçlü olan yöntemlerden birisi de Kalman filtre teorisidir. Bu teoride içinde birçok parametre olan bir matematiksel modelleme vardır. Her bir zaman adımında motorun konumunun nasıl değişeceği tahmin edilir. Tahmin edilen bu değer ölçülen değer ile kıyaslanır ve fark motorun çalışmasını iyileştirmek için kullanılır. Diğer yöntemlerde sadece sıfır geçişler kullanılırken Kalman tekniğinde her an konum ve hız tahmini yapılır [17].

Sensörsüz çalışmanın en büyük zorluklarından biri şüphesiz ilk kalkış anında konum belirlemedir. Çünkü sistemde enerji olmadığı için bir geribesleme yani zıt emk'da oluşmayacaktır. Bu nedenle ilk kalkış anı için farklı algoritma ve yöntemler kullanılır. Örneğin bir zıt emk sıfır geçiş noktası tespit edilene kadar sargıların sıra ile enerjilendirilmesi yapılabilir [90].

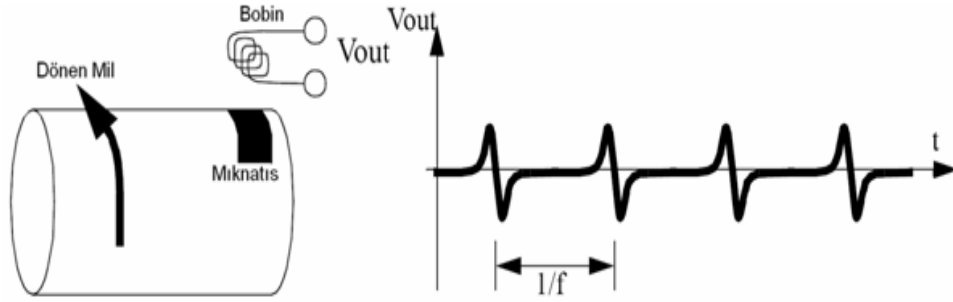
### **3.4.2. Sensörlü Konum Algılama**

Sensörlü kontrol yöntemlerinde konum bilgisi için en çok Hall sensörünün kullanıldığı görülmektedir. Birçok motor içinde Hall sensör ile üretilmektedir. Daha sonra kodlayıcı, çözücü ve takometre kullanıldığı görülür.

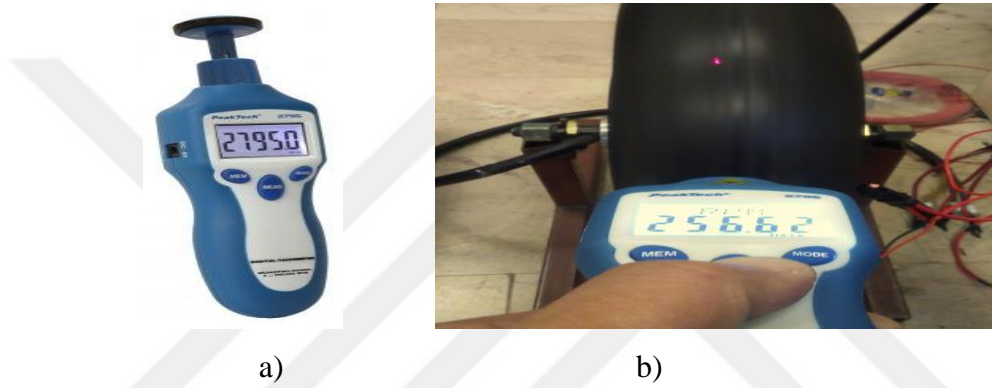
#### *3.4.2.1. Takometre ile Konum Algılama*

Takometre ile çoğunlukla hız bilgisi alınmaktadır. Rotor üzerine takometrenin duyarlı olduğu bir manyetik alan kaynağı veya bir yansıtıcı monte edilir. Rotor milinin her turunda bir sinyal üretilir. Sinyaller arası zaman ölçülerek motorun frekansı ve hızı

hesaplanır. Şekil 3.29’da bir takometrenin şeması ve çıkış sinyali görülmektedir. Şekil 3.30’da ise bu çalışmada kullandığımız takometre cihazı görülmektedir.



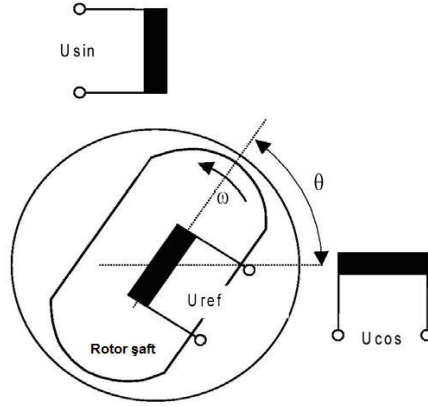
Şekil 3.29. Takometre cihazı ve çıkış sinyali [91].



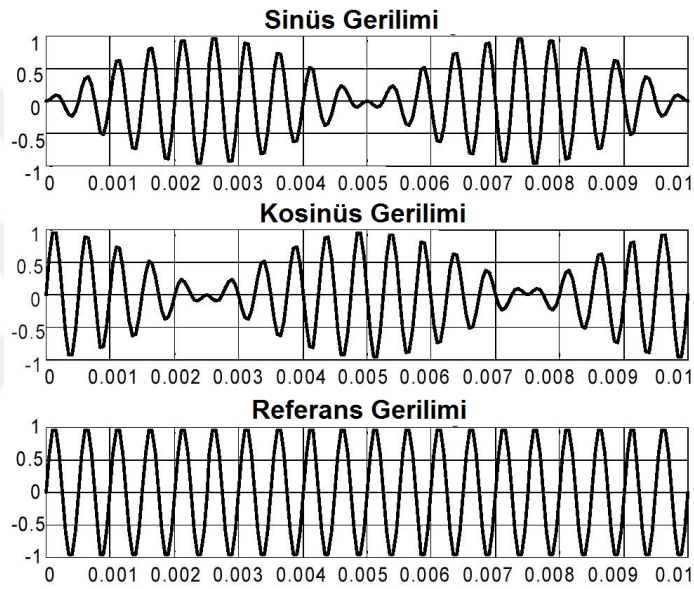
Şekil 3.30. a) Ölçümlerde kullanılan takometre cihazı b) Çalışmada kullanımı [92].

#### 3.4.2.2. Çözücü (Resolver) İle Konum Algılama

Ürettiği sinyalden ötürü sincos sensör olarak da bilinirler. Resolverler dönen transformatör olarak da isimlendirilir. Transformatör mantığı ile çalışmaktadırlar. Rotor üzerindeki bir sargıya enerji verilir, stator kısmına  $90^\circ$  açı ile yerleştirilmiş iki bobin üzerinde bu sargı bir gerilim indüklenmesine neden olur. Bu gerilim sayesinde motor konumu hesaplanabilir. Oluşan gerilimlerin frekansı, rotor üzerindeki sargıya uygulanan gerilimin frekansı ile aynıdır.  $V_{sin}$  ve  $V_{cos}$  olarak iki gerilim türetilir ve bunları işleyen hazır entegreler mevcuttur. Şekil 3.31’de bir resolverin yapısı ve Şekil 3.32’de uygulanan gerilim ile elde edilen gerilimlerin dalga şekilleri görülmektedir [93].



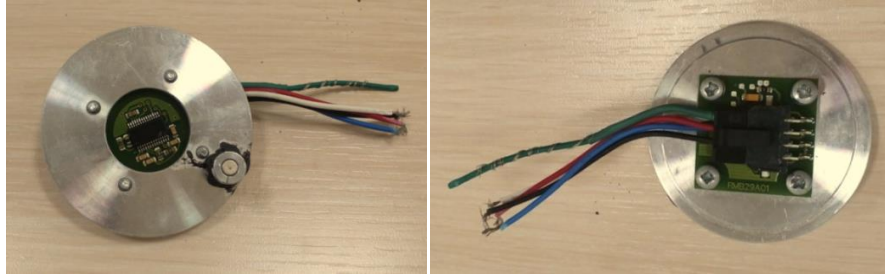
Şekil 3.31. Resolver çalışma mantığı ve yapısı [93].



Şekil 3.32. Resolver gerilimleri [93].

Diğer bir konum sensörü olan kodlayıcıların çıkışı sayısal bir sinyal türü iken çözücülerin çıkış sinyal türü analogtur. Bu analog sinyal rotorun hızı ve konumu hakkında bilgi vermektedir [91].

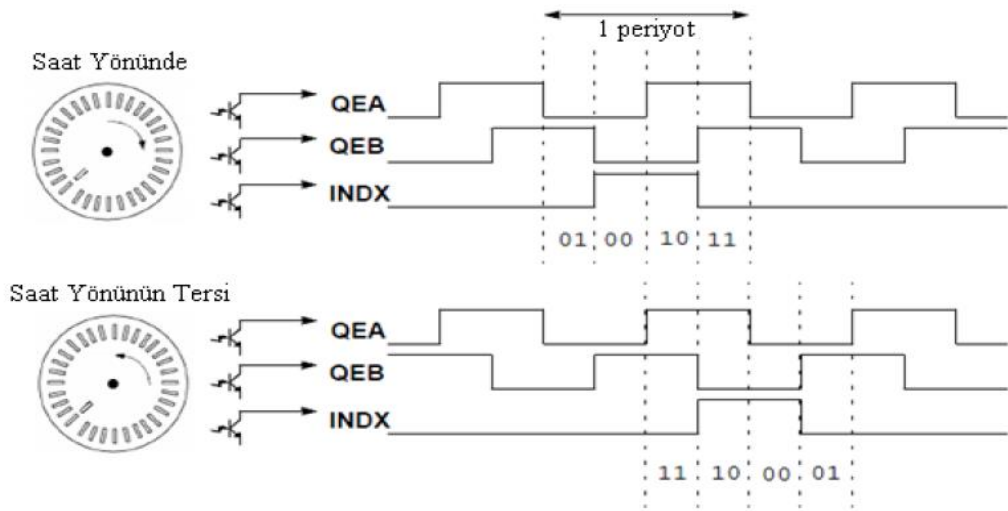
Şekil 3.33’de Düzce Üniversitesi Elektromobil takımlarının üretmiş olduğu Lodos adlı aracın elektrikli motoru üzerinde bulunan çözücü sensörü görülmektedir. Ürünün bilgi sayfasında da adı sin/cos olarak geçmektedir.



Şekil 3.33. Lodos'a ait fırçasız doğru akım motoruna ait sin/cos çözücü.

### 3.4.2.3. Kodlayıcı (Encoder) İle Konum Algılama

En çok kullanılan konum algılayıcı türlerindedir. Manyetik türleri olduğu gibi genellikle optik bir yapıya sahiptir. Bir ışık vericisi ve ışık alıcısından oluşur. Rotora bağlı bir disk rotorla birlikte hareket eder. Disk üzerindeki deliklerden vericiden çıkan ışık alıcıya ulaştığında bir sinyal üretir. Bu sinyaller yorumlanarak rotor konumu ve hızı tespit edilir [93]. Pahalı bir çözümdür ama hassasiyetinden dolayı yine de tercih edilmektedir [23]. Kodlayıcı modülleri endüstride çok sık kullanılmaktadır. Çıkış işaretleri mikrodenetleyicilerin okunmasına uygun bir şekilde üretilir. Şekil 3.34'de bir kodlayıcının çıkış işareti görülmektedir.



Şekil 3.34. Kodlayıcı çıkış sinyali [94].

Kodlayıcılar genel olarak doğrusal ve döner olmak üzere iki gruba ayrılır. Döner kodlayıcılarda kendi içinde artımlı kodlayıcı ve mutlak kodlayıcılar olmak üzere ikiye ayrılır.

### 3.4.2.3.1. Mutlak (Absolute) Kodlayıcı

Sabit bir noktaya göre motorun konumunu ve hızını belirleyen algılayıcılara mutlak kodlayıcılar denir [9]. Mutlak kodlayıcıda tek bir dijital sinyal üretilir. Her konumun bir sinyal deseni vardır. Ne kadar çok nokta varsa desenin çözünürlüğü o kadar yüksektir. Çözünürlük 8 ise yani 8 tane iz var ise  $2^8=256$  değişik konum belirtebilir. Mesela, 10 ize sahip bir dijital desen  $2^{10}=1024$  konum belirtir. Her konum için ürettiği sinyal benzersizdir. Bir tam tur 360 derece olduğuna göre 360/konum sayısı derece cinsinden hareketi verecektir. Şekil 3.35’de mutlak kodlayıcı gösterilmiştir. Enerji açılıp kapansa dahi mutlak kodlayıcı her zaman doğru konumu vermektedir. Bu nedenle hassas uygulamalarda kullanılır [65].



Şekil 3.35. Mutlak kodlayıcı [65].

### 3.4.2.3.2. Artımlı (Incremental) Kodlayıcı

Artımlı kodlayıcılar basit yapıları ve ucuz olması sebebiyle en çok kullanılan konum algılama sensörüdür. İçerisindeki disk üzerindeki delikler eşit aralıktır. Her delik ışık kaynağı önünden geçtiğinde kodlayıcının ürettiği sinyal değeri değişir. Kodlayıcı çıkışındaki sinyaller sayılarak rotor konumunun değişimi takip edilmektedir. En büyük dezavantajı ise rotorun başlangıç konumunu ölçememesidir. Sadece rotor konumundaki değişiklikleri ölçebilmektedir [93].

Kodlayıcıdaki deliklerin olduğu disk iki tipte olabilir ya yarıklı yani deliklidir ya da üzerinde reflektör vardır, yansıtmalıdır. Disk üzerinde siyah beyaz çizgiler vardır. Bu tip bir kodlayıcıdan konum bilgisi alınabilir ama dönüş yönü hakkında bilgi alınamaz. Motorun hızı anlık olarak takip edilebilir. Bir tekerlek tipi motor ve kodlayıcının motora bağlantısı Şekil 3.36’da görülmektedir. Yıldız çalışmasında artımlı kodlayıcı ile anlık hız takibi yapmıştır. Çalışmasında kullandığı artımlı kodlayıcı ise Şekil 3.37’de görülmektedir [16]. Kodlayıcıya ait teknik bilgiler ise Çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.36. Artımlı bir kodlayıcının tekerlek tipi motora bağlantısı [16].

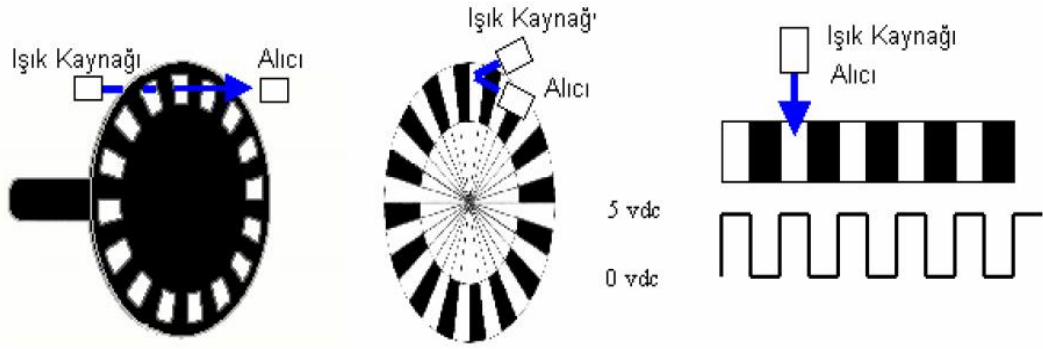


Şekil 3.37. Artımlı kodlayıcı [16].

Çizelge 3.6. Artımlı kodlayıcının teknik bilgileri [16].

Çalışma Gerilimi	12-30 Volt
Çözünürlük	1...100 puls
Mil Çapı	3 mm
Çalışma Sıcaklığı	-10...+70 °C
Özellik	A, B, Z çıkış, Totem-Pole, Line-Driver çıkışlı
Çalışma Frekansı	200 kHz

Artımlı bir kodlayıcının çıkışı dijital ve bir bitliktir. Bu bitler sayılarak motorun hız ve konumu belirlenir. Şekil 3.38’de artımlı kodlayıcının çalışma prensibi ve çıkış sinyali görülmektedir. İki farklı disk tipi olduğu daha önce söylenmişti. İki tipte şekilde görülmektedir [65].



Şekil 3.38. Artırımlı kodlayıcı disk yapısı ve çıkış sinyali [65].

Her sensörün kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Kullanım yerine göre bu durumlar göz önüne alınır. Şekil 3.39'da çözücü sensör ile kodlayıcı sensör çıkış sinyalleri, besleme gerilimleri ve sistemdeki konumlarına göre karşılaştırılmıştır.

Çıkış sinyali	
<p><b>ENCODER</b></p> <p>Encoderlar doğrusal ya da döner hareketi temsil eden pulslar üretir. Bu pulslar sayılarak hız ve konum bilgisi elde edilir.</p>	<p><b>RESOLVER</b></p> <p>Resolver dönme konumunu mutlak olarak temsil eden analog SIN/COS gerilim dalgaları üretir. Bu dalgalar resolver arabirim kartları ile sayısal sinyale çevrilirler.</p>
Besleme	
<p><b>ENCODER</b></p> <p>Encoder, DC gerilim ile beslenirler.</p>	<p><b>RESOLVER</b></p> <p>Resolver, AC gerilim ile beslenirler</p>
Motordaki konumu	
<p>Encoderların tüm elektroniği üzerindedir. Bu denetleyici ile arasındaki kablo bağlantısını azaltır. Buna karşılık encoderlar, düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanıksızdır. (-40°C-100°C)</p>	<p>Resolver bilgilerini değerlendiren elektronik kısım genelde motor denetleyicisinin yanındadır. Bu da çevresel şartlara karşı dayanımı artırır.</p>

Şekil 3.39. Çözücü ve artırımlı kodlayıcı karşılaştırması [91].

#### 3.4.2.4. Hall Alan Etkili Sensör İle Algılama

Günümüzde elektrikli bisiklet, motorsiklet ve araba için üretilen birçok fırçasız doğru akım motorunun dahili Hall sensörleri ile üretildiği görülmektedir. Hall sensörler bir manyetik alana maruz kaldığında Hall voltajı denilen bir gerilim üretmektedir. Bu gerilim sayesinde konum bilgisi tahmin edilebilmektedir. Üretilen yarıiletken biçimindeki Hall sensörleri, içlerindeki birkaç eleman sayesinde sayısal çıkış verecek şekilde üretilir. Manyetik anahtar şeklinde görev yapmaktadır. Şekil 3.40'da çalışma süresince incelediğimiz bir tekerlek motor üzerindeki hall sensörleri ve stator üzerindeki yerleşimi görülmektedir.

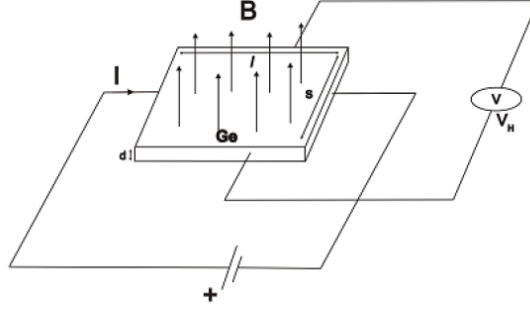


Şekil 3.40. Tekerlek motorda kullanılan Hall sensörler ve stator üzerindeki konumu.

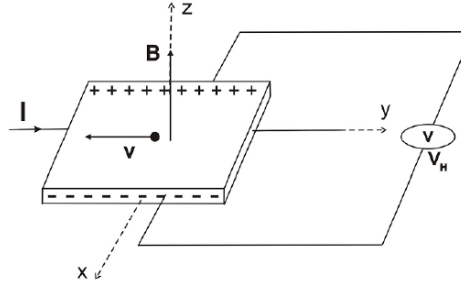
Hall etkisi, içinden akım geçen bir malzemenin, dik bir manyetik alana maruz kalması durumunda, hareketli yüklere uygulanan Lorentz Kuvveti sonucu kutuplaşması ve bu kutuplaşma sonucunda bir potansiyelin oluşmasıdır. Bu şekilde oluşan gerilime de Hall Gerilimi denilmektedir.

$q$  elektriksel yük,  $v$  yükün hızı,  $B$  manyetik alan olmak üzere  $F$  Lorentz kuvveti Denklem (3.1) ile verilir. Şekil 3.41'de bir yarıiletken plakaya uygulanan manyetik alan görülmektedir. Şekil 3.42'de ise bu manyetik alan sonucunda oluşan kutuplaşma olayı görülmektedir. Kutuplaşma sonucu zıt yükler plakanın farklı kenarlarında toplanırlar. Bunun sonucunda bir elektrik alan (ki buna da Hall Alanı denir) ve potansiyel oluşması kaçınılmazdır. Bu durum açıkça Şekil 3.43'de gösterilmiştir [95].

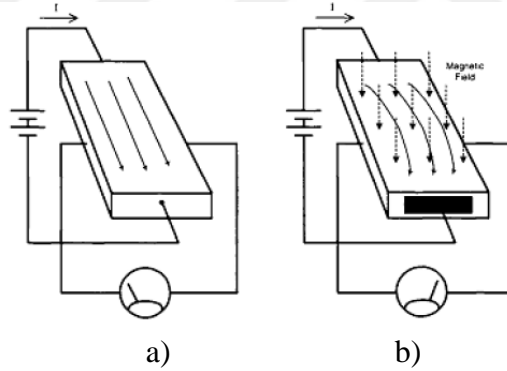
$$F=q.(v \times B) \quad (3.1)$$



Şekil 3.41. Hall etkisindeki yarıiletken [95].



Şekil 3.42. Hall etkisi altındaki yarıiletken plakada gerçekleşen kutuplaşma olayı [95].



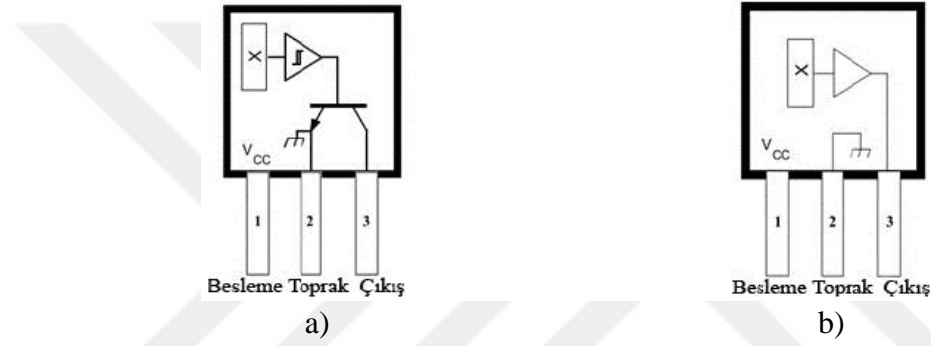
Şekil 3.43. a) Manyetik alan yok b) Manyetik alan ile Hall geriliminin oluşması [95].

Hall deneylerinde önce gümüş bir tel kullanıyordu ve başarısız olmaktadır. Daha sonra danışmanı, ince altın bir şerit denemesini önerdi ve artık deneyler kalıcı bir çıkış vermekteydi, başarılı oldu [98].

Ama günümüzde Hall etkisi yarıiletken malzemeler ile anılmakta ve yarıiletken plakalar kullanılmaktadır. Bu plaka yonga içerisinde diğer karşılaştırma elemanlarıyla birlikte üretilmektedir [97].

Hall sensörleri manyetik alan olarak iki kaynağı kullanır. Birincisi daimi mıknatıslar ile üretilen manyetik alanlar diğeri ise akım ile oluşturulan manyetik alandır. Bir iletken geçen akım, iletken etrafında manyetik alan oluşturmaktadır [98].

Piyasada ticari olarak iki tip Hall sensör bulunmaktadır. Birinci tip Hall sensörler Lineer Hall Sensörü olarak bilinir ve maruz kaldığı manyetik alanın büyüklüğü seviyesinde çıkışında doğrusal değişen bir sinyal olarak verirler. İkinci tip Hall sensörlerin davranışı ise manyetik alana maruz kaldığında çıkış durumunu değiştirebilen ve ters yönlü bir manyetik alana maruz kalıncaya dek konumunu koruyan mandal (latch) tipi sensörlerdir. Motorlarda kullanılan mandal tipi olan modellerdir. Şekil 3.44’de bu iki tip sensörün içyapıları görülmektedir. Lineer Hall sensörleri, çıkışlarına bağlanan bir karşılaştırıcı opamp devresi ile mikrodenetleyicilere uygun bir sayısal sinyal üretecek hale getirilebilir. Karşılaştırma devresinde belirli bir referans değerinin altı lojik 0, üstü ise lojik 1 olarak ayarlanabilir [98].



Şekil 3.44. a) Hall Effect Latch sensörü b) Lineer Hall Effect sensörü [98].

Hall sensörler sadece motorlarda konum algılama sensörü olarak kullanılmamaktadır. Bir elektrikli araçta motor dışında birçok kontrolde yine Hall sensörlerden faydalanılır. Elektrikli aracın hız referans bilgisi, aracın hız ölçümü gibi birçok otomotiv uygulamalarında ve sıvı akışı ölçümü, anahtarlama elemanı gibi birçok endüstriyel uygulamada da Hall sensörlerden faydalanılır. Çizelge 3.7’de Hall sensörlerinin bazı uygulama alanları görülmektedir.

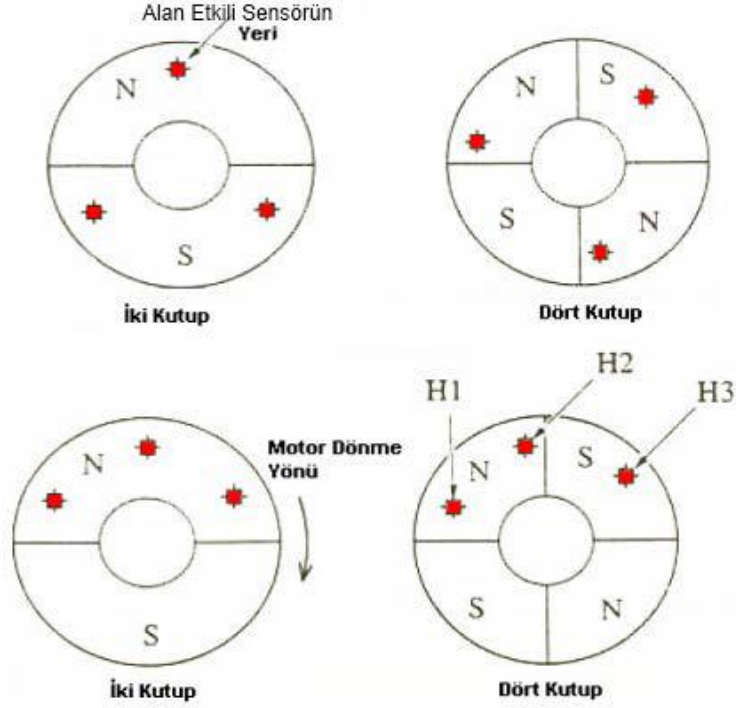
Çizelge 3.7. Hall sensörlerinin bazı uygulama alanları [97].

Otomotiv uygulamaları	
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Hall anahtarlama uygulamalar</li> <li><input type="checkbox"/> Ateşleme algılayıcı</li> <li><input type="checkbox"/> Motor hızı zamanlaması</li> <li><input type="checkbox"/> Fren kontrolü(ABS)</li> <li><input type="checkbox"/> Sürtünme kontrolü</li> <li><input type="checkbox"/> Silecek sistemi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğrusal Hall algılayıcı uygulamalar</li> <li><input type="checkbox"/> Pozisyon algılayıcı</li> <li><input type="checkbox"/> Direksiyon açısı algılayıcısı</li> <li><input type="checkbox"/> Far menzil ayarı</li> <li><input type="checkbox"/> Akım ölçümü</li> <li><input type="checkbox"/> Batarya yönetimi</li> </ul>

Çizelge 3.7 (devam). Hall sensörlerinin bazı uygulama alanları [97].

<input type="checkbox"/> Kapı kilidi <input type="checkbox"/> Merkezi kilitleme <input type="checkbox"/> Koltuk ayarı <input type="checkbox"/> Cam kaldırma-indirme <input type="checkbox"/> Tavan camı açılması-kapanması <input type="checkbox"/> Işık kontrolü <input type="checkbox"/> Ayna ayarı	<input type="checkbox"/> Yakıt miktarı algılayıcı <input type="checkbox"/> Güç algılayıcı
<b>Endüstriyel uygulamalar</b>	
<b>• Hall anahtarlı uygulamalar</b> <input type="checkbox"/> DC motorun kontrolü <input type="checkbox"/> Soğutma fanları <input type="checkbox"/> RPM ölçümü <input type="checkbox"/> Teker hız algılayıcıları <input type="checkbox"/> Dişli sayma <input type="checkbox"/> Son pozisyon anahtarı <input type="checkbox"/> Temassız anahtar <input type="checkbox"/> Sıvı düzey <input type="checkbox"/> Sıvı akışı <input type="checkbox"/> Basınç anahtarı <input type="checkbox"/> Pako şalter	<b>• Doğrusal Hall algılayıcı uygulamalar</b> <input type="checkbox"/> Açık algılayıcı <input type="checkbox"/> Pozisyon ölçümü <input type="checkbox"/> Mesafe ölçümü <input type="checkbox"/> Manyetik alan algılayıcı <input type="checkbox"/> Döndürme momenti algılayıcı <input type="checkbox"/> Akım algılama <input type="checkbox"/> Güç algılama (güç ölçümü) <input type="checkbox"/> Akım hata noktası tespiti <input type="checkbox"/> Kuvvet ölçümleme <input type="checkbox"/> Metal dedektörler <input type="checkbox"/> Sıvı düzeyi algılama <input type="checkbox"/> Sıcaklık/basınç/vakum algılama

Hall sensörlerinin motor içindeki konumu da önemlidir. Farklı kutup sayılarındaki motorlar için farklı sensör konumları gerekebilir. Tüm motorlarda aynı biçimde yerleştirilmiş olmayabilir. Genellikle 60° ve 120° aralıklarla yerleştirilir. Şekil 3.45'de Hall sensörlerinin diziliş şekilleri görülmektedir [65].



Şekil 3.45. Hall sensörlerinin farklı tipte yerleştirilmesi [65].

### 3.5. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA GÜÇ GERİ KAZANIMI

Enerji verimliliği artan enerji talebi ve azalan kaynaklar göz önüne alındığında çok önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerjiyi verimli kullanmayı bazı çevreler yenilenebilir enerji kaynağı olarak dahi görmektedir. Bu nedenle sürekli daha verimli, enerjiyi az kullanan, kendini insandan bağımsız kontrol eden sistemler, makineler üzerinde çalışılmaktadır.

Bir elektrik makinası, elektrik verildiğinde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmektedir. Bu şekilde çalıştığında motor ismini almaktadır. Ama mekanik enerji verildiğinde elektrik üretiyorsa ki bu yetenekleri vardır bu da dinamo ya da generatör çalışma adını alır.

Elektrikli araçlarda da bir elektrik motoru bulunması nedeniyle, bu motorun bazı durumlarda generatör olarak çalışması durumu üzerinde çalışılmıştır. Frenleme esnasında motorun generatör olarak çalışması sağlanarak, aracın sahip olduğu kinetik enerji tekrar elektriğe çevirip bataryalara depolaması gerçekleştirilmiştir.

Nitekim normal frenleme de yapılan işlem, fren diskleri ile sürtünme sağlanarak aracın hızının azaltılmasıdır. Bu sürtünme sırasında aracın hızlanması için harcanan bütün enerji (İYM ise benzin, mazot, elektrikli ise bataryalardan alınan enerji), ısı, ışık ve ses

olarak ihtiyaç duyulmayan ve iŖe yaramayan enerji formlarına dönüşür ve kaybolur. İŖte burada kaybolan bu enerji araç içerisinde zaten mevcut olan motorun, generatör modunda çalışması sağlanarak tekrar geri kazanılabilmektedir. İlk baŖlarda aracı hareket ettiren elektrik motoru, frenleme esnasında enerjisi kesildiğinden, aracın ataleti nedeniyle bu kez araç motoru hareket ettirmeye baŖlar. Motorun yapısına göre bu dönme hareketi motor sargılarında bir gerilim oluŖmasına neden olur. Bu gerilimde depo edildiğinde doğal olarak aracın veriminin artmasına, alınan menzilin uzamasına katkı sağlamaktadır.

Motor sargılarında indüklenen bu gerilimin seviyesi muhtemelen bataryaları Ŗarj etmeye yetmeyecektir. Bu nedenle sistemde gerilim yükseltici devrelere ihtiyaç duyulacaktır. Bu devreler ekstra bir maliyet ve hacim gerektireceğinden sürücü devresinin de bu frenleme anlarında yükseltici bir devre olarak çalışması öngörölmekte ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır.

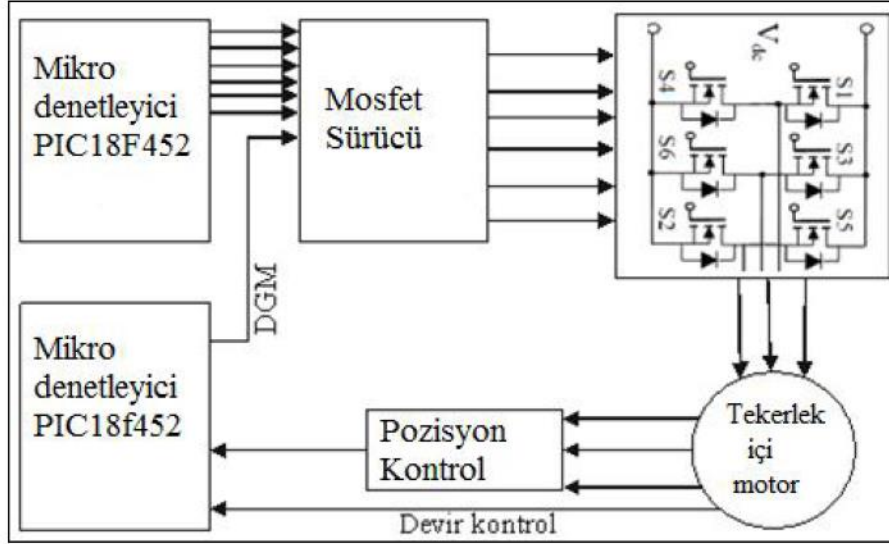
## 4. MOTOR SÜRÜCÜLER VE KATMANLARI

Şekil 4.1'de Yıldız'ın tasarladığı bir motor sürücü devresi blok olarak gösterilmiştir [16]. Görüldüğü gibi sistemin beyni denilecek bileşeni mikrodenetleyici kısımdır. Tüm kontrolleri mikrodenetleyici gerçekleştirir. Motorun türü ne olursa olsun, motordan sensörlü veya sensörsüz mutlaka bir konum bilgisi alınır. Sensörsüz sistemlerde zıt EMK akımı/geriliminden faydalanılarak rotor konumu tahmin edilmeye çalışılır. Sensörlü sistemlerde ise bu çok daha hızlı ve kolay olur. Sensörler, bir sürücünün önemli bir parçasıdır.

Sensörlerden gelen konum bilgisi, mikrodenetleyici tarafından işlenir. Bu bilgiye göre mikrodenetleyici gerekli anahtarlama sinyallerini (ki bu genellikle PWM sinyali olur) üretir. Üretilen bu sinyaller bazı tasarımcıların tercih ettiği gibi optokuplörler ile güç devresine iletilir. Kullanmayan tasarımcılar da mevcuttur. Optokuplörlerde sinyal iletimi ışık ile sağlandığından yüksek gerilim tarafında olan bir kısa devre veya arızalar, denetleyici tarafını etkilemeyecektir.

Optokuplörden ışık ile iletilen sinyaller MOSFET sürücü (gate driver) entegrelere iletilir. Gate sürücüler, anahtarlama elemanlarının tam manada ilettime ve kesime geçmesini sağlar, ölü zaman üretebilir ve alt üst MOSFET'lerin çakışmasını engelleyebilir. Bir mikrodenetleyici çıkışı her zaman bir MOSFET'i ilettime sokacak şekilde olmayabilir. Gate sürücüler bu sorunu ortadan kaldırmaktadır. Artık birçok tasarımcı bu entegreleri kullanmaktadır.

Gate sürücüler de güçlendirilen sinyaller inverter katındaki altta üç ve üstte üç olmak üzere toplam altı anahtarlama elemanını kontrol eder. Açılıp kapanan anahtarlama elemanları sayesinde motorun sargılarında oluşan manyetik alan rotoru takip eder ve istenilen hızda hareket sağlanmış olur.



Şekil 4.1. Birçok motor sürücü için geçerli bir blok şema [16].

#### 4.1. MİKRODENETLEYİCİ KATMANI

Sürücünün en önemli bileşenlerinden olan mikrodenetleyiciler, kendisine yüklenen yazılıma göre sistemdeki bütün sensörlerden gelen bilgileri alır, işler, değerlendirir ve sonuçta gerekli sinyalleri üretir, kontrolleri sağlar.

Mikrodenetleyici bir çok alt birimi barındıran bir entegre devredir. Bunlar mikroişlemci, giriş-çıkışlar, kristal osilatör, zamanlayıcı, seri ve analog giriş çıkışlar, programlanabilir hafızadır. Günümüzde neredeyse bulunmadığı elektronik cihaz yoktur; elektronik saatlerde, beyaz eşyalar, robotlar, biyomedikal cihazlar, endüstriyel otomasyonda, küçük ev aletlerinde ve daha birçok uygulamada kullanılmaktadır [100].

Mikrodenetleyicilerin içine atılan yazılım dili ilk zamanlarda makine diline en yakın dil olan Assembly ile yazılmıştır. Assembly ile program yazmak çok zordur ve bu nedenle pek anlaşılammış ve yaygınlaşmamıştır. Daha sonraya ortaya çıkan diller ise insanların kullandığı konuşma dillerine yakın olduğu için onlar tercih edilmiştir. Bunlardan da en yaygın olanı ve birçok dilinde kaynağı olan C dili en çok tercih edilen dil olmuştur. Birçok program adı farklı olsa dahi C dilinden türetilmiştir ve C'ye çok benzemektedir.

Sürücü tasarımlarında da mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır. Piyasada yaygın olan mikrodenetleyicilerin hemen hemen hepsi sürücülerde kullanılabilir. Hepsinin verimi farklı olsa da motor kontrolü sağlanmaktadır. Bu nedenle bir sürücü devresi için mikrodenetleyici seçerken birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bazı önemli

parametreler şunlardır; fiyatı, hızı (frekansı) boyutu, pin sayısı, analog dijital çeviricisinin çözünürlüğü ve analog pin sayısı, PWM çıkış frekansı ve PWM pin sayısı, çalışma sıcaklığı, kesme (interrupt) sayısıdır. Kullanılacak işe uygun özellikte mikrodenetleyici seçmek, ürünün fiyatını olumlu yönde etkilemektedir [101].

Çalışılacak uygulamada kolay matematiksel işlemler, açık kapalı kontrol gibi zor olmayan kontroller var ise basit bir mikrodenetleyici yetecektir. Lakin birçok verinin saklanması, işlenmesi, simüle edilmesi, zorlu hesaplar gerekiyorsa bilgisayar veya o ayarda bir sistem tercih edilmelidir. Eğer gerçek zamanlı çalışılacak, bir analog sinyal işlenecek, dijital biçime çevirilecek, üzerinde matematiksel işlemler yapılacak sonrasında yine analog işarete çevirilecek ise günümüzde yüksek örnekleme hızı ve işlem gücü sıkça tercih edilen DSP kartları tercih edilir [102].

Sürücü üzerinde çalışan birçok araştırmacı eğer basit işlemlerle kontrol edilen bir tasarım üzerinde çalışıyorsa mikrodenetleyicileri tercih etmiştir. Fakat karmaşık bir yapıda, daha çok özellikli ve yüksek işlem gücü gerektiren bir tasarım gerçekleştirmek istiyorsa DSP, FPGA ve dsPIC gibi kartlar sıklıkla kullanılmaktadır [10] .

Motor sürücü çalışmalarını incelediğimizde piyasada yaygın bulunan birçok mikrodenetleyicinin kullanıldığını görürüz. Bu tez çalışması sırasında yapılan araştırmalarda kullanıldığı görülen bazı mikrodenetleyiciler ve yüksek işlem gücüne sahip kartlar hakkında bilgiler aşağıda paylaşılmıştır.

Gödekoğlu çalışmasında fırçasız doğru akım motorunun sürülmesini ve kontrol algoritmalarını yönetecek ST7FMC ailesinden ST7FMC2S5T6 işlemcisi ile hazırlanmış olan kontrol kartını kullanmıştır [90].

Yazıcı ise yapmış olduğu çalışmada PI ve PID kontrollerini kullanmıştır. Kontrolcü olarak ise sayısal işlem yeteneği fazla olan TMS320F2812 DSP denetleyicisini kullanılmıştır. Bu DSP'nin flaş belleği, çok hızlı analog dijital çeviricisi, PWM modülleri ve CAN haberleşme birimi mevcuttur [15].

Yıldız çalışmasında uygun fiyatlı, örnek kodların çokluğu ve kolay bulunabilen PIC18f452 mikrodenetleyicisini tercih etmiştir [16].

Albayrak Tip-2 bulanık mantık kullandığı sürücü devresinde ana kontrol birimi olarak LPC1768 mikrodenetleyici kartı kullanmıştır. Bu kart 32 bit komut işleme yeteneğine, 100 Mhz saat hızına, 6 adet 12 bit ADC ye, USB üzerinden haberleşme ve ARM Cortex M3 işlemciye sahip güçlü bir karttır [17].

Cunha ve arkadaşları 2001 yılında bir fazlı asenkron motor kontrolünde PIC1C73A kullanmıştır. PWM sinyallerini bu denetleyici ile üretmiştir. 3/4 yük ve tam yük altında denemelerini gerçekleştirmişlerdir [103].

Rakesh Parekh 3 fazlı asenkron motorun gerilim/frekans kontrolünü PIC16F7X7 mikrodenetleyicisi ile sağlamıştır. Üç faz için üç adet PWM çıkışı ile sinüsoidal sinyal uyguladığını anlatmıştır [104].

Pandian ve arkadaşı çalışmasında 89C2051 mikrodenetleyicisi kullanmış ve asenkron motor kontrol etmiştir [105].

PIC118F4550 mikrodenetleyicisi kullanan Sridhar ve arkadaşları, asenkron motoru kontrol etmek için uzay vektör PWM kullanarak maksimum güç noktasını kontrol etmeye çalışmıştır [106].

Sandip ve arkadaşları bulanık mantık kullanarak V/f oranıyla üç fazlı asenkron motoru dsPIC tabanlı dsPIC 30F2010 ile kontrol etmiştir. Değişken yükler altında test ettikleri sürücünün endüstriyel alanda kullanılabilir düzeyde olduğunu söylemişlerdir [107].

Ruszewski ve arkadaşı sbRIO-9631 mikrodenetleyicisini kullanarak bir DC motoru kontrol etmiştir. Klasik PID yöntemi ile kesirli PID yöntemi karşılaştırmıştır [108].

İlten ise yaptığı çalışmada DSP ile PIC'lerin özelliklerini barındıran, endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen ve az arıza veren dsPIC30F4011 ile çalışmasını gerçekleştirmiştir. PI ve PID yöntemlerini karşılaştırmıştır [94].

Karakaş, motor hız kontrol uygulamasında yüksek matematik işlem yeteneğine sahip, 168 Mhz hıza kadar çalışabilen, ARM tabanlı bir mikrodenetleyici olan STM32F407VGT6 kartını kullanmıştır [99].

Kahveci çalışmasında ayırık zamanlı ve çakışık zamanlı anahtarlama göre motorun davranışını incelemiş ve kontrolör olarak PLC kullanmıştır [18].

Kahveci'nin çalışmasından 14 yıl sonra Aktuna ve arkadaşı yine bir PLC kullanarak bir sürücü tasarlamıştır. Projelerinde Siemens Simatic S7 200 PLC modelini kullanmışlardır. Rotor konumu için bir sensör kullanmamışlardır. Sensörlü tasarımların ulaştığı hız seviyelerine ulaşamadıklarını görmüşlerdir. Sonuç olarak PLC ile kontrol sağlanmış fakat yüksek hızlara çıkılamamıştır [19].

Bektaş ise motorun kontrolü için kontrolör olarak MC33035 kontrolcüsünü seçmiştir. Kontrolörün işlediği sensörlerden gelen konum bilgisi, inverter katındaki MOSFETleri kontrol etmektedir [20].

Wu ve Tian yaptıkları çalışmada, fırçasız doğru akım motor kontrolünde dsPIC30F4012 mikrokontrolcüsünü kullanmış, devre tasarlanmış, fan ve pompaların kontrolünde güvenle kullanılacak bir performans göstermiştir [24].

Karakulak ve arkadaşları fırçasız doğru akım motoruna 8 bit PIC16F877 mikroişlemcisi ile motor sürücü devresi tasarlamıştır [5].

Ulu yaptığı sürücü devresinde PI ve PID kontrolü mikrokontrolör olarak dsPIC30f6010 ile sağlamıştır ve bir fırçasız doğru akım motoru kontrol edilmiştir [25].

İlzuka, bir fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmek için, inverteri bilgisayar ile tetiklemiştir [26].

Zakariah ve arkadaşı yüksek hızlı, ekonomik ve kompakt bir sürücü devresi tasarlamış, kontrolcü olarak ise Aduc812 mikrodenetleyicisi ile çalışmışlardır [27].

Aydoğdu, içerisinde ADSP-21992 DSP mikrodenetleyicisi bulunan geliştirme kartı olan ADSP-21992 Ez-Kit Lite kullanarak bir fırçasız doğru akım motorunu genetik algoritma ile kontrol etmiştir [66].

Yıldırım, 28 pinli 6 PWM çıkışa sahip 16 bitlik dsPIC 30F3010 mikrodenetleyicisi ile bir fırçasız motoru kontrol etmiştir [82].

Buzpınar, kullandığı relüktans motor için tasarladığı sürücü devresinde PIC18F1330 mikrodenetleyicisini kullanmıştır. Devredeki parametrelerin takibi için ise yine aynı firmaya ait PIC18F452 mikrodenetleyicisini tercih etmiştir [98].

Yanpeng ve arkadaşı, bulanık mantık ile PID katsayılarını otomatik ayarlayabilen sürücü devresinde 32 bitlik DSP olan TMS320F2812 kullanmıştır. DSP de bulanık mantık arama çizelgesi C++ dilinde gerçekleştirilmiştir [109].

Qingding ve arkadaşları İntel 8031 işlemcisi ile pozisyon bilgisini alma, hata denetimi ve hız göstergesi görevlerini gerçekleştirmiştir. TMS320C25 DSP ile de akım ölçümü, hız ölçümü ve çevrimleri gibi genel kontrolleri sağlamıştır [110].

Erünlü çalışmasında motor kontrol uygulamaları için özel tasarlanmış olan 150 Mhz frekansla çalışabilen, 32 bitlik TMS320F28335 denetleyicisini seçmiştir ve kullanmıştır [111].

Çalışmalarını mini bir araç üzerinde test eden Alexander Rowe ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunun hızını kontrol etmeyi başarmışlardır. PI kontrol sistemi ile sistemi kontrol etmiş ve C8051F020 mikrokontrolcü kullanmışlardır [7].

Radu Duma ve arkadaşları Texas Instruments firmasının LM3S8962 mikrokontrolcüsü ile gerçek zamanlı fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmişlerdir. Kontrol sistemi olarak da PID yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca sistemi uzaktan kontrol edilebilen bir hale getirmişlerdir [9]. Tüm araştırmacıların kullandığı mikrodenetleyiciler toplu olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Bu çalışmada ise piyasada çok yaygın bulunan, ekonomik ve kolay programlanabilen Arduino Nano geliştirme kartı tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1. Sürücü devrelerinde tercih edilen mikrodenetleyiciler.

NU	MİKRODENETLEYİCİ	ARAŞTIRMACI
1	ST7FMC2S5T6	Hasan GÖDEKOĞLU
2	TMS320F2812 DSP	Yakup YAZICI
3	TMS320F2812 DSP	Yanpeng Dou ve Zhang Ze
4	TMS320C25	Guo Qingding
5	TMS320F28335	Gökhan ERÜNLÜ
6	Arduino Nano	Ümit YAVUZARSLAN
7	PIC16C73A	B.S. Cunha
8	PIC16F7X7	Rakesh Parekh
9	PIC16F877	Ozan KARAKULAK
10	PIC18f452	Harun YILDIZ
11	PIC18F1330	Mehmet Akif BUZPINAR
12	PIC118F4550	S. Sridhar
13	dsPIC 30F2010	Caner YILDIRIM
14	dsPIC 30F3010	Sandip A. WASKAR
15	dsPIC30F4011	Erdem İLTEN
16	dsPIC30F4012	Wu ve Tian

Çizelge 4.1 (devam). Sürücü devrelerinde tercih edilen mikrodenetleyiciler.

17	dsPIC30f6010	Burcu ULU
18	ADSP-21992	Ömer AYDOĞDU
19	STM32F407VGT6	Erkan KARAKAŞ
20	LPC1768	Muammer ALBAYRAK
21	LM3S8962	Radu DUMA
22	sbRIO-9631	Andrzej RUSZEWSKI
23	Aduc812	R. Zakariah
24	89C2051	G. Pandian ve S. Rama Reddy
25	C8051F020	Alexander Rowe
26	MC33035	Yasin BEKTAŞ
27	PLC (model Belirtilmemiş)	Saffet KAHVECİ
28	Siemens Simatic S7 200 PLC	Ali AKTUNA - Mustafa UZUN
29	Bilgisayar	K. Ilzuka.

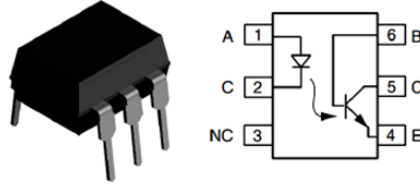
#### 4.2. OPTİK İZOLATÖR (OPTOKUPLÖR) KATMANI

Alçak gerilim veya bir bilgi sinyal ile yüksek gerilimin bir arada olduğu devrelerde, yüksek gerilim tarafında oluşabilecek bir problem nedeniyle alçak gerilim tarafının korunması için iki taraf arasındaki bağlantıyı fiziksel olarak değil de ışık kullanarak bilgi iletimini sağlayan elektronik devreler, entegreler kullanılır. Bu entegrelerde, alçak gerilim tarafındaki bilgi sinyalini ışığa çeviren bir dâhili led diyot, alıcı kısmında ise ışığa duyarlı fotodiyot, fototransistör gibi bir eleman bulunur. Bu yapıya optokuplör (optik izolatör) denilir.

Motor sürücü devrelerinde anahtarlama elemanları üzerinde yüksek gerilim ve akım değerleri olabilmektedir. Hızlı anahtarlama sonucu veya bir kısa devre durumunda bir hata olması ihtimali vardır. Lakin sürücüleri kontrol eden mikrodenetleyicilerin ürettikleri darbe genişlikli modülasyon sinyalleri düşük değerde üretilmektedir. Bu nedenle birçok sürücü uygulamasında mikrodenetleyici katını yüksek gerilim katındaki istenmeyen durumlardan korumak için optokuplörler kullanılmaktadır.

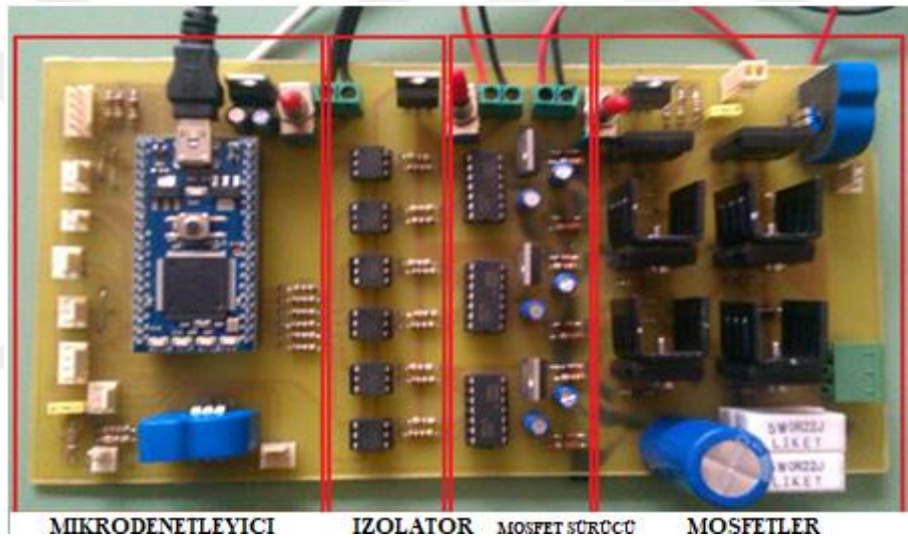
Optokuplör seçilirken dikkat edilecek en önemli parametreler hızı ve uygulama gerilimidir ve uygulamaya göre uygun izolatör seçilmelidir. Atan tasarlamış olduğu sürücüde optik izolatör kullanmıştır ve kolay kullanımı, ekonomik olması, çalışma

geriliminin devreye uygun olması ve çalışma frekansı nedeniyle 4N25 model optik izolatörü tercih etmiştir. Her PWM çıkışı için bir tane olmak üzere altı adet optik izolatör kullanmıştır. Şekil 4.2’de 4N25 entegresi ve içyapısı görülmektedir [23].



Şekil 4.2. 4N25 Entegresi ve içyapısı [23].

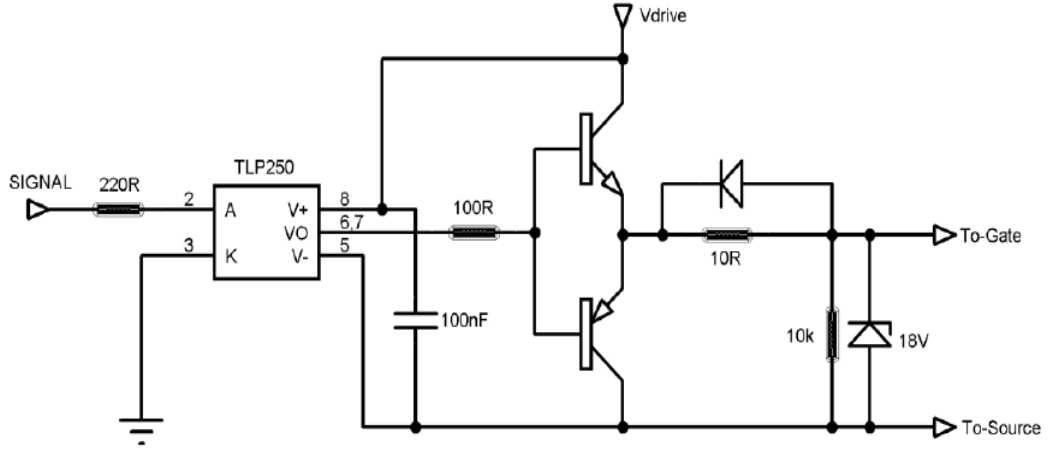
Şekil 4.3’de Albayrak’ın tasarlamış olduğu sürücü ve mikrodenetleyici çıkışında kullandığı altı adet 4N25 optokuplör entegresinden oluşan izolatör görülmektedir.



Şekil 4.3. Tasarımı tamamlanmış bir sürücü devresi ve katmanları [17].

Aktuna çalışmasında 4N35 optik izolatör tercih etmesinin sebebini, çalışma geriliminin devrede bulunan enerji kaynaklarına uyumlu olması olarak açıklamıştır. Farklı bir gerilim değerinde optik izolatör kullandığında farklı bir dc-dc dönüştürücü kullanmak zorunda kalacağını, sürücünün boyutları ve maliyetinin artacağını söylemiştir [19].

Karakaş’da çalışmasında TLP250 optik izolatörünü kullanmıştır. TLP250, çıkışında bir totem pole bulundurur ve bu sayede 1.5 A akım verebilir. Şekil 4.4’de TLP250 ve bağlantısı görülmektedir [13].



Şekil 4.4. PWM işaretinin TLP 250 ile iletilmesi [13].

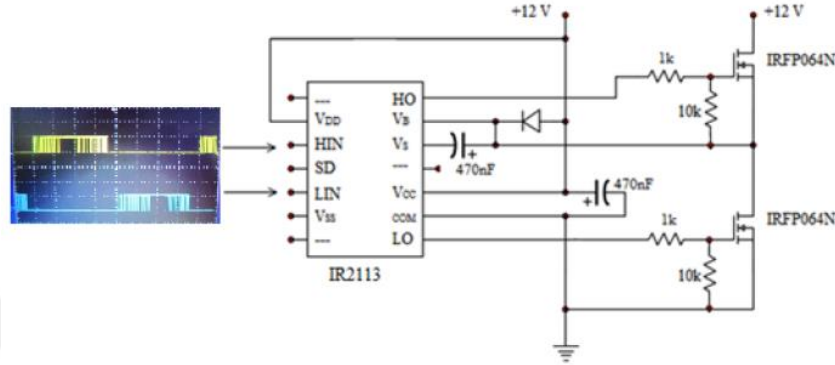
### 4.3. KAPI SÜRÜCÜ (GATE DRIVER) KATMANI

Bir sürücü içinde mikrodnetleyici ile üretilen kontrol sinyalleri istenildiğinde optik izolatörlerden geçirilerek ya da doğrudan inverter devresine iletilebilir, anahtarlama elemanları kontrol edilebilir. Lakin çoğu zaman mikrodnetleyici çıkışındaki sinyalin akım/gerilim değeri bir anahtarlama elemanını tam manasıyla kontrol etmeye yetmeyebilir. Bir anahtarlama elemanı tamamen kapanmadan ve ya tamamen ilettime geçmeden diğer elamanın ilettime veya kesime geçmesi kısa devrelere neden olacaktır. Bu nedenle mikrodnetleyici çıkışındaki sinyallerin güçlendirilmesi için sinyal kuvvetlendirici devreler ve entegreler kullanılmaktadır. Bu devrelere ve hazır üretilen bu entegrelere “Kapı Sürücü (Gate Driver)” devreleri denilmektedir. Piyasada yaygın olarak kullanılan anahtarlama elamanı MOSFETler olduğu için genellikle “MOSFET Sürücü” olarak anılmaktadırlar.

Anahtarlama elemanları kapı (gate) veya baz (beyz) pinlerinden aldıkları sinyal ile kontrol edilirler. Normal elektronik devrelerinden farklı olarak güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları belirli bir seviye de açılıp kapanırlar. Güç elektroniği devrelerinde ve özellikle sürücü devrelerinde sıklıkla kullanılan anahtarlama elemanları IGBT ve MOSFETlerdir. Bu iki elemanında ortak noktası, girişleri kapasitif karakteristik gösterir. Bu nedenle aynı sürücü devresi ile sürülebilirler. Girişteki kapasitenin doldurulup boşaltılma hızı aslında elemanların anahtarlanma hızını belirler. Bu nedenle bu kapasitenin şarj deşarjı kontrol etmek, anahtarlama elemanını kontrol etmek demek olacaktır [112].

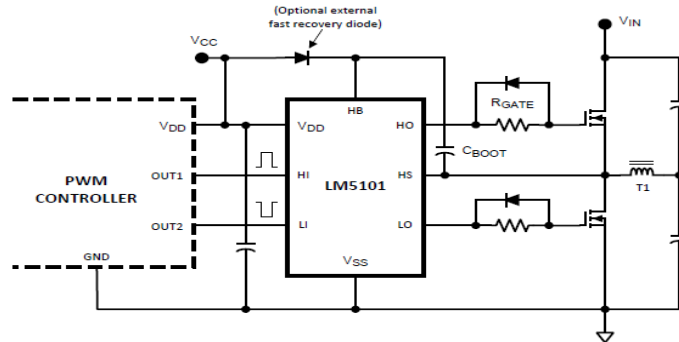
Albayrak Tip-2 Bulanık mantık kontrol yöntemi ile yaptığı sürücü tasarımında kullandığı üç fazlı motorun her bir faz kontrolü için bir MOSFET sürücü entegresi kullanmıştır. IR2113 MOSFET sürücü entegresini yüksek anahtarlama hızı ve kullanımının kolay olmasından dolayı tercih etmiştir.

Albayrak'ın sürücü devresinde, Toprak'ın da 300 Watt inverter devresi çalışmasında tercih ettiği IR2113 entegresinin yapısı ve bağlantı şekli Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. IR2113 entegresi ve bağlantı tipi [100].

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi mikrodenetleyicide üretilen PWM sinyalleri IR2113'e uygulanmaktadır. Sürücü entegresi gelen sinyali MOSFET'i sürecektir ve ayrıca kontrol devresi ile inverter devresi arasında bir izolasyonda sağlamaktadır. IR2113 girişine lojik 1 uygulanırsa MOSFETi iletime sokacak 12 V MOSFET'in kapı girişine uygulanır. Eğer lojik 0 uygulanırsa MOSFET kapısına 0 V uygulanır [100]. Piyasadaki en yaygın sürücü entegreleri International Rectifier şirketine ait IR ile başlayan sürücü entegreleridir. Şirket 13 Ocak 2015 tarihinde, Infineon Technologies tarafından satın alınarak, bünyesine katılmıştır. Çizelge 4.2'de şirketin ürün gamındaki bazı sürücü entegrelerini görebilirsiniz [113]. Şekil 4.6'da ise bir başka üreticiye ait MOSFET sürücü entegresi ve bağlantısı görülmektedir.



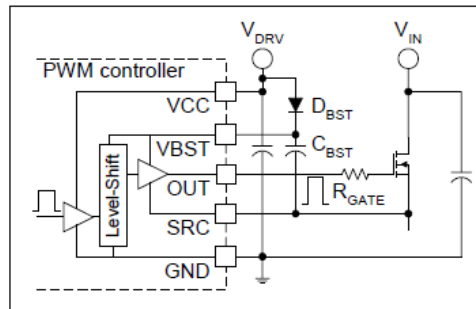
Şekil 4.6. Texas Instruments şirketine ait bir MOSFET sürücü ve bağlantısı [114].

Çizelge 4.2. International Rectifier şirketine ait bazı MOSFET sürücü entegreleri [113].

IR2136J	IRS2011	IRS2112	IRS2183	TLE7181EM	IR21084	IR2128
IR2136	IRS2011S	IRS2112S	IRS2183S	TLE7182EM	IR21084S	IR2128S
IR2136S	IRS20752L	IRS2113M	IRS21844M	TLE7183F	IR2108	IR2130J
IR21531D	IRS2101	IRS2113	IRS21844	TLE7184F3V	IR2108S	IR2130
IR21531	IRS2101S	IRS2113S	IRS21844S	TLE7184F	IR21091	IR2130S
IR21531S	IRS2103	IRS2117	IRS2184	TLE7185-1E	IR21091S	IR2131J
IR2213	IRS2103S	IRS2117S	IRS2184S	TLE7189F	IR21094	IR2131
IR2213S	IRS2104	IRS2118	IRS21864	TLE7189QK	IR21094S	IR2131S
IR2214SS	IRS2104S	IRS2118S	IRS21864S	2ED300C17-S	IR2109	IR2132J
IR2233J	IRS21064	IRS21271	IRS21867S	2ED300C17ST	IR2109S	IR2132
IR2233	IRS21064S	IRS21271S	IRS2186	IR2011	IR2110	IR2132S
IR2233S	IRS2106	IRS2127	IRS2186S	IR2011S	IR2110S	IR21363J
IR2235J	IRS2106S	IRS2127S	IRS2301S	IR2101	IR2111	IR21363S
IR2235	IRS21084	IRS21531D	IRS2304	IR2101S	IR2111S	IR21364S
IR2235S	IRS21084S	IRS21531DS	IRS2304S	IR2103	IR2112	IR21365S
IR2238Q	IRS2108	IRS2153D	IRS2308	IR2103S	IR2112S	IR21368S
IR25750L	IRS2108S	IRS2153DS	IRS2308S	IR2104	IR2113	IR2175
IR44252L	IRS21091	IRS21814M	IRS25751L	IR2104S	IR2113S	IR2175S
IR44272L	IRS21091S	IRS21814	IRS25752L	IR21064	IR2117	IR21771S
IR44273L	IRS21094	IRS21814S	IRS2890DS	IR21064S	IR2117S	IR2177S
IRS10752L	IRS21094S	IRS2181	IRS44262S	IR2106	IR2118	IR21814
IRS2005M	IRS2109	IRS2181S	IRS4426S	IR2106S	IR2118S	IR21814S
IRS2005S	IRS2109S	IRS21834	IRS44273L	IRS2111S	IR21271	IR2181
IRS2007S	IRS2110	IRS21834S	IRS4427	IR2127S	IR21271S	IR2181S

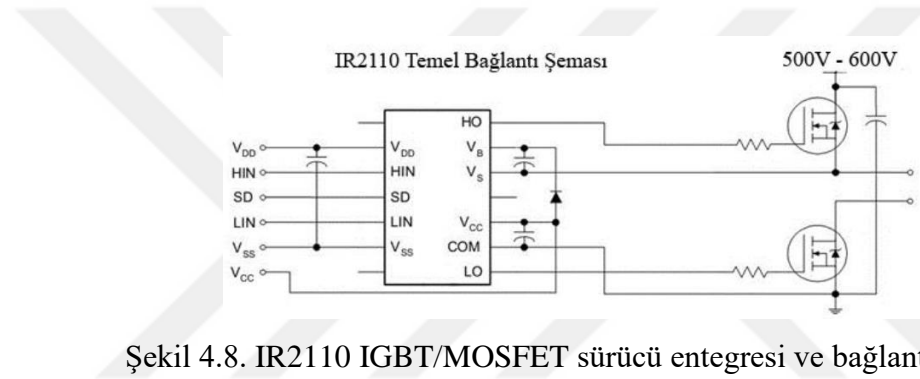
Bazı güç elektroniği devrelerinde anahtar elemanın bir ayağı toprak yerine başka bir elemana bağlıdır. Bu toprak ile bu noktanın bir potansiyel oluşturmasına neden olur. Dolayısı ile kapı (gate) ile kaynak (source) arasındaki gerilim istenilen değerde olmayabilir. Bu tip durumlarda bootstrap devresi denilen devreler kullanılır ve bu yapıya üst kol sürüş (high side drive) denir ve hesaplanmış bir kondansatör, bir direnç ve bir diyottan oluşur. Motor sürücüler üst kol sürüş tekniğini kullanan devrelerdir ve 2 ya da 3 fazlı evirici kullanan sürücülerde bootstrap kullanmak gereklidir [112].

Şekil 4.7’de olduğu gibi 24 V ve 48 V gibi orta giriş seviyesi uygulamalarında bootstrap elemanlarının bir kısmı PWM üretici içerisinde kullanılabilir.



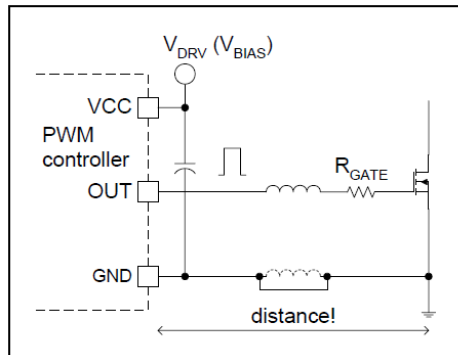
Şekil 4.7. Bootstrap sürücüsü [115].

Buzpınar hall effect sensörlü anahtarlama relüktans motor sürücü tasarımı çalışmasında anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanmıştır. Bu IGBT'lerin kanal-kaynak (Drain-Source) arası gerilimleri  $V_{DS}$  600 V ve kontrol edilmeleri için  $V_{GS}$  yani kapı-kaynak (Gate-Source) gerilimleri 10-25 V arasında olmalıdır. Mikrodenetleyici çıkışı bu değerleri sağlayamacağı için International Rectifier firmasının ürettiği IR2110 IGBT/MOSFET kapı sürücü entegresi tercih edilmiştir. IR2110 üzerindeki Shut Down (SD) pini sayesinde fazlardan sadece birinin açık kalması sağlanır. SD pinine gönderilen bir sinyal ile sürücü entegre çıkışlarını anında kapatabilir. Bu özellik, IGBT veya MOSFET'lerin kapı sinyallerini aynı anda bir sinyal ile kontrol etmeyi kolaylaştırmıştır. Şekil 4.8'de IR2110 IGBT/MOSFET sürücü entegresi ve bağlantısı görülmektedir [98].



Şekil 4.8. IR2110 IGBT/MOSFET sürücü entegresi ve bağlantısı [98].

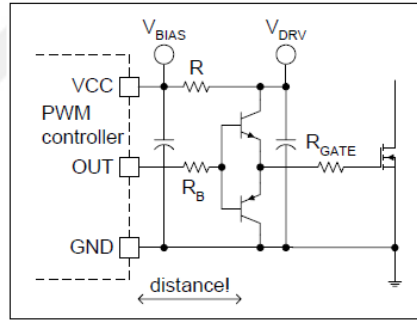
Bazı sürücülerde doğrudan kapı sürülebilir. Lakin devre tasarımına çok dikkat etmek gerekebilir. Denetleyici ile MOSFET arasındaki mesafe devreyi ve sinyali olumsuz etkileyebilir. Bu da anahtarlama hızını ve performansını düşürebilir. Bu aradaki uzaklık bir indüktansa neden olabilir bu yüzden bakır yollar geniş tutulmalıdır. Şekil 4.9'da direkt kapı sürücü devresi görülmektedir [115].



Şekil 4.9. Direkt kapı sürücü devresi [115].

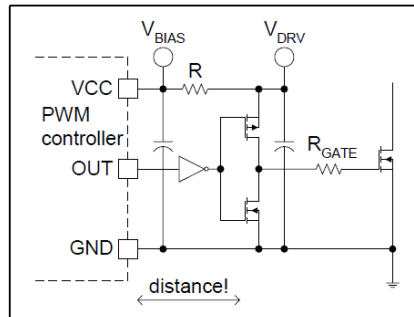
MOSFET ve IGBT'ler için en sık kullanılan kapı sürücü yapısı "Totem Pole" adı verilen devredir. Totem pole sayesinde MOSFETin kapı-kaynak kondansatörü süratle dolup boşalabilir, dolayısıyla eleman hızla açılıp kapanır. Yeni nesil sürücü entegreleri içlerinde totem pole yapısını da bulundundur. Buna ilaveten kısa devre koruması, açık kalma koruması, sıcaklık koruması gibi özellikler de içerir. Entegre devre kullanmak, normal devre kurmaktan daha ekonomik ve kart üzerinde alan olarak daha az yer kaplamasını sağlamaktadır [112].

İnverterdeki anahtarlama elemanlarını kontrol etmek yani sürmek için en ekonomik, popüler ve etkin devre totem pole devreleridir. Şekil 4.10'da evirmeyen totem pole devresi görülmektedir. Mikrodenetleyicinin çıkışındaki bypass kondansatörü ve transistör devresinin çıkışındaki bypass kondansatörü devrenin daha kararlı çalışmasını sağlar ve iki kondansatör arasına bir R direnci bağlanması önerilir. R<sub>gate</sub> direnci ise isteğe ve sisteme bağlıdır, opsiyoneldir. R<sub>B</sub> direnci ise transistörlerin beta değerlerine göre çıkış empedansını ayarlamak üzere değiştirilebilir [115].



Şekil 4.10. Transistörlü totem pole MOSFET sürücü devresi [115].

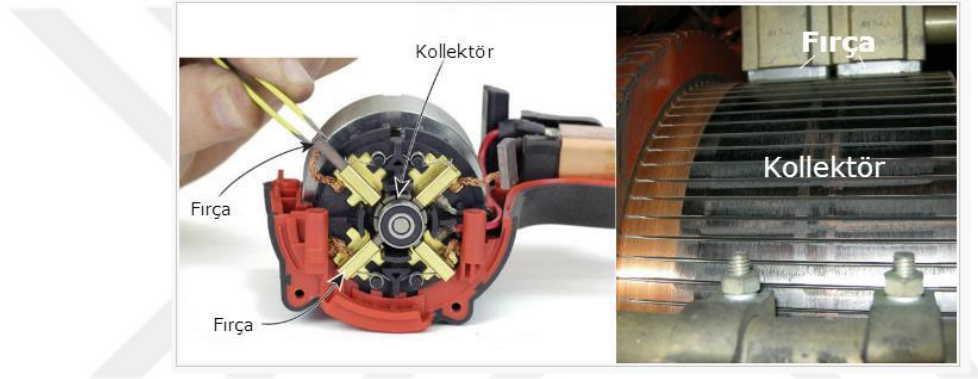
Şekil 4.11'de MOSFETlerle oluşturulmuş bir totem pole devresi görülmektedir. Bipolar yani transistörlü totem pole ile aynı özelliklere ve avantajlara sahip olsa da bazı olumsuz yanları vardır. Bu yüzden pek tercih edilmezler. Ekonomik değillerdir ve sürücüyü ters ederler bu yüzden PWM sinyalinin de ters edilmesi gereklidir [115].



Şekil 4.11. MOSFET'lerden oluşan totem-pole MOSFET sürücü devresi [115].

#### 4.4. EVİRİCİ (İNVERTER) KATMANI

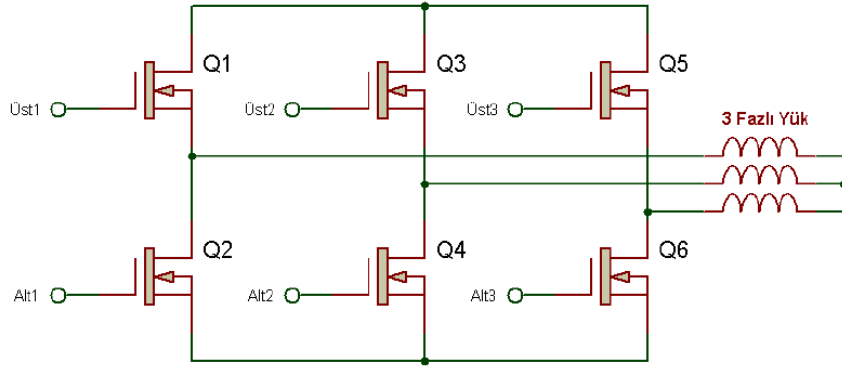
Motorların kontrol edilmesi işleminde doğru zamanda doğru sargılara enerji verilmesi işlemine komutasyon denilmektedir. Fırçalı motorlarda bu işlem fırça ve ekipmanları ile mekanik olarak gerçekleşir. Elektriksel iletimin sağlandığı karbondan yapılan parçalara fırça denilmektedir. Karbondan yapıldığı için piyasada kömür olarakta bilinir. Fırçaların temas ettiği, sargıların bağlı olduğu başlıklara da komutatör veya kollektör denilmektedir. Şekil 4.12’de fırça ve kolektörün kullanım şekilleri görülmektedir. Kollektöre sürtünen fırçaların kolektörde yaptığı iz görülmektedir. Bu baskı sonucu, ses ve kıvılcım oluşmakta bu da kayıp oluşturmakta verimi düşürmektedir. Ayrıca tükenen kömürlerin tozları etrafa saçılmaktadır.



Şekil 4.12. Kollektör ve fırça genel görünüm [82].

FDAM’larda ise bu kontrol elektronik olarak yapılmaktadır. DC ana kaynak gerilimi, rotor konumuna göre anahtarlanarak sargıların enerjilendirilme sırası değiştirilerek yön ve hız kontrolü gerçekleştirilir. Bu anahtarlama elemanlarından oluşan sürücü katmanına evirici yani inverter denilmektedir [15].

FDAM’lar ve motorların birçoğu üç fazlı olarak üretilir. Üç fazlı devrelerde genellikle altı anahtarlı köprü tipi eviriciler kullanılır. Sadece motor sürücü değil solar uygulamalarda, yüksek gerilim uygulamalarında, kesintisiz güç kaynaklarında da sıklıkla altı anahtarlı evirici yapısı kullanılır. Bu anahtarlar çok hızlı bir şekilde sırayla anahtarlanarak istenilen fazları iletme sokar. Oluşturulan akımın dalga şekli anahtarlara uygulanan sinyal ile kontrol edilebilir. PWM yöntemi ile kontrol edilen eviricilerde faz akımları kare dalga şeklinde oluşur [112]. Şekil 4.13’de altı anahtarlı bir evirici şeması görülmektedir [94].



Şekil 4.13. Üç fazlı altı anahtarlı bir evirici devresi [94].

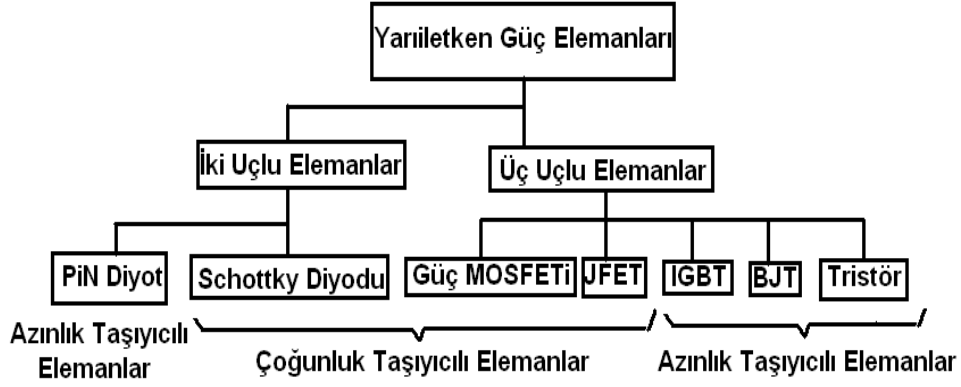
Eviriciler, çıkışında ürettiği dalga şekline göre gerilim kaynaklı eviriciler ve akım kaynaklı eviriciler olarak iki grubu ayrılır. Gerilim kaynaklı eviriciler, DC-AC dönüşümünde endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılır. Bu eviricilerde kaynaktan dolayı anahtarlam elemanları ileri anahtarlama bölgesinde çalışır ve GTO, BJT, MOSFET ve IGBT gibi anahtarlama elemanları bu uygulamalarda kullanıma uygundur [88], [116], [117].

Düşük güçlü uygulamalarda tek fazlı eviriciler yeterli olmaktadır. Eviriciler kontrol ve tasarım açısından DGM eviriciler, kare dalga eviriciler ve gerilim bastırılmalı tek faz eviriciler olmak üzere üçe ayrılmaktadır [88], [118].

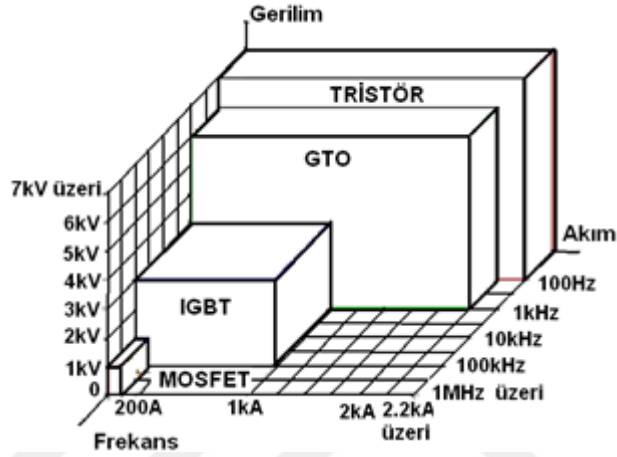
#### 4.4.1. Anahtarlama Elemanları

Eviricilerin en önemli elemanları şüphesiz ki anahtarlama elemanlarıdır. Bir anahtar seçilirken, kayıpları, iletme ve kesime geçme hızları, üzerlerinden geçirebileceği akım, soğutulabilme imkânı gibi değerlere dikkat edilmelidir. Bu çalışmada seçilen anahtarlama elemanları yükün çekebileceği maksimum güç değerlerine göre tercih edilmiştir. Sürücülerde anahtarlama elemanı olarak genellikle mosfetler kullanılsa da yükün güç durumuna göre transistör ve IGBT’de kullanılmaktadır [23].

Bu yarıiletken güç elemanlarının geçmişi 1957 yılında tristörün icadıyla başlamıştır. Bu tarihlerden sonra birçok güç kontrol sistemleri elektronikleşmeye başlamıştır. Elektrikli otomobillerin gelişimini bile etkileyen bir faktör olmuştur. Sık kullanılan bu elemanlar entegre yapı olarak bile tasarlanıp piyasaya sürülmüştür. Şekil 4.14’de bu yarıiletken malzeme grubu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.15’de frekans ve çalışma gerilimine göre anahtarların sınıflandırılması görülmektedir. Gelişen teknoloji ile giderek güçleri artmakta, boyutları küçülmektedir [119].



Şekil 4.14. Güç elemanları ailesi [119].

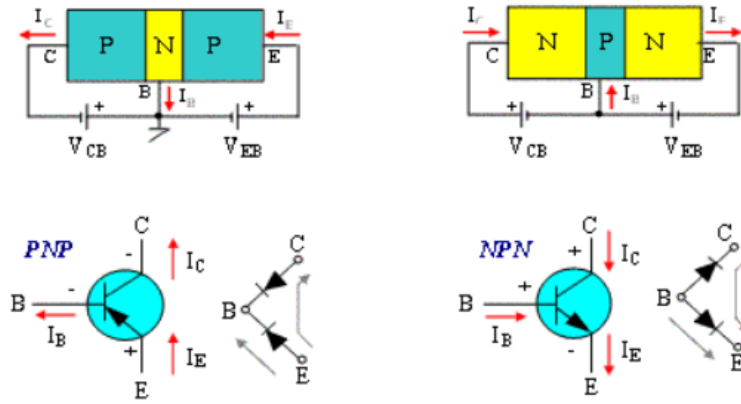


Şekil 4.15. Güç elemanlarının çalışabileceği akım, gerilim ve frekans alanları [119].

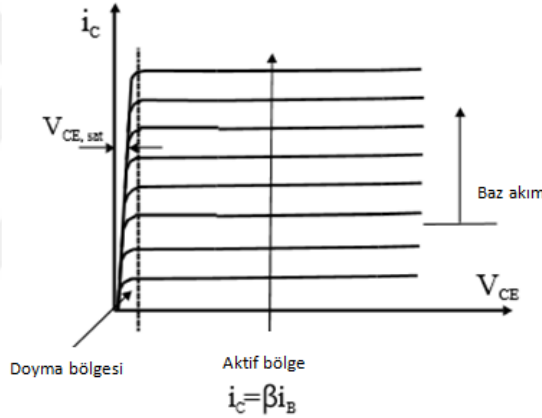
#### 4.4.1.1. Transistörler (Bipolar Jonksiyonlu Transistör, BJT)

Düşük güçteki motorların sürülmesindeki yarım köprü ve tam köprü devrelerinde sıklıkla kullanılırlar. Tam kontrollü bir yarıiletken devre elemanıdır. Üç pini vardır ve bunlar, kolektör (C, collector), beyz (B, base) ve emiter (E, emitter) dir. Kontrol ucu beyz ucudur. N ve P tipi maddelerin sırasıyla N-P-N ve P-N-P şeklinde dizilmesiyle iki tip transistör vardır. NPN tipi transistör de kontrol ucu P tipi madde olduğundan beyze pozitif, PNP tipi transistor de ise iletme geçmesi için beyz ucuna negatif yönlü tetikleme sinyali uygulanmalıdır. Transistörler akım kontrollü devre elemanlarıdır. Şekil 4.16'da transistörlerin yapısı ve sembolleri görülmektedir. Transistörler ile MOSFET'ler karşılaştırılacak olursa, düşük anahtarlama frekanslarından dolayı iletim kayıpları daha az olması bir avantajdır. Lakin iletim ve kesime geçme hızlarının yavaş olması önemli bir dezavantajdır. Bu da çıkış sinyalinin dalgalı olmasına neden olur. Ayrıca kullanılabilirleri akım değerini az olması sürücülerde çok fazla tercih edilmemesine sebep olmaktadır. Daha çok sinyal kuvvetlendirici olarak

kullanılmaktadır. Bir transistör kesimde, doyumda ve aktif olarak çalışabilir. Şekil 4.17’de bir transistorün çalışma alanları görülmektedir [112], [116].



Şekil 4.16. Transistör sembol ve içyapısı [120].



Şekil 4.17. BJT çalışma bölgeleri [116].

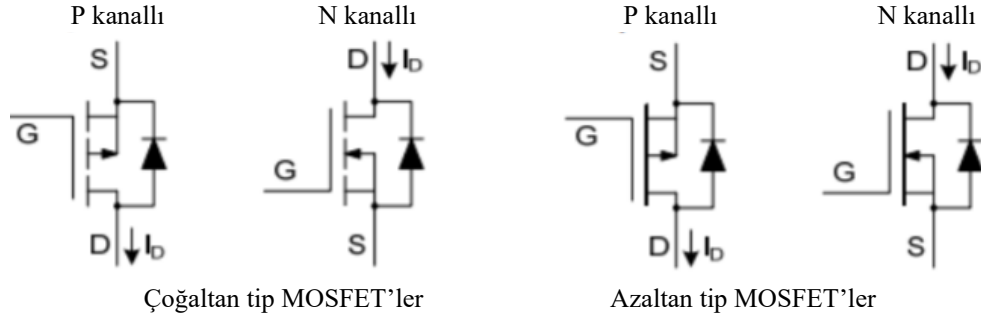
#### 4.4.1.2. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

MOSFET’ler transistör gibi çalışan ama gerilim kontrollü bir devre elemanıdır. Eviricilerde sıklıkla kullanılır. Çok hızlı anahtarlanması, üzerinden geçen akımın yüksek olması motor sürücülerinde, televizyon teknolojisinde, smps güç kaynaklarında yaygın olarak tercih edilme sebebidir [119].

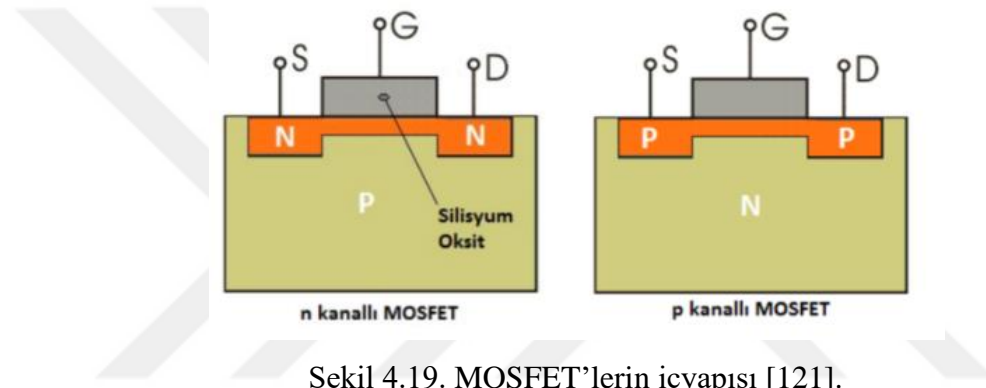
MOSFET’lerin pinleri kapı (gate-G), kanal (drain-D) ve kaynak (source-S) olarak isimlendirilir. N ve P tipi olmak üzere iki türdür. Kontrol ucu olan kapı ucuna uygulanan gerilim ile kanal ile kaynak arasındaki akım kontrol edilmektedir [100]. Şekil 4.18’de MOSFETlerin pinleri ve sembolleri görülmektedir.

N ve P tipi MOSFET’lerde kendi arasında azaltan ve çoğaltan olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Azaltan tip MOSFET’lerde VGS (gate-source) gerilimi sıfır ya da

negatif olsa bile bir miktar  $I_{DS}$  (drain-source) akımı akıtırlar. Çoğaltan tip MOSFET'lerde ise  $V_{GS}$  için bir eşik değeri vardır. Bu eşik aşılmadan  $I_{DS}$  akımı akmaz. Şekil 4.19'da MOSFETlerin içyapısı görülmektedir.

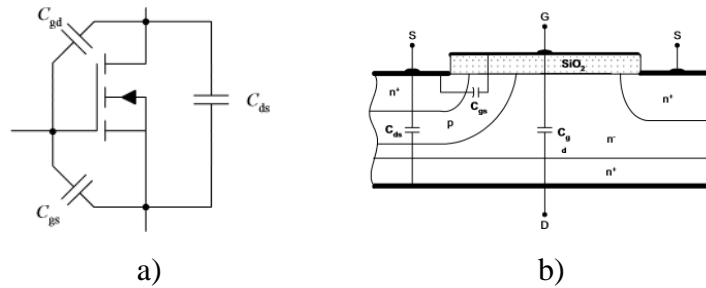


Şekil 4.18. Çoğaltan ve azaltan tip MOSFET sembolleri [121].



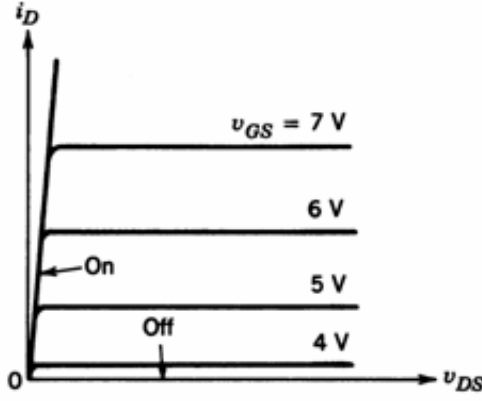
Şekil 4.19. MOSFET'lerin içyapısı [121].

Adında anlaşılacağı gibi elektrik alan ile iletme geçtiği için bir gerilim uygulanması gerekmektedir. İletime geçmesi için çok küçük bir akıma ihtiyaç duyar. Şekil 4.20'de bir MOSFET ve pinleri arasında oluşan kapasitif etkiyi temsil eden kondansatörler görülmektedir.



Şekil 4.20. MOSFET şekli a) Temsili kondansatörler b) Enine kesiti [13], [23].

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi MOSFET pinleri arasında kapasitif bir etki görülmektedir. Aslında bir MOSFET'in sürülmesi demek bu kapasitelerin şarj deşarjı olayıdır. Ne kadar hızlı şarj ve deşarj olursa bir MOSFET o kadar hızlı iletim ve kesime sokulur. Şekil 4.21'de bir MOSFET'in karakteristik eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.21. MOSFET karakteristik eğrisi [23].

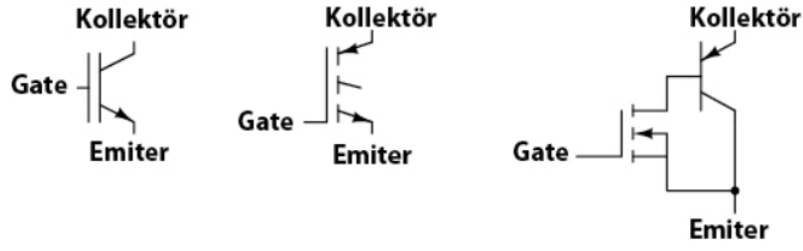
MOSFET'ler, iletme geçtikleri sırada küçükte olsa bir direnç gösterirler. dolayısıyla üzerinde bir gerilim düşümü yani kayıp oluşur. Bu nedenle bir MOSFET seçiminde bu direnç de göz önünde bulundurulmalıdır. Transistörlere göre en büyük dezavatajı bu iletim kayıplarıdır. Ama transistörler de MOSFET'lerin çalışma hızına ulaşamazlar. 10 kW güce kadar rahatlıkla kullanılabilir. Sonrasında ise IGBT'ler tercih edilmeye başlanır. Gelişen malzeme teknolojisi ile bu değer daha yükseklere çıkabilir [122].

Anahtarlama kayıplarından dolayı anahtarlama elamanlarında ısınma sorunu vardır. Dolayısı ile soğutulmaları gerekmektedir. Soğutulmazlar ise MOSFET'in bozulması kaçınılmazdır. Oluşan ısının elemandan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için genellikle alüminyum bloklar kullanılır ve gerekirse bir fan ile de blok soğutulur. MOSFET'lerin soğutucu bloğa montajında blok ile MOSFET arasında yalıtkan ama ısı iletimi olan malzemeler kullanılır. Gerekirse ısı iletimi sağlayan, bilgisayarlarda işlemci soğutucularında kullanılan termal macun da kullanılabilir. Ayrıca MOSFET'lerin gövdesindeki deliğe uygun yalıtkan boncuklar bulunmaktadır. MOSFET'lerin ısı iletimi sağlanırken elektriksel iletkenliğinin izole edilmesi çok önemlidir.

Soğutucu tercihi yaparken MOSFET'de oluşacak ısı hesaplanmalıdır. Isı oluşumunun nedenleri iletim kayıpları ve anahtarlama kayıplarıdır. MOSFET'in anahtarlama frekansı bu yüzden ısınmayı etkiler, frekans arttıkça ısınma da artar [99].

#### 4.4.1.3. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT'ler, MOSFET ve transistör ün birleşimi gibi düşünülebilecek bir devre elemanıdır. MOSFET'lerde oluşan iletim kaybından dolayı yaşanan problemler, IGBT'nin üretilmesine neden olmuştur. Şekil 4.22'de IGBT'nin eşdeğer devresi ve sembolü görülmektedir.



Şekil 4.22. IGBT sembolü ve eşdeğer devre şeması [123].

Transistör gibi düşük kayıplı, MOSFET gibi kolay sürülme ve yüksek güçlere dayanması IGBT'lerin tercih nedenidir. Lakin hala IGBT'ler MOSFET'lerin hızını yakalayamamış, yakalayanlarda yüksek fiyatlı olduğundan yaygınlaşmamıştır. Çizelge 4.3'de anahtarlama elemanlarının karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 4.3. Anahtarlama elemanlarının karşılaştırılması [116].

Eleman	Yıl	$V_{maks.}$	$I_{maks.}$	$f_{maks.}$	$P_{maks.}$	Ger. Düş.
Tristor	1957	6 kV	3,5kA	500 Hz	100 MW	1,5 – 2,5 V
Triyak	1958	1 kV	100A	500 Hz	100 kW	1,5 – 2 V
GTO	1962	4,5 kV	3 kA	2 kHz	10 MW	3 – 4 V
BJT	1960	1,2 kV	800 A	10 kHz	1 MW	1,5 – 3 V
MOSFET	1976	500 V	50 A	1 MHz	100 kW	1 – 2 V
IGBT	1983	1,2 kV	400 A	20 kHz	100 kW	1 – 2 V
GaN	1990	600 V	50 A	>10 MHz	100 kW	0 – 1 V

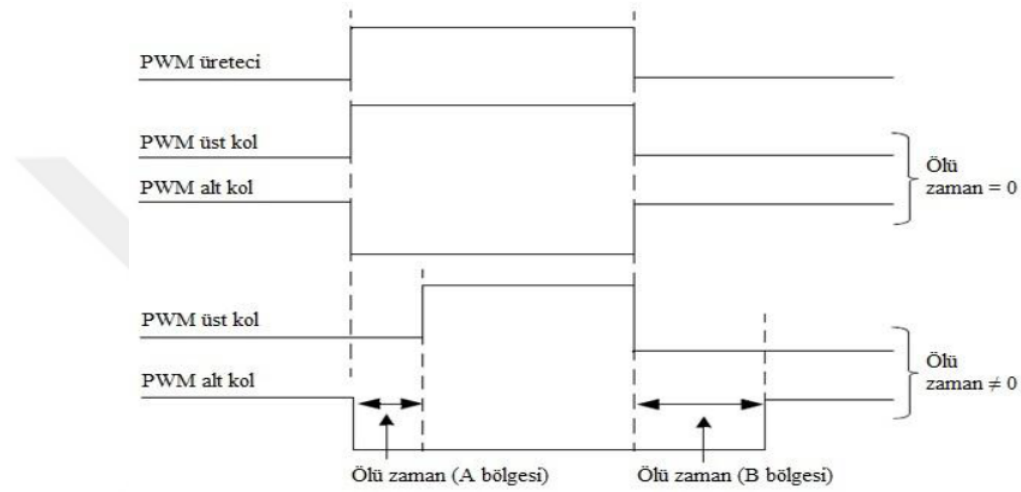
#### 4.4.2. Ölü Zaman (Dead Time)

Evirici katındaki anahtarların alt üst olmak üzere iki sıra halinde olduğu görülmektedir. Üst anahtarlar bir kutuba alt anahtarlar ise diğer kutuba bağlıdır. Bir sargı da ya pozitif kutup, ya negatif kutup ya da hiç enerji olmamalıdır. Bu sebeple yüksek hızlarda sürülen anahtarlardan aynı sırada olan ikilinin aynı anda iletimde olmaması gerektiği açıkça görülmektedir. Aynı faza ait iki anahtarın iletimde olması demek, bataryanın veya güç kaynağının kısa devre olması demektir. Bu durumda sistemdeki anahtarlama elemanları başta olmak üzere birçok eleman zarar görecektir.

Teorik olarak bir anahtar iletime geçtiği anda diğer anahtar kesime geçmektedir. Lakin gerçekte bu böyle olmamaktadır. Bir anahtar tamamen kesime geçmeden diğer anahtar iletime geçebilmektedir. Bu da kısa devreye neden olacaktır. İşte bu çakışmayı engellemek için, bir anahtarın iletime geçmeden, diğer anahtarın tamamen kesime geçmesi için bir süre geçmelidir. Bu süre ölü zaman olarak tanımlanmaktadır. Bu ölü

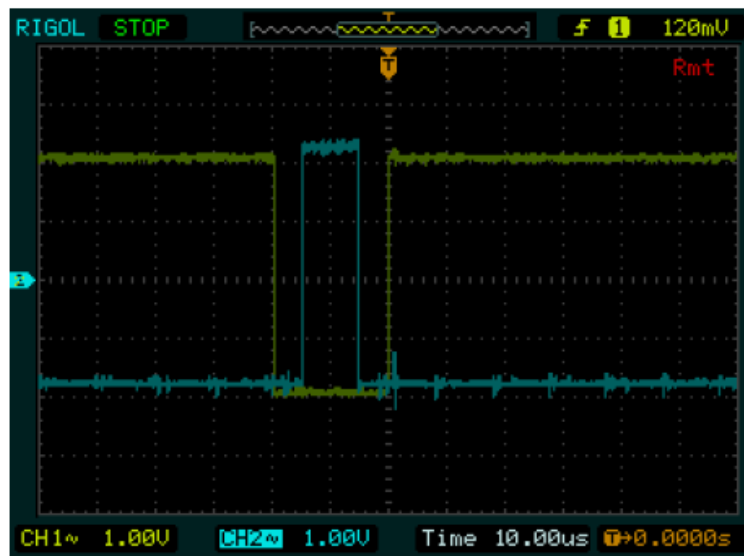
zamanı oluşturmak için similatörlerde ölü zaman üreteçleri oluşturulur. Devrelerde ise MOSFET sürücüler bunu sağlar ya da ilave elemanlarla bu zaman üretilir.

Anahtarlama elemanları PWM sinyalleri ile kontrol edildiklerinden ölü zamanda bu sinyallerin ya başına ya sonuna ya da her iki kısma da eklenebilir. Şekil 4.23’de ölü zamansız bir PWM sinyali ile ölü zamanlı bir PWM sinyali görülmektedir. Periyodu çok küçük sinyallerde ölü zaman sinyalin yok olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ölü zaman sinyalin en fazla üçte biri kadar olmalıdır [124], [125].



Şekil 4.23. Ölü zaman eklenmemiş ve eklenmiş PWM sinyali [125].

İlten’in çalışmasında kullandığı dsPIC ile PWM sinyalinde oluşturduğu ölü zamanın osilaskop görüntüsü Şekil 4.24’de görülmektedir.



Şekil 4.24. Bir PWM sinyalinde oluşturulan ölü zamanın görüntüsü [94].

### 4.4.3. Denetleyiciler

Rotor pozisyonunun kontrolü bir sürücünün en önemli görevlerinden biridir. Bu işlem için ise denetleyici kullanmak gerekir. Mevcut sistemlerde kullanılan denetleyiciler klasik denetleyiciler (PI, PID) ve modern denetleyiciler (Bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma, lineer karesel kontrol v.s.) olarak iki gruba ayrılmaktadır [68].

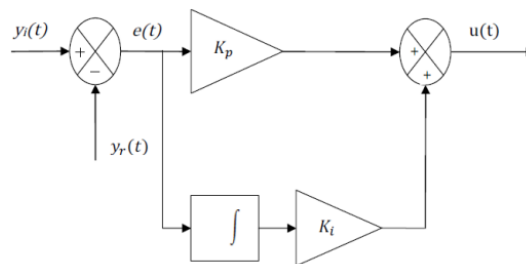
#### 4.4.3.1. Klasik Denetleyiciler

Klasik denetleyiciler basit ve ucuz yapıya sahiptir. Yeteri kadarda verimli de çalışmaktadır. Bu yüzden endüstride yaygın bir kullanıma sahiptir. PI ve PID kontrol bu bölümde kullanılan yöntemlerdir. Klasik denetleyicilerin sinüsoidal yüklerde ve ani olarak değişen yüklerde performanslarının düşük olduğu gözlenmiştir [25].

PI veya PID'deki P, oransal denetleyici olmaktadır. Anlık hata düzeltmeyi sağlamaktadır. Katsayısı " $k_p$ " ile gösterilir. I, integral denetleyicidir, katsayısı " $k_i$ " dir ve kararlı hal hatasının çıkarılmasında etkilidir. D ise türevsel denetleyici olup, sistemin kararlı çalışmasında etkilidir. Aşmayı azaltır ve geçici tepki değişimini düzeltir. Katsayısı " $k_d$ " dir [25].

##### 4.4.3.1.1. PI (Oransal Integral) Denetleyici

Oransal ve integral yöntemleri ikisi birlikte uygulanmaktadır. Şekil 4.25'de PI kontrol devresinin blok diyagramı görülmektedir. Oransal denetim ile sürekli hal hatası kontrol edilir ve sıfır olması istenir. Bu nedenle integral denetleyiciside devreye eklenmiştir. İlk kalkış anında ve yük değişiminde sistem kararsızlıklarında bir salınım yapmaktadır ve kararlı duruma gelmektedir. Sürekli durum hatasının sıfır olmasını integral denetleyicisi sağlamaktadır [126].



Şekil 4.25. PI kontrol yapısı [25].

PI kontrol yöntemi genellikle kapalı çevrimlerde kullanılır. Sinyale uygulanan işlemler Denklem (4.1)'de verilmiştir.  $u$  kontrol değeridir.  $K_p$  ve  $K_i$  denetleyici sabitleri ve  $e$ 'de hata fonksiyonudur.

$$u(s) = K_p e(s) + K_i \frac{1}{s} e(s) \quad (4.1)$$

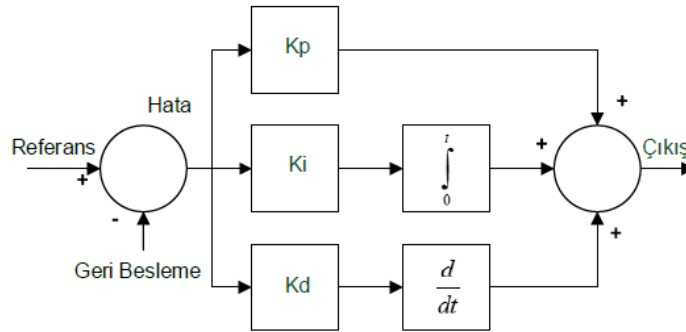
#### 4.4.3.1.2. PID (Oransal Integral Derivative) Denetleyici

Dinamik sistemlerin kontrolünde % 85 PID kontrolü kullanılmaktadır. İlk uygulamaları pnömatik sistemlerde görülmüştür. Kontrol parametrelerinin ayarlanması PID tasarımının en önemli konusudur. Parametreler çalışma süresince ya sabit girilen değerler olmaktadır ya da sensörlerden gelen verilere göre değişken olmaktadır. Olumsuz yanları matematiksel modele ihtiyaç duyması ve liner olmayan sistemlerin kontrolünde başarılı olmaması verilebilir. Basit yapısı ve kararlı çalışması ise olumlu yönleridir [127]-[129]. PID uygulanan sistemde hata sinyaline uygulanan işlemler Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'de verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.2)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.3)$$

Şekil 4.26'da ki blok diyagramda PID kontrolün blok yapısı görülmektedir.  $e(t)$  hata sinyalini,  $r(t)$  referans sinyalini  $y(t)$  çıkış sinyalini ve  $u(t)$  kontrol sinyalini kullanacaktır [11].



Şekil 4.26. PID kontrol blok şeması [17].

Çizelge 4.4. PID kontrolde katsayıların sisteme etkileri [17].

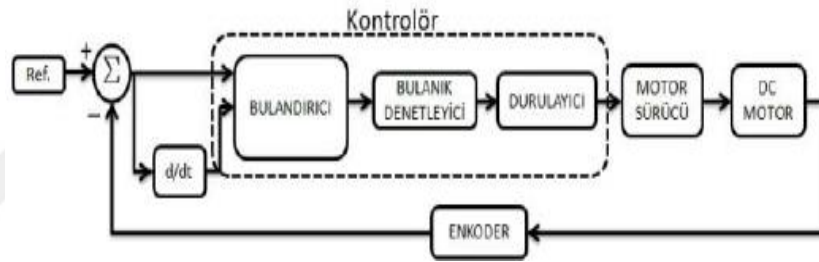
Katsayı	Yükseliş Zamanı	Aşım	Yerleşim Zamanı	Sürekli Rejim Hatası
Oransal	Azalır	Artar	Artar	Azalır
İntegral	Azalır	Artar	Artar	Azalır
Türev	Etkisiz	Azalır	Azalır	Etkisiz

#### 4.4.3.2. Modern Denetleyiciler

Bilgisayar teknolojilerini de gelişmesiyle işlemciler güç ve hız kazanmıştır. Bu şekilde tasarlanan programlama dilleri de yeteneklerini ve fonksiyonlarını geliştirmiştir. Doğa da varolan bazı çalışma düzenleri, programlama dilleri ile günlük işlere de uygulamalara çalışılmaya başlanmış ve verimli sonuçlar verdiği görülmüştür. Motor sürücü kontrollerinde de bu yöntemler denenmekte ve diğer yöntemlerle karşılaştırmaları yapılmaktadır. En sık kullanılan modern kontrol yöntemleri bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritma uygulamalarıdır [65].

##### 4.4.3.2.1. Bulanık Mantık

Azeri bilim adamı A. Zadeh tarafından 1964 yılında ortaya atılan teori birçok uygulamada denemiştir. Sayısal bilgi olan 1 ve 0 yerine birden çok üyelik fonksiyonlarından oluşan bir yapıdır. Şekil 4.27'de bulanık mantık kontrol blok diyagramının bir motor sürücüdeki konumu görülmektedir [11].



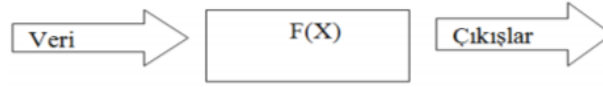
Şekil 4.27. Bulanık mantık kontrol yönteminin kullanan bit motor sürücü blok diyagramı [11].

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi bulanık mantık kontrolü için iki giriş değeri gerekmektedir, hata ve hata değişimi. Hata, motor çıkışındaki konum ve hız sensöründen ölçülen anlık hız verisinin, referans değerinden çıkarılması ile elde edilir. Bulunan hata ile bir önceki hata arasındaki fark da hata değişimini vermektedir. Bu iki bulandırma işlemi denilen bir yapıya sokulur. Daha önce verilen kabullere göre bir çıkarım elde edilir ve durulama işleminden sonra kontrol sinyali elde edilmiş olur. Bir bulanık mantık denetleyicisinin ana çalışması bu şekilde gerçekleşir [11].

##### 4.4.3.2.2. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), bir düzen çerçevesinde, birbirleriyle ilintili birçok verinin giriş olarak kullanıldığı ve uygun sonuçların elde edildiği bir yapıdır. Bu yapı bir matematiksel fonksiyondur lakin sabit değildir, yani her kullanımda farklı bir formül

oluşturup kullanabilen kapalı bir sistemdir. Şekil 4.28’de bu prensibin temel mantığı verilmiştir.

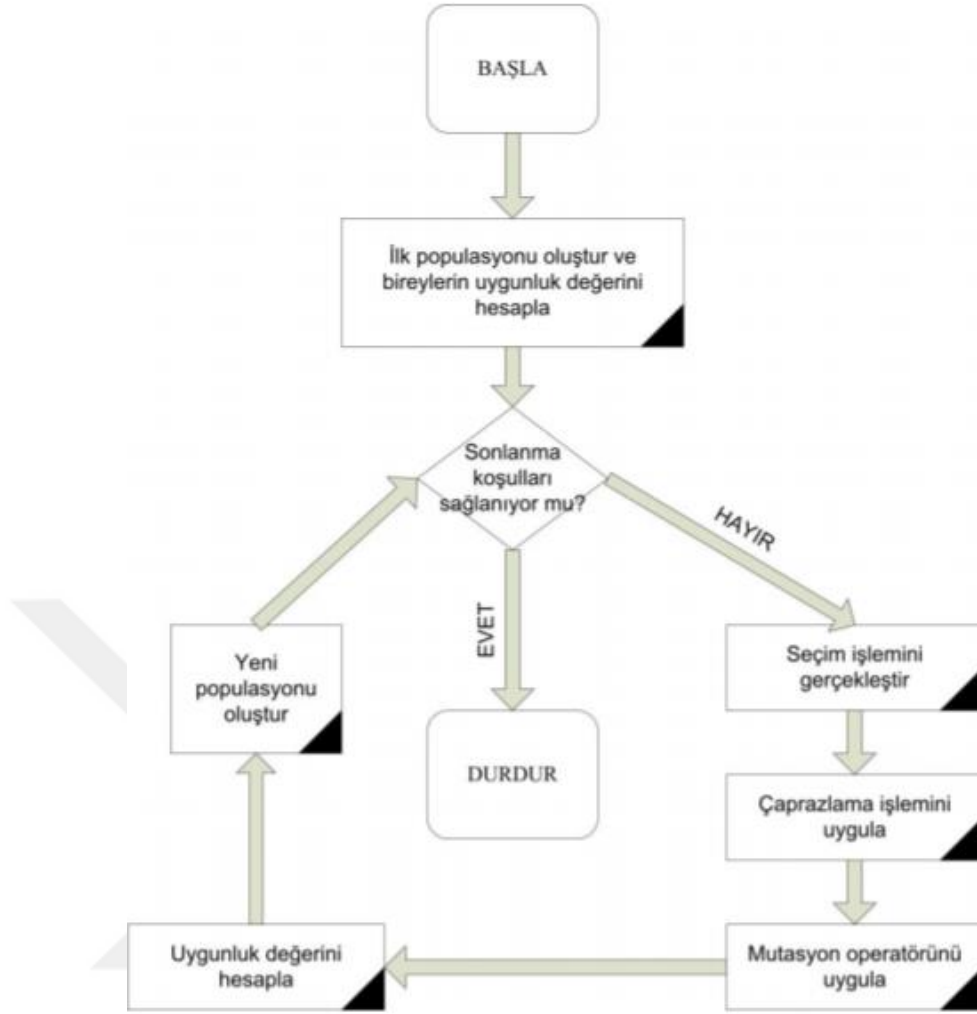


Şekil 4.28. YSA temel yapısı [130].

Yapay sinir ağları insan beyninin sinir hücrelerini çalışmasını rol model alır. Basit bir YSA, giriş yani verilerin sisteme yüklendiği hiçbir işleme tabi olmayan katmandır. Ara katman, girdilerin belirli bir işleme tabi tutulduğu ve her seferinde fonksiyonu değişen katmandır. Çıkış katmanı ise yapılan işlerin, sonuçların çıktı olarak dışarıya gönderildiği katmandır. Beynin çalışması ve öğrenmesini temel alır. Giriş olarak verilen bilgiler değerlendirir, çıkarım yapar, sonuç elde eder ve saklar [131].

#### 4.4.3.2.3. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), doğal seleksiyon ve genetik sistemini rol model alan, bu işleyişe göre verileri toplayan, işleyen ve karar veren bir kontrol modelidir. Her tekrarda daha iyi bir çözümü hedefler. Daha iyiye ulaşmak içinde mevcut çözümlere değişken genetik algoritma operatörlerini uygular ve her adım sonunda daha iyi sonuçları elde tutar. Genetik algoritma bir optimizasyon problemi için aday çözüm kümesinin daha iyi sonuçlar için değişime uğramasıdır. Genetik algoritmanın çalışması ile ilgili akış diyagramı Şekil 4.29’da görülmektedir. GA ile çalışırken çözümün kodlanması önemli adımlardan biridir. Farklı kodlama yöntemleri mevcuttur, sisteme uygun olanı seçilir. Ağaç kodlama, permütasyon kodlama, ikili kodlama ve değer kodlama bunlardan bazılarıdır [132].



Şekil 4.29. Genetik algoritma akış döngüsü [132].

#### 4.4.4. Kontrol Yöntemleri

Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının en önemli farklarından biri komutasyon yani kontrol işlemidir. Döner manyetik alanın hızı ile rotor hızının senkron olması için bu işlem yapılmalıdır. Fırçalı motorlarda kolektör fırça yapısı bu işlemi sağlarken, elektronik kontrol sistemi ile çalışan fırçasız motorlarda elektronik kontrol devreleri ile bu işlem yapılır. Bu sürücü dereleri, motordan rotor bilgisini aldıktan sonra, gerekli karşılaştırmalar yapılır ve sonuç sinyali evirici katındaki anahtarlama elemanlarına uygulanır. Anahtarlama elemanlarına bu sinyal farklı yöntemlerle uygulanabilir.

FDAM'larda en çok kullanılan kontrol yöntemleri PWM kontrol, Histeresiz bant kontrol ve değişken DC hat gerilim kontrolüdür. Kontrol değişkenleri ise hız, konum ve momentdir.

#### 4.4.4.1. PWM Kontrol

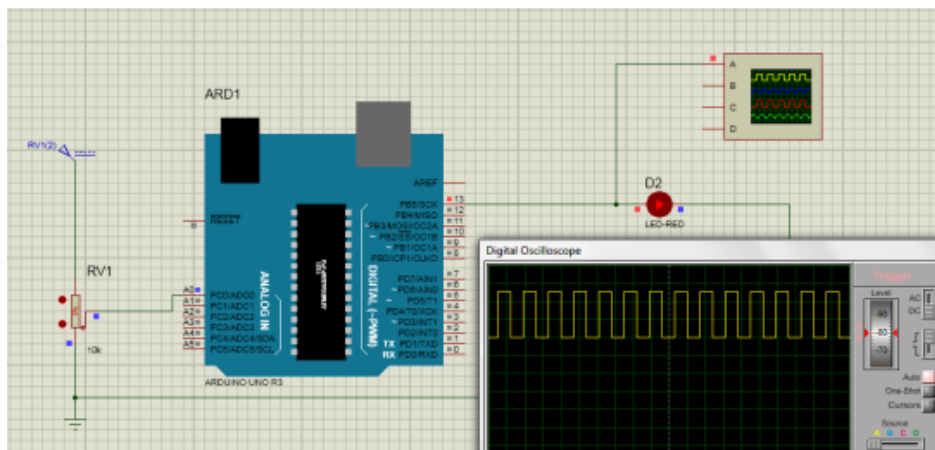
PWM, Pulse Width Modulation İngilizce kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Türkçeye Darbe Genişlikli Modulasyon (DGM) olarak çevrilmiştir. Bu yöntemde anahtarlama elemanları DGM sinyalleri ile kontrol edilirler. Frekansı sabit kalan sinyalin, doluluk oranı değiştirilerek, anahtarlama elemanlarının açık veya kapalı kalma süreleri kontrol edilir. Bu şekilde fazlara uygulanacak gerilimin değeri arttırıp azaltılabilir. Faz akımının dalga şekli de kontrol edilebilir. Bu sayede motorun gücü ve torku kontrol edilir.

Doğru akım devrelerinde gerilim değeri olarak ortalama gerilim değeri ele alınır. Bu nedenle anahtarın kapalı kalma süresi veya açık kalma süresi değiştirilerek, elde edilen gerilimin alacağı ortalama gerilim değeri değiştirilir [133].

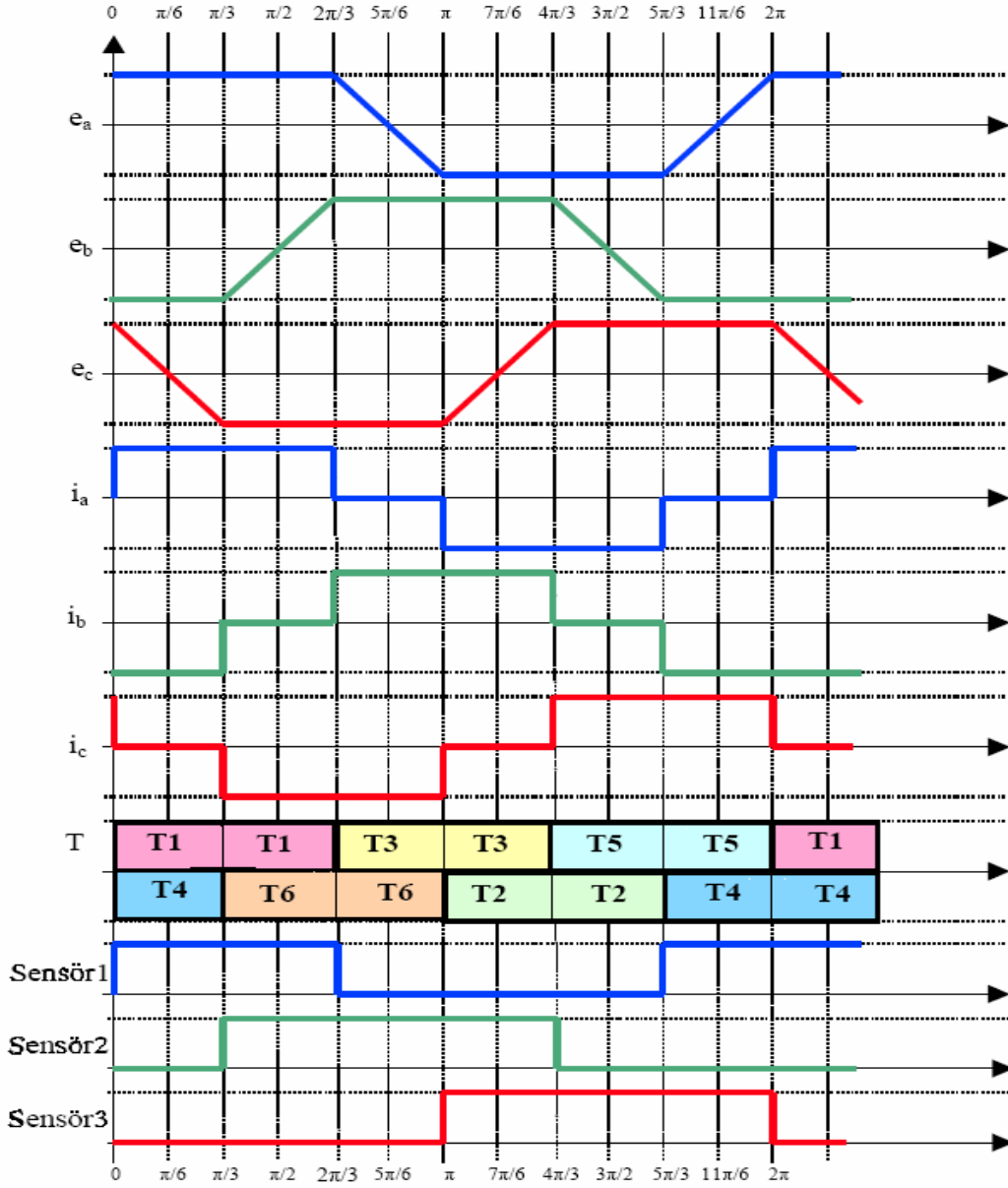
PWM yöntemi ile çok geniş aralıkta gerilim kontrolü sağlanabilir. Bu işlem, bir yarı iletken anahtar ve anahtarlama süresini değiştiren birkaç elektronik devre elemanı ile gerçekleştirilir. Bu, uygulamacılara oldukça hafif ve hızlı bir tasarım olanağı verir.

PWM yöntemi, diğer gerilim kontrol ve ayar yöntemlerinden farklı olarak, hızlı bir şekilde gerilim kontrolü sağlar. Bu yöntemde, gerilimin hızlı bir şekilde kontrolü yapılırken, minimum kayıp oluşur. Bu nedenle, verimli ve hızlı bir kontrol işlemi gerçekleştirilir. Bunun dışında ayarlı transformatörlere nazaran daha hafif ve daha az yer kaplaması gibi avantajlara da sahiptir [23].

Şekil 4.30'da elde edilen pwm sinyalinin simülasyonu görülmektedir. Şekil 4.31'de ise bir motora ait tüm sinyaller görülmektedir. Konum sensöründen alınan konum bilgisi sinyali, boş fazdan elde edilen zıt emk, anahtarlama elemanlarına uygulanan DGM ve sargıla uygulanan faz akımı sinyalleri eşzamanlı görülmektedir.



Şekil 4.30. PWM sinyal simülasyonu [134].

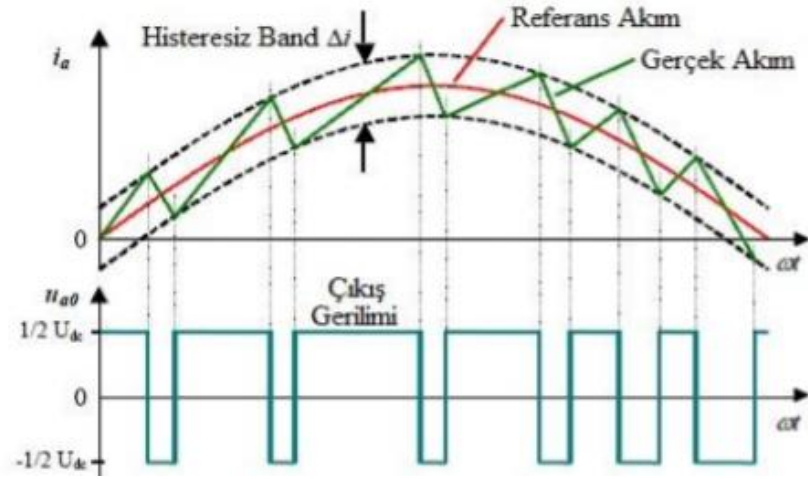


Şekil 4.31. Bir FDAM motora ait elde edilen sinyaller [15].

#### 4.4.4.2. Histerisiz Bant Kontrol

Histeresiz bant kontrolü basit bir kapalı çevrim düzeneklerindedir. Bu yöntemde, değişken değeri belirli sınırlar içinde (ki buna histeresiz bant denilir) kalması sağlanır. Mesela bir motor referans hızının üstüne çıkarsa motor durdurulur. Referans hızın altına düşerse de ters döndürülür [90]. Şekil 4.32’de bu durum görülmektedir.

Özellikle güçlü cihazlar için kullanılırlar. Lineer olmayan yükler için yeterince hızlı çalışır. Olumsuz yanı ise frekans kontrolünün yapılamaması nedeniyle DGM sinyali frekansı sabit olamayacağından istenmeyen harmoniklerin oluşmasına neden olur [135].



Şekil 4.32. Histerisiz band kontrol sinyalinin elde edilmesi [135].

#### 4.4.4.3. Değişken DC Hat Gerilim Kontrolü

Diğer iki yöntemle göre bazı avantajları bulunan ayarlı bir DC akım kaynağında bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğrusal bir güç kontrol sistemi, darbeleri bir güç kontrol sistemine göre (PWM) daha ucuz mal olabilir fakat oluşacak kayıplar, düşük gerilim ve yüksek akımda daha yüksek olabilir [12]. Yüksek hızlarda doğrusal güç kademesi kullanıldığında anahtarlama elemanlarının iletim kayıpları daha az olacaktır, PWM güç kontrolünde ise komutasyon gecikmesi önemli hale gelir [136].

## 5. SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu tez çalışmasının konusu olan sürücü tasarımı hakkında bilgiler bu bölümde verilmektedir. Yapılan ve paylaşılan literatür taramalarında da görülmektedir ki bir çok araştırmacı, sürücü devrelerinde ekonomiklik, basit yapı, kolay erişilebilir devre elemanları ile tasarımı ön planda tutmuştur. Bu çalışmada da bu parametreler çerçevesinde hareket edilmiş, piyasada yaygın bulunan malzemeler ile yapımı basit, verimli ve kontrol yeteneği fazla bir sürücü devresi tasarlanmaya çalışılmıştır.

Bir sürücü devresinin ve sisteminin motor, konum sensörleri, mikrodenetleyici, optokuplör, kapı sürücü, inverter katı ve anahtarlama elemanlarından oluştuğu önceki bölümlerde belirtilmiş ve bu bölümler hakkında bilgiler aktarılmıştı. Bu bölümde, çalışmada kullanılan materyaller tanıtılacaktır.

### 5.1. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOTOR

Çalışmada 3 kW gücünde, 3 faz sargılı bir tekerlek tipi motor kullanılmıştır. Motora ait fotoğraf Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Motor dâhili hall sensörlerine sahiptir. Birçok sürücüde sarı, mavi ve yeşil renkli olan üç kablo sargı yani faz kablolarıdır. Diğer beşli kablo ise hall sensörlerine ait kablolardır. Beş kablonun ikisi sensörlerin besleme uçlarıdır. Sensörler 5 V ile beslenebilir. Geriye kalan üç kablo ise faz kabloları ile aynı renkte olup, üç hall sensörünün çıkış uçlarıdır.



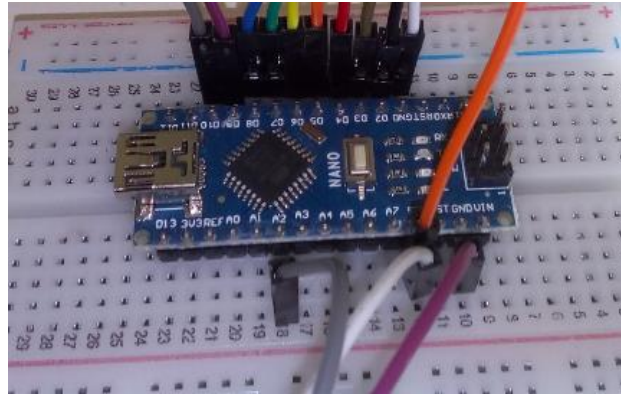
Şekil 5.1. Tasarlanan sürücünün kontrol ettiği hub motor.

## 5.2. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MİKRODENETLEYİCİ

Motor sürücüler bölümünde ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi mikrodenetleyiciler bir sürücü sisteminin beyni olarak kabul edilir ve çok çeşitli mikrodenetleyiciler piyasa da bulunmaktadır. Sürücü kontrol tekniklerine ve sürücüye eklenebilecek başka fonksiyonlara bağlı olarak mikrodenetleyici 8 bitlik bir basit mikrodenetleyici de olabilirken bir mini bilgisayar ayarında 32 bit DSP veya FPGA kartı da olabilir.

Bu çalışmada 8 bitlik bir denetleyiciye sahip, piyasada çok yaygın kullanım alanı bulmuş bir geliştirme kartı olan Arduino Geliştirme Kartı kullanılmıştır. Arduino, son yıllarda birçok uygulamada kullanılır bir kart haline gelmiştir. Bunun başlıca nedenleri arasında kolay programlanabilmesi, programlama cihazı gerektirmemesi, karta uyumlu sensör ve elemanların çeşitliliği, bileşenlerinin ve kendisinin ucuzluğu, kurulum kolaylığı ve açık kaynak kodlu olması bu sebepler arasında gösterilebilir.

Gelişen teknoloji ve ihtiyaçlara göre Arduino'da kendini yenilemiş, farklı uygulamalar için birçok farklı modelde kart üretilmiştir. Arduino UNO, NANO ve MEGA modelleri piyasada çok kolay bulunan ve kullanılan modelleridir. Bu çalışmada Arduino NANO modeli tercih edilmiştir. Tercih edilme sebebi ise, kolay bulunması, ucuz olması, boyutlarının küçük olması, UNO'ya göre analog pinlerinin daha fazla olması, kesme sayısı başlıca nedenlerdir. Şekil 5.2'de Arduino NANO görülmektedir.



Şekil 5.2. Arduino Nano ve pinleri [41].

Arduino Nanoya ait teknik özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir. 2 ve 3 numaralı pinler donanımsal kesme pinleri olarak kullanılmaktadır. 14 dijital sinyal çıkış pini vardır. 8 tane de analog sinyal giriş pini mevcuttur. İnverteri kontrol etmek için üreteceği PWM sinyalleri için 6 adet PWM çıkışa sahiptir.

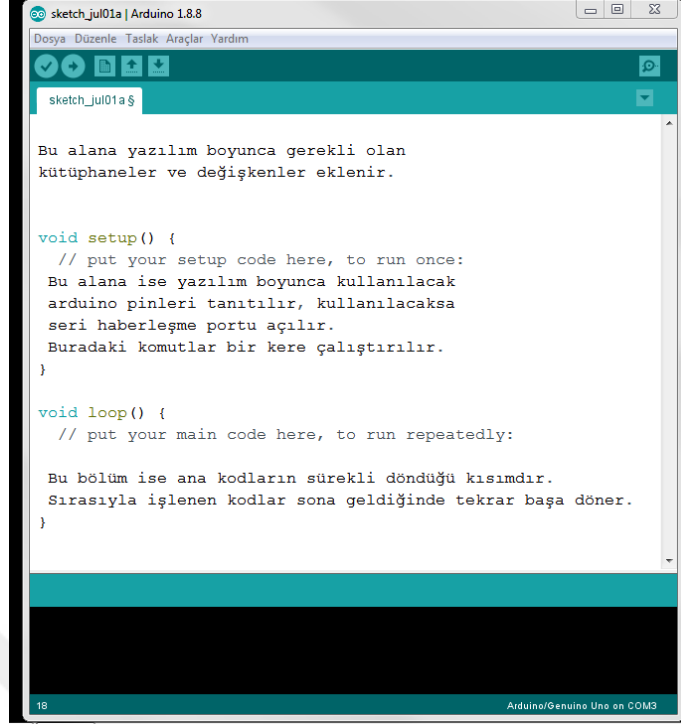
Çizelge 5.1. Arduino Nano teknik bilgileri [41].

İşlemci	Atmega 328
Çalışma gerilimi	5V
Giriş voltajı	7-12V
Çektiği akım	19mA
Flash bellek hafızası	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Saat hızı	16 MHz
Ağırlık	7g

Hall sensörlerinden gelen konum sinyallerine göre Arduino Nano gerekli PWM sinyallerini üretmektedir. Potansiyometre ile üretilen istenilen hız sinyali ve her gelen sensör bilgisine göre PWM sinyallerinin görev süresi değiştirilmekte bu sayede motor hızı kontrol edilmektedir.

Mikrodenetleyici çıkışlarını optik izolatörlerle koruma altına almak tasarımcıya bağlıdır. Araştırmacılardan bazıları optik izolatör kullanırken bazıları optik izolatör kullanmamıştır. Bu çalışmada da kullanılan kapı sürücü devrelerinin bu görevi dolaylı olarak gerçekleştirmesi nedeniyle optik izolatör (optokuplör) kullanılmamıştır.

Sürücünün kodları, Arduinonun kendi programı olan Arduino IDE ile yazılmıştır. Programda yeni bir sayfa açıldığında iki bölümden oluştuğu görülmektedir. Arduinoda IDE’de açılan her yeni sayfaya otomatik olarak sketch yani taslak adı verilir. Sketch den sonra o günün tarihi ve o gün açılan kaçınıcı taslak ise sırasıyla harf olarak sıra verilir. Bu bölümler void setup ve void loop bölümleridir. Void setup bölümünde bir kere işlenecek kodlar yazılmaktadır. Arduino ile ilgili ayarlar bu bölümde yapılır. Örneğin hangi pinlerin giriş hangi pinlerin çıkış olacağı, seri haberleşmenin açılıp açılmayacağı gibi. Void loop kısmında ise ana komutlar ana işlemler bu bölümde gerçekleştirilir ve sürekli buradaki işlemler tekrarlanır. Gerekli kütüphaneler ve tüm kod boyunca kullanılacak değişkenler ise void setup’tan önce, yani programın en başında tanıtlır. Şekil 5.3’de Arduino IDE’ de açılmış yeni bir sayfa görülmektedir. Şekil 5.4’de ise sürücüde kullanılan yazılıma ait bir parça görülmektedir.



Şekil 5.3. Arduino IDE’de açılmış yeni bir sayfa ve bölümleri.



Şekil 5.4. Sürücüde kullanılan kütüphane ve kodların bir bölümü.

### 5.3. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOSFET SÜRÜCÜLER

Sürücüde International Rectifier firmasına ait IR2104 Yüksek ve Alçak Yan Sürücü (High and Low Side Driver) entegresi kullanılmıştır. Tercih sebepleri arasında sağladığı akım miktarı, çok kolay bulunması, sağladığı açma kapama süresi ve çıkış gerilimi değerinin MOSFETleri çok rahat sürececek seviye de olmasıdır. Şekil 5.5’de ürüne ait bilgi sayfasından bir bölüm görülmektedir.

International  
**IR** Rectifier

Data Sheet No. PD60046-S

**IR2104(S)&(PbF)**

**HALF-BRIDGE DRIVER**

**Features**

- Floating channel designed for bootstrap operation
- Fully operational to +600V
- Tolerant to negative transient voltage dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V and 15V input logic compatible
- Cross-conduction prevention logic
- Internally set deadtime
- High side output in phase with input
- Shut down input turns off both channels
- Matched propagation delay for both channels
- Also available LEAD-FREE

**Product Summary**

V <sub>OFFSET</sub>	600V max.
I <sub>O+/-</sub>	130 mA / 270 mA
V <sub>OUT</sub>	10 - 20V
t <sub>on/off</sub> (typ.)	680 & 150 ns
Deadtime (typ.)	520 ns

**Description**

The IR2104(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with dependent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates from 10 to 600 volts.

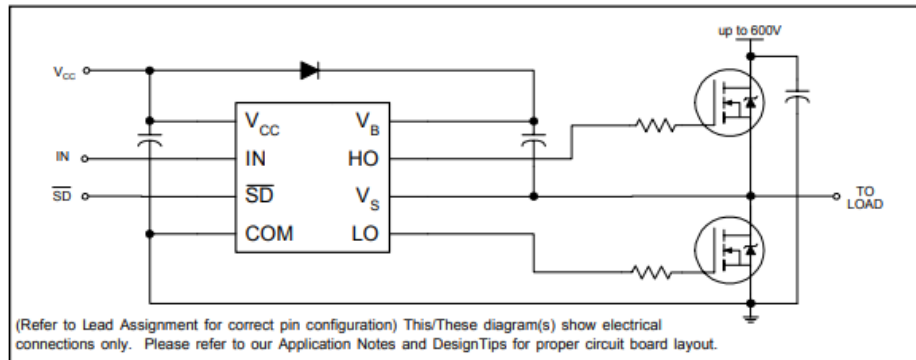
**Packages**

8 Lead SOIC IR2104S

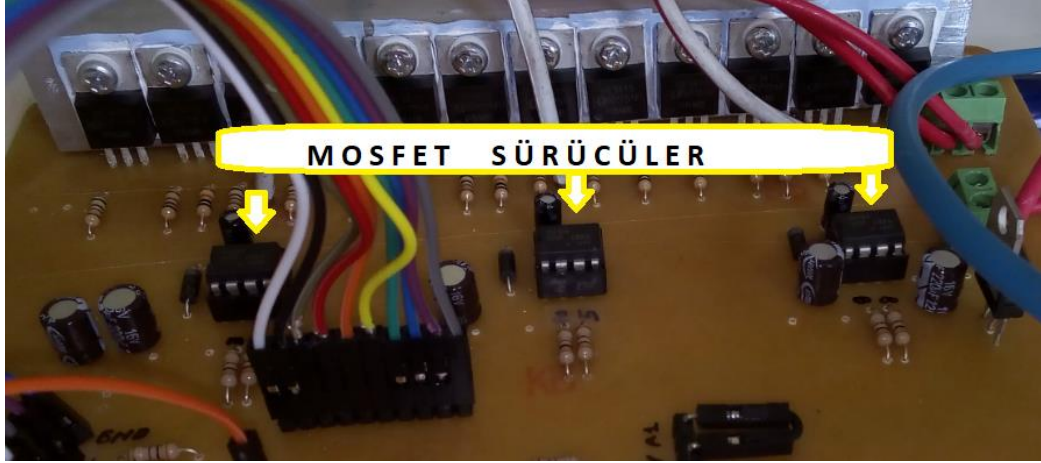
8 Lead PDIP IR2104

Şekil 5.5. IR2104 Kapı sürücü entegresine ait bilgi sayfası [137].

Şekil 5.6’da ise IR2104’un tipik bağlantı şekli görülmektedir. 500-600 V ile çalışan IGBT veya MOSFETlerin sürülmesinde rahatlıkla kullanılabildiği açıkça belirtilmektedir. Şekil 5.7’de ise devrede kullanılan MOSFET sürücülerin konumu gösterilmiştir.



Şekil 5.6. IR2104 Kapı sürücü entegresinin temel bağlantı şeması [137].



Şekil 5.7. Devrede MOSFET sürücüler.

#### 5.4. SÜRÜCÜDE KULLANILAN MOSFETLER

Motor güç, akım ve gerilim değerleri anahtarlama elemanlarının en temel seçim kriteridir. Test için kullandığımız motorun 3 kW gücünde olması ve yaklaşık 96 Voltlara kadar çıkması akım olarak da 32 A minimum akım, 24 V ile beslenmesi durumunda ise 125 ampere kadar çıkabileceği bilgisini vermektedir. Elektriksel güç formülünün, akım ve gerilimin çarpımına eşit olduğu unutulmamalıdır. Şekil 5.8’de kullanılan MOSFET’e ait bilgi sayfası görülmektedir. Sürekli sağladığı akım, iç direnç ve gerilim değerleri görülmektedir. İç direnç değeri de önemli bir parametre olup, anahtarlama kayıplarında önemli bir etkidir.

International  
**IR** Rectifier

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free

**Description**

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

PD - 94963

## IRF3415PbF

HEXFET® Power MOSFET

$V_{DSS} = 150V$

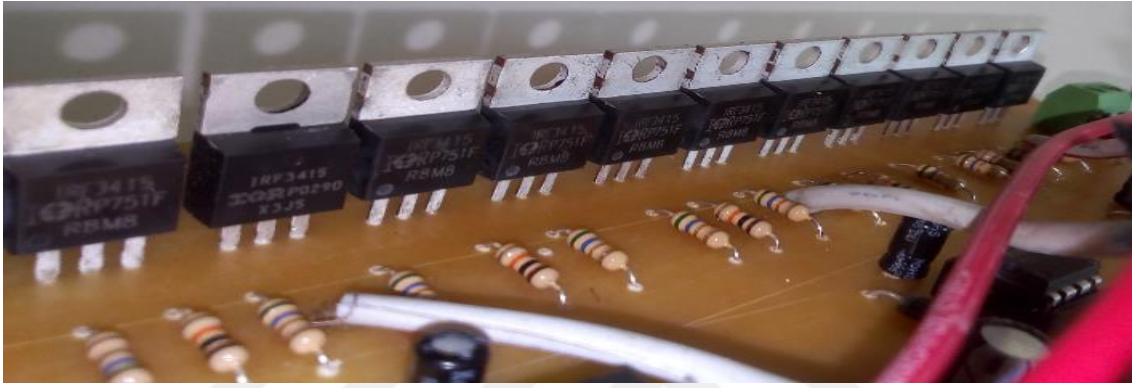
$R_{DS(on)} = 0.042\Omega$

$I_D = 43A$

TO-220AB

Şekil 5.8. Devrede kullanılan MOSFET ve özellikleri [138].

Devre tasarlanırken bir sıra daha paralel bağlı MOSFET’lerle tasarlanmıştır. Çok akım çekmesi durumunda devreye alınması planlanmıştır. Lakin testler sırasında devreye alınmasına gerek duyulmamıştır. Paralel bağlı MOSFET’ler ile akımın paylaşılarak MOSFET’lerin yükünün azaltılması hedeflenmiştir. Devrede MOSFET’lerin konumu Şekil 5.9’da görülmektedir. Soğutma işlemi için bir alüminyum soğutucu kullanılmıştır. Soğutucu ile MOSFET’ler arasına ısıl iletimi ama elektriksel yalıtımı sağlayan silikon izolatör ve yalıtkan boncuk malzemeleri konulmuştur. Bu önemli bir unsurdur. Şekil 5.10’da izolatör ve boncuk görülmektedir.



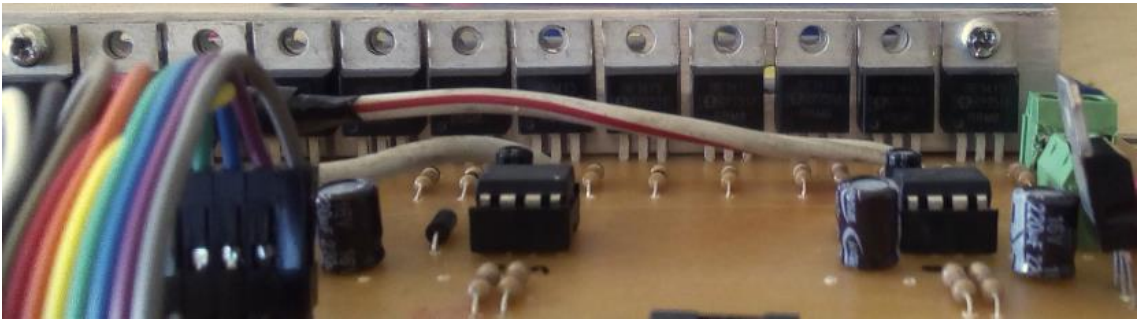
Şekil 5.9. MOSFET’lerin devredeki yerleşimi.



a)



b)

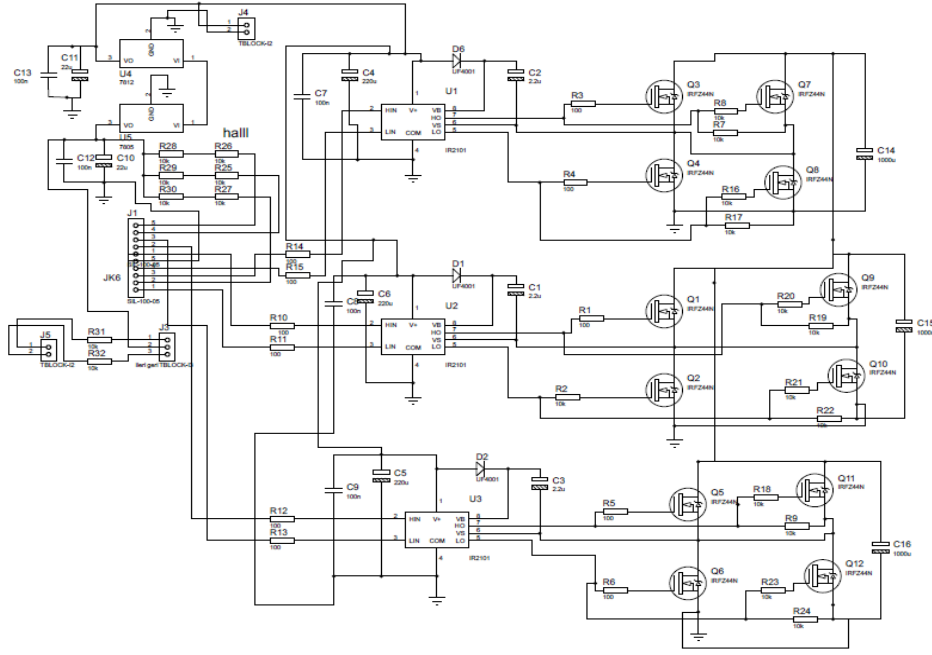


c)

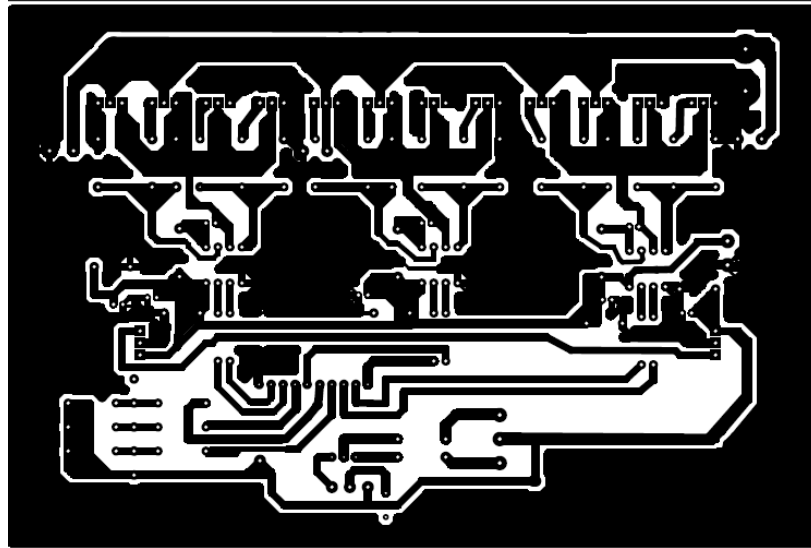
Şekil 5.10. a) Silikon izolatör b) Soğutucu boncuk c) MOSFET’lerin alüminyum soğutucuya montajı [139], [140].

## 5.5. SÜRÜCÜ ŞEMASI VE KURULUMU

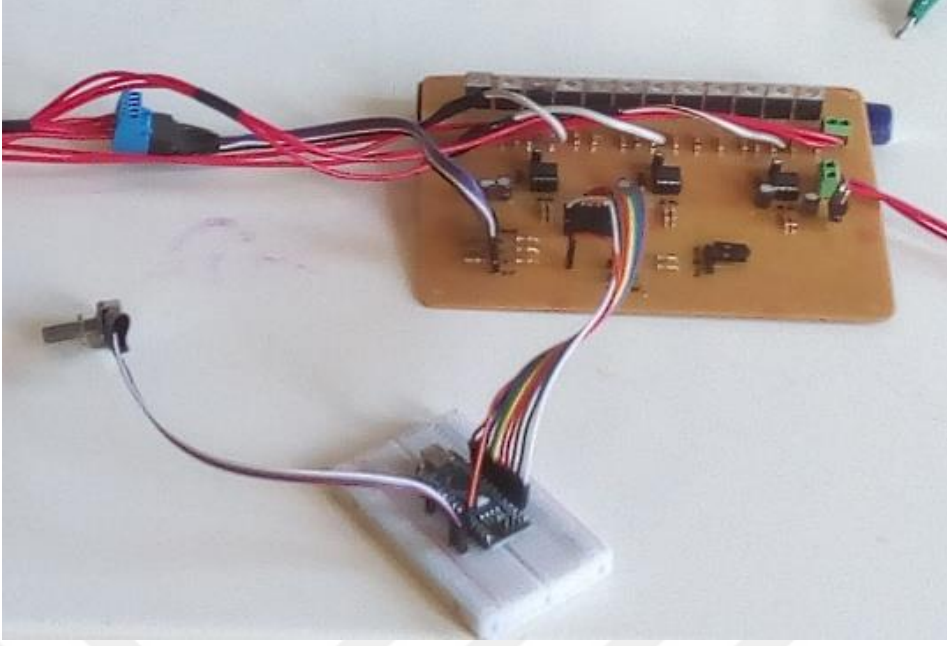
Çıkış noktası motorun gücü olan tasarımda, motorun çekeceği akım ve gerilime göre MOSFET'ler belirlenmiştir. Bu MOSFET'lere göre MOSFET sürücüler belirlenmiştir. Kontrol algoritmasına ve sistemin ekonomik analizi ve uygulama kolaylığı da göz önüne alınarak mikrodenetleyici seçimi yapılmıştır. Kullanılan tüm elemanlar bir önceki başlıklarda özel olarak önceki bölümlerde ise ayrıntılı olarak incelenmiş ve anlatılmıştır. Şekil 5.11'de devrenin açık şeması ve Şekil 5.12'de ise baskı devre çizimi görülmektedir. Şekil 5.13'de ise devrenin montajının bitmiş hali görülmektedir.



Şekil 5.11. Devrenin Proteus çizimi.



Şekil 5.12. Devrenin baskı devre çizimi.



Şekil 5.13. Sürücünün çıkarılması ve elemanların yerleştirilerek tasarımın tamamlanmış hali [134].

Sürücünün tasarımı bu işlem basamakları gerçekleştirilerek tamamlanmıştır. Tamamlanan sürücü testlere tabi tutulmuştur.

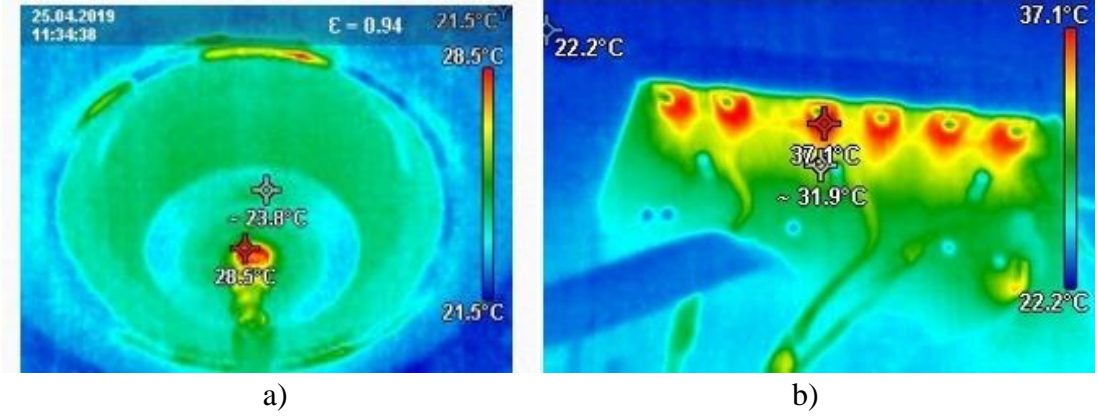
## 6. SÜRÜCÜNÜN TEST EDİLMESİ VE BULGULAR

Sistem 24 V gerilim ile test edilmiştir. Takometre cihazı ile hız bilgisi alınmış, ölçü aletlerinden gerilim ve akım bilgileri, osilaskop ile de hall sensör çıkışları, faz faz arası gerilimler ve kaynaktan çekilen akımın değişimi izlenmiştir. Ayrıca termal kamera ile de motor ve devresinin sıcaklık haritası çıkarılmıştır. Ölçümler Şekil 6.1'deki test düzeneği kurularak yapılmıştır [134].

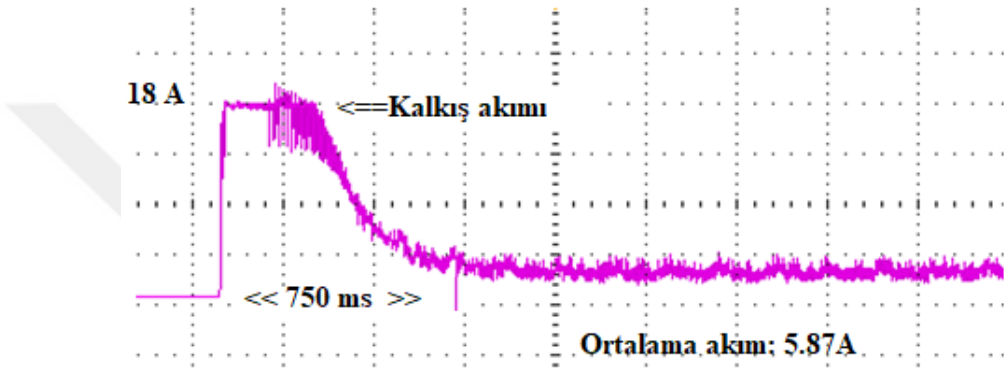


Şekil 6.1. Sürücü test düzeneği [136].

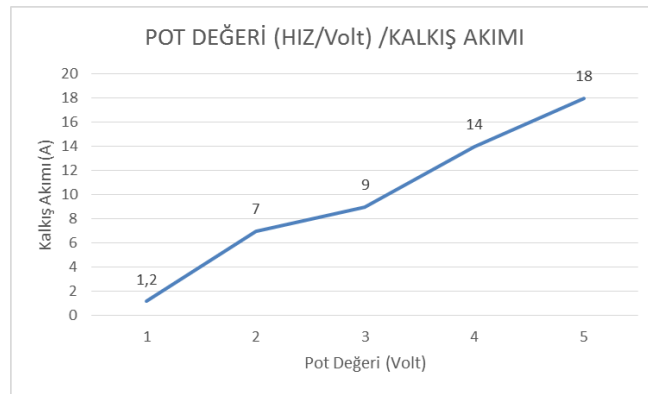
Test sistemi 24 V ile beslenmiş, izolasyonlu 3 kanal bir osilaskop ile sinyal ölçümleri, takometre ile hız bilgisi rpm olarak ve termal kamera ile motorun ve sürücünün genel termal görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 6.2.a'da motorun kendisini termal görüntüsü görülmektedir. Motorun rulman bölgesinden bir ısınma yaptığı görülmektedir. Şekil 6.2.b'de ise çalışmakta olan devrede MOSFET elemanlarının ısındığı görülmektedir. Şekil 6.3'de motorun tek fazına ait kalkış akım değeri görülmektedir.



Şekil 6.2. Termal kamera ile a) Motor rulman bölgesi b) Sürücü devresi görüntüsü.



Şekil 6.3. Kalkış anında kaynaktan çekilen akımın oluşturduğu tepe değerini görüntüsü. Her motor ilk kalkış anında yüksek akım çekmektedir. Önemli olan bu sürenin kısa tutulmasıdır. Şekil 6.4’de kalkış anındaki akımın değişimi görülmektedir. Kaynaktan çekilen akım yaklaşık 750 milisaniyede kararlı hale geçmiştir. Şekil 6.5’de farklı hız değerleri için motorun kalkış akımları görülmektedir.



Şekil 6.4. Referans hız değerinin kalkış anındaki değerine bağlı olarak kalkış akımı değerleri.

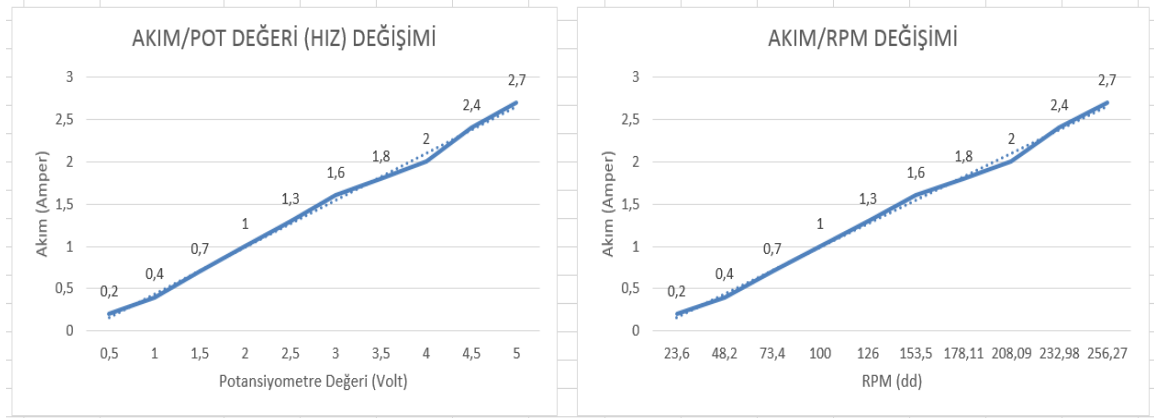
Şekil 6.5’de ilk kalkış anında mikrodenetleyiciye farklı hız seviyeleri ile hareket etmesi istenerek sistem yüksek akım değerleri içinde denenmiştir. Beklendiği şekilde yüksek

hız taleplerinde çekilen akımlarında yüksek olduğu görülmüştür. Motorun hız ayarı, mikrodenetleyiciye bağlı bir potansiyometre ile yapılır. Potansiyometre, Arduinoda Arduinonun analog dijital çevirici çözünürlüğünden dolayı (10 bit) 0 ve 1023 değerleri arasında bir sinyal üretir. Yazılımda bu değerler, üretilen PWM sinyalinin doluluk oranını belirler. Bu da motorun hızını belirlemektedir. Çizelge 6.1’de değişik hızlar için motorun çektiği akım ve motorun devir bilgileri elde edilmiştir.

Çizelge 6.1. Hız değişim sinyaline karşı kaynaktan çekilen akım ve motorun RPM değeri.

HIZ SİNYALİ(Volt)	AKIM (A)	RPM (dd)
(5 Volt Son Hız)		
0,5	0,2	23,6
1	0,4	48,2
1,5	0,7	73,4
2	1	100
2,5	1,3	126
3	1,6	153,5
3,5	1,8	178,11
4	2	208,09
4,5	2,4	232,98
5	2,7	256,27

Hız bilgisi sinyali, denetleyiciye gerilim sinyali olarak bildirilmektedir. Potansiyometreye ile ayarlanan her hız seviyesi aslında bir gerilim seviyesidir.



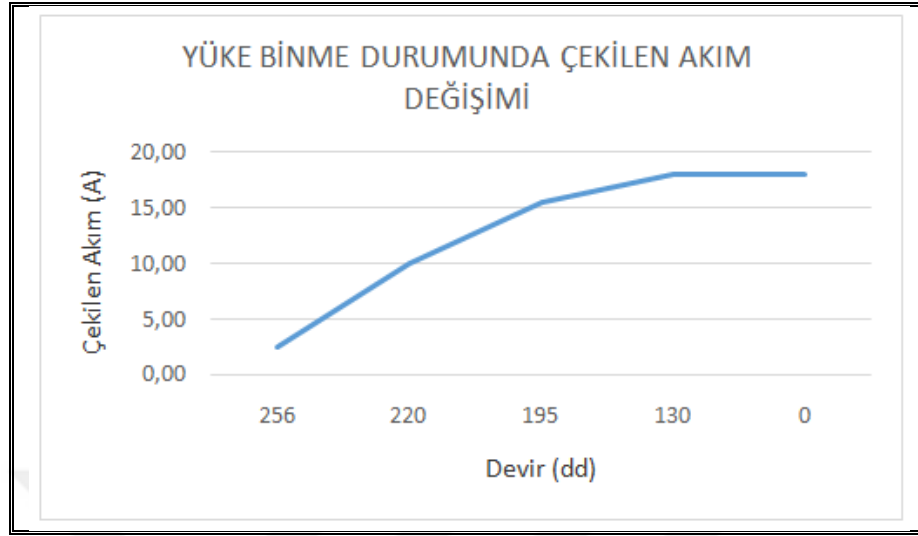
a)

b)

Şekil 6.5. Çizelgede bilgileri verilen motorun a) Hız değişimine göre akım b) Akım değişimine karşı RPM değişiminin grafiksel gösterimi.

Şekil 6.5.a’da motorun hızının artırılması veya yavaşlatılması için kullanılan potansiyometrenin ürettiği sinyal ile motorun çektiği akımın değişimi görülmektedir. Üretilen sinyalin gerilim değeri ile motor akımının doğrusal olarak değiştiği

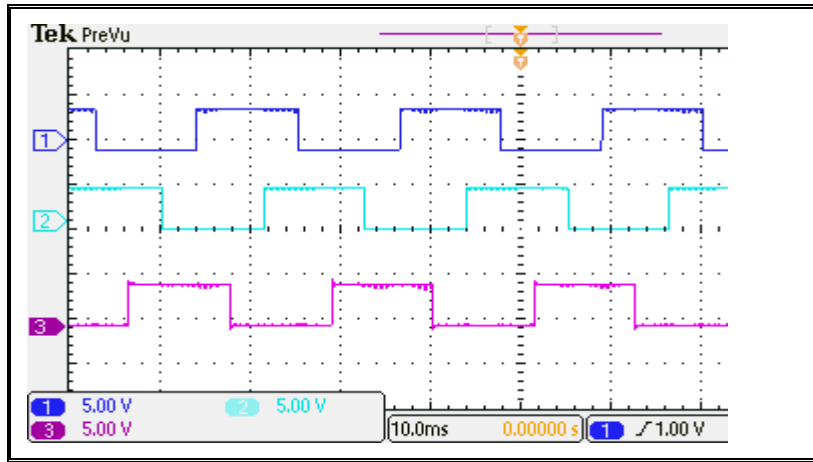
görülmektedir. Şekil 6.5.b’de ise çekilen akım ile motor devrinin değişiminin de doğrusal olduğu görülmüştür.



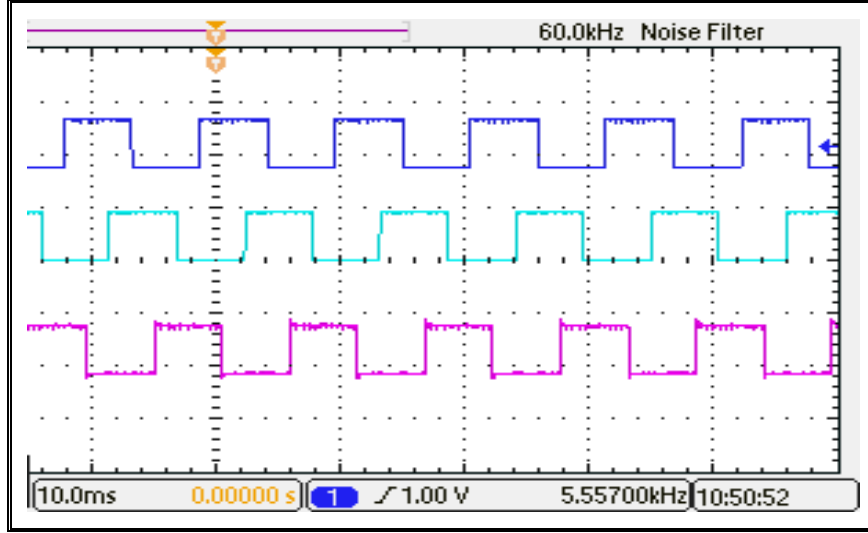
Şekil 6.6. Mekanik frenleme sonucu değişen hıza karşı çekilen akım grafiği.

Şekil 6.6’da maksimum devrine ulaşmış bir motora baskı ile frenleme yapılmıştır. Hızı azalan motorun belirli devirlerdeki çektiği akımlar ölçülmüştür. Tam frenlemede motorun durdurulduğu anda 19 A akım çektiği görülmüştür.

Sistemdeki MOSFETlerin açma kapaması işlemi hall sensörlerinden gelen sinyal ile sırayla kontrol edilmektedir. Sensörlerden gelen rotor konum sinyalinin osilaskop görüntüsü Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir.

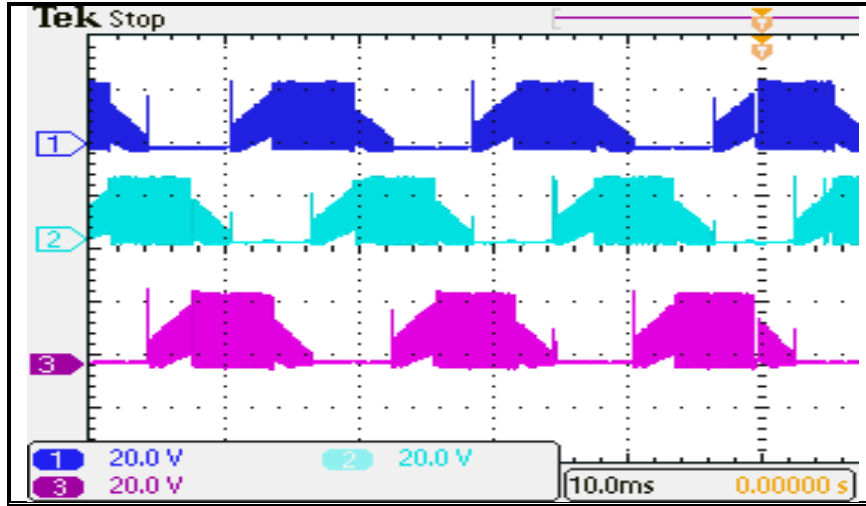


Şekil 6.7. Düşük motor hızında Hall sensörlerden alınan sinyaller.

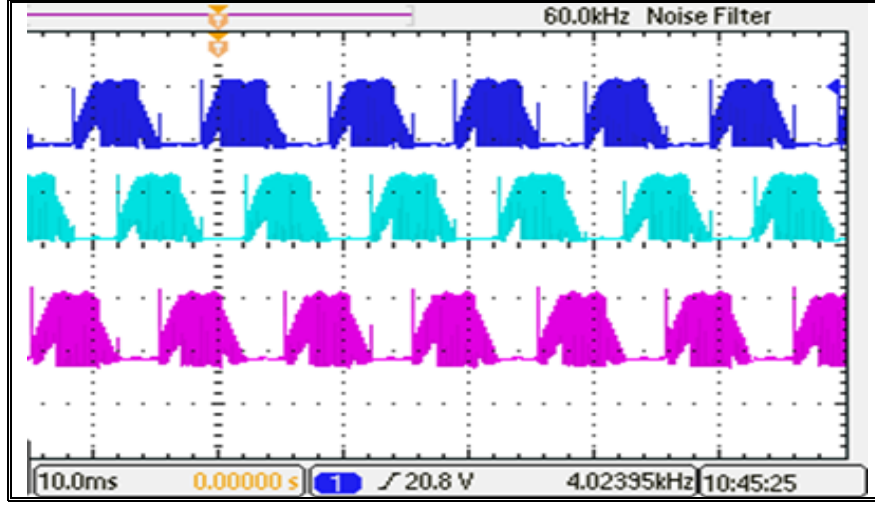


Şekil 6.8. Yüksek motor hızında Hall sensörlerden alınan sinyaller.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de hall sensörlerinden alınan sinyaller görülmektedir. Motorun hızına bağlı olarak hall sensörlerinin de verdiği sinyallerde değişmektedir. Motorun düşük hızlardaki hareketlerinde hall sensöründen gelen sinyalin periyodu büyük dolayısı ile frekansı az, hızlı hareket ettiğinde ise sensörlerden gelen bilgi daha sık yani periyodu düşük ama frekansı yüksektir. Mikrodenetleyici gelen bu konum bilgilere göre inverter katındaki MOSFET’leri ilettime ve kesime sokmaktadır. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da ise faz sargılarında oluşan zıt EMK sinyalleri görülmektedir.



Şekil 6.9 Motor düşük hızda hareket ederken faz-faz arası gerilim değerleri.



Şekil 6.10. Motor yüksek hızda hareket ederken faz-faz arası gerilim değerleri.

Motor sargılarına giden üç faz kablosundan alınan gerilim bilgileri düşük hız için Şekil 6.9 ve yüksek hız için Şekil 6.10’da görülmektedir. Motorun hem yüksek hız hem de düşük hızda çalışmasında alınan dalga şekillerine bakıldığında, gerilim değerinin aynı kaldığı ama alınan sinyalin periyodunun azaldığı, yani daha hızlı faz değişimi olduğu görülmektedir. Fazlar arasındaki değişimin ise beklenildiği gibi 120 derece olduğu gözlenmiştir.

## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada Hub motor olarak bilinen tekerlek tipi fırçasız doğru akım motorunun hareketini kontrol eden bir sürücü devresi üzerinde çalışılmıştır. Fırçasız doğru akım motorları kullanımı giderek artan bir motor türüdür. Birçok avantajına rağmen kontrol için elektronik kontrol birimine yani sürücülere ihtiyacı olması en önemli dezavantajdır. Birçok araştırmacının ana hedefi bu kontrol kartını daha ekonomik daha verimli daha kararlı daha kolay ve daha güvenli yapmaktır. Farklı kontrol algoritmaları, denetleyiciler, mikrodenetleyiciler, anahtarlama elemanları ve anahtarlama elemanı kontrol devreleri deneyerek bu araştırmalar sürdürülmektedir.

Öncelikle bir sürücü tasarımında gerekli olan tüm bilgilere çalışma içerisinde yer vermeye çalışılmıştır. Genel sürücü yapısı, görevleri, kullanım yerleri, motor tipleri, kontrol yapıları, denetleyici sistemleri, kullanılan konum sensörü tipleri, devre elemanları, devre elemanlarının görevleri ve tercih kriterleri hakkında bilgiler verilerek bir güç elektroniği ve sürücü tasarımı için bir başlangıç kaynağı oluşturulmaya gayret gösterilmiştir.

Çalışma bir güç elektroniği uygulamasıdır. Sistemde kullanılan evirici katının birçok güç elektroniği konusunu içermesi de ayrı bir avantajdır. Burada elde edilen tecrübe ile diğer güç elektroniği uygulamaları olan anahtarlama güç kaynağı tasarımı, doğru akımın alternatif akımına çevrildiği ve yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan evirici (inverter) tasarımı, DC-DC, DC-AC gibi dönüştürücü tasarımı konularına da taban oluşturduğu görülmektedir.

Yapılan denemeler ve testler sonucunda motorun hız kontrolü sağlanmıştır. Elektrikli motorsiklet ve arabalarda kullanılan motor, denetleyicinin ürettiği PWM sinyalleri ile kontrol edilmiştir. Potansiyometreden alınan referans hız bilgisi sinyali ile Hall sensörlerinden gelen rotor konum bilgisi sinyali kıyaslanarak, PWM sinyalinin genliği değiştirilerek motorun hız kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca mekanik frenleme yapılarak yük altındaki davranışı, zıt emk ve akım değerleri gözlenmiştir. Yük altında da çalışmasını sürdürdüğü görülmüştür.

Kullanılan motorun gücü çalışmanın birçok çalışmadan en önemli farklarından. Yapılan çalışmalar genellikle masaüstü yani küçük boyutlu ve düşük güçlü FDAM'lar

içindir. Sürücü yapısı benzer olsa da düşük güçteki uygulamalarda karşılaşılmayan problemlere bu güçteki motorlarda karşılaşılabilmektedir. Örneğin ana bara gerilimin daha yüksek olması, anahtarlama sırasında oluşan harmonikleri arttırabilmektedir. Bu nedenle çalışmada 3 kW gücünde ve elektrikli araçlarda kullanılan bir motorun kullanılması çalışmayı daha ilgi çekici ve elektrikli araç sektörü için kullanışlı hale getirmiştir.

Çalışmanın en önemli kazanımlarından ve hedeflerinden birisi de ekonomik bir sürücü üretilmesi ve sürücü elemanlarına kolay ulaşılabilir olmasıdır. Birçok güç elektroniği uygulaması yüksek maliyetlerle tasarlanmaktadır ve bazı devre elemanlarının yurtdışından getirilmesi gerekmektedir. Gerek mikrodenetleyici gerekse anahtarlama elemanları ve sürücüleri çok kolay, hızlı ve ucuz bir şekilde temin edilmiştir. Mikrodenetleyici olarak tercih edilen Arduino günümüzün en popüler geliştirme ortamıdır. Bu da ulaşılabilirlik açısından önemli bir avantajdır. Gerek kodlama noktasında gerekse tasarım noktasında gerekli kaynaklara ulaşmak mümkündür.

## 8. ÖNERİLER

Yapılan tasarımın donanım olarak merkezinde Arduino denetleyicisi, konum sensörü olarak motor içinde dahili olan Hall sensörleri, motor nominal değerlerine göre tercih edilmiş MOSFET'ler ve bu MOSFET'lere uygun MOSFET sürücülerden oluşmaktadır.

Sistem Arduino nano kullanılarak 24 V ile kararlı olarak çalıştırılmıştır. Optik izolatörler, MOSFET sürücü entegreleri kullanıldığı için tercih edilmemiştir. Bir sonraki çalışmalarda aynı devre ve aynı yapı optik izolatörler kullanılarak da denenebilir. Yüksek anahtarlama hızından ve motorun endüktif yapısından dolayı oluşan parazitler MOSFET sürücüler tarafından tamamen engellenmiş olmayabilir. Bu nedenle optik izolatör katı eklenerek sürücü tekrar kontrol edilebilir.

Yine aynı sürücü devre donanımsal yapısı aynı kalmak şartı ile başka bir mikrodenetleyici kullanılarak test edilip karşılaştırılabilir. Günümüzde 32 bit bir mikrodenetleyici türü olan STM32 kullanım alanı çok yaygın, işlem kabiliyeti yüksek, bulunması kolay ve ekonomik bir mikrodenetleyici olarak karşımıza çıkmaktadır. Sistem yazılımı da bu denetleyiciye uyarlanarak bu iki denetleyici arasındaki farkın veya avantajların karşılaştırılması bir başka çalışma konusu olacaktır.

Sistemde kullanılan Hall sensörleri ile konum bilgisi alınarak komutasyon sağlanmıştır. Aynı donanımsal yapı hiç bozulmadan sensörsüz kontrol içinde bu tasarım denenebilir. Sargı uçlarında oluşan zıt EMK gerekli ölçüm yapılarıyla, Arduino Nanonun tercih sebeplerinden biri olan analog giriş sayısının fazla olması özelliği ile analog girişlerden okunabilir ve buna göre konum tahmini yapılarak komutasyon sağlanabilir.

Motora bağlanacak bir hız ölçüm sensörü ile hız bilgisi alınarak motor hız kontrolü daha kararlı sağlanabilir. Bu geri bildirim ile referans sinyali karşılaştırılarak daha kısa sürede istenilen hızda kararlı hale geçilebilir. PI ve PID kontrolleri de yazılıma eklenerek daha hassas kontrol sağlanabilir.

Sistemdeki anahtarlama katı olan evirici bölümünde anahtarlama hızından dolayı mutlaka harmonikler oluşacaktır. Bu harmoniklerin azaltılması için farklı değerlerde kapasitörler denenerek harmoniklerin en az oldu değerler tespit edilebilir.

Yine evirici katındaki ve ürücüdeki en önemli eleman olan MOSFET'lerin seçimi özellikle önem arz etmektedir. Sürücülerde en çok arıza görülen eleman MOSFET'lerdir. Motorun nominal akım ve gerilim değerleri tespit edilerek MOSFET'in bu değerlere uygun seçilmesi gerekmektedir. Alt değerlerde bir tercih MOSFET'lerin bozulmasına, gereğinden fazla üst değer verilmesi ise kayıpları, boyutları ve maliyeti arttıracaktır.



## 9. KAYNAKLAR

- [1] M. Yılmaz, “Fırçasız DA motorunun (FDAM) algılayıcısız kontrolünde dalgacık tekniğinin uygulanması,” Doktora tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [2] V. Erginer, “Elektrikli hibrit araçlar ve sürme devreleri,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [3] O. Bingöl, M. A. Yalçınkaya ve O. Tosun, “Bilgisayar arayüzlü dsPIC kontrollü fırçasız doğru akım motoru sürücü sistemi,” *17. Akademik Bilişim Konferansı*, Eskişehir, Türkiye, 2015.
- [4] Ö. Aydoğdu “PIC tabanlı fırçasız DC motor sürücüsü tasarımı,” *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 2008.
- [5] O. Karakulak, O. Yaz, E. Köybaşı, S. Bıçakçı, C. Candan ve D. Akdaş, “PIC tabanlı fırçasız DC motor sürücü tasarımı,” *3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye, 2012.
- [6] T. Hemanand ve T. Rajesh, “Speed control of brushless DC motor drive employing hard chopping PWM technique using DSP,” *International Conference on PowerElectronics*, Daegu, Korea, 2006, ss. 393-396.
- [7] A. Rowe, G. S. Gupta ve S. Demidenko, “Instrumentation and control of a high power BLDC motor for small vehicle applications,” *International Instrumentation and MeasurementTechnology Conference*, ss. 559-564, 2012.
- [8] M. Tsai, T. P. Quy, B. Wu ve C. S. Tseng, “Model construction and verification of a BLDC motor using MATLAB/SIMULINK and FPGA control,” *Industrial Electronics and Applications*, Graz, Austria, 2011, ss. 1797-1802.
- [9] R. Duma, P. Dobra, D. Petreus, I. V. Sita ve R. A. Munteanu, “Real-time BLDC motor control using the stellaris LM3S8962 microcontroller,” *Education and Research Conference*, Nice, France, 2010, ss. 57-61.
- [10] U. Karapınar, Z. Esen, M. Şahin ve F. Kanburoğlu, “MatlabSimulink ile fırçasız DA motor için kaskad denetleyici tasarımı ve mikrodenetleyici gerçekleştirilmesi,” *21. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Girne, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, 2013.
- [11] F. Köse, K. Kaplan ve H. M. Ertunç, “PID ve bulanık mantık ile DC motorun gerçek zamanda STM32f407 tabanlı hız kontrolü,” *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, ss.1178-1183, 2013.
- [12] M. Terashima, T. Ashikaga, T. Mizuno, K. Natori, N. Fujiwara ve M. Yada, “Novel motors and controllers for high-performans electric vehicle with four in-wheel motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 44, sayı 8, 1997.
- [13] F. Acar, “Elektrikli araçlar için motor sürücü devresinin yüksek çözünürlükte verim analizi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye,

2015.

- [14] N. Matsui ve H. Ohashi, "DSP-based adaptive control of a brushless motor," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, ss. 42-48, 1992.
- [15] Y. Yazıcı, "Fırçasız doğru akım motorunun sayısal sinyal işlemci (DSP) ile kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [16] H. Yıldız, "Tekerlek içi sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorun bulanık mantık ile denetimi," Yüksek lisans tezi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2012.
- [17] M. Albayrak, "Tip-2 bulanık mantık ile tekerlek içi sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun sürülmesi," Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2013.
- [18] S. Kahveci, "Fırçasız doğru akım motorunun programlanabilir lojik kontrolörle denetimi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 1998.
- [19] A. Aktuna ve M. Uzun, "Fırçasız doğru akım motorunun PLC ile hız kontrolü," Lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2012.
- [20] Y. Bektaş, "Fırçasız doğru akım motoru (FSDAM) ve sürücü devresi eğitim seti analizi, geliştirilmesi ve motorun bilgisayar ortamında incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [21] Ç. Gençer ve M. Gedikpınar, "Modeling and simulation of BLDCM using MATLAB/SIMULINK," *Journal of Applied Sciences*, c. 6, sayı 3, ss. 688-691, 2006.
- [22] Y. Shu, H. Li, ve Q. Wu, "A rapid development method on brushless DC motor controller," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, 2007, ss. 3293-3297.
- [23] Ö. Atan, "Fırçasız DA motorunun modellenmesi ve PWM yöntemiyle kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye, 2007.
- [24] Q. Wua ve W. Tian, "Design of permanent magnet brushless DC motor control system based on dsPIC30F4012," *International Workshop on Information and Electronics Engineering*, ss. 4223-4227, 2012.
- [25] B. Ulu, "Fırçasız doğru akım motor (BLDC) hız kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2011.
- [26] K. Ilzuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endove K. Mohri, "Microcomputer control of sensorless brushless motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 21, sayı 24, 1985.
- [27] R. Zakariah ve K. M. Yadaiah, "Low-cost high performance brushless DC motor drive for speed control application," *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Kareala, India, 2009,

ss. 456-460.

- [28] M. Gedikpınar, “Fırçasız doğru akım motorlarının kaymalı mod ile konumunun belirlenmesi,” Doktora tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2002.
- [29] P. Yedamale, “Brushless DC (BLDC) motor fundamentals,” Microchip Technology Inc., USA, 2003.
- [30] B. Sing ve K. Jain, “Implementation of DSP based digital speed controller for permanent magnet brushless DC motor,” *Journal of the Institution of Engineers Electrical Engineering Division*, sayı 84,ss.16-21, 2003.
- [31] Ö. Aydoğdu ve R. Akkaya, “DSP based fuzzy control of a brushless DC motor without position and speed sensors,” *Proceeding of 4. International Advanced Technologies Symposium*, Konya, Türkiye, 2005, ss.182-187.
- [32] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.thoughtco.com/history-of-electric-vehicles-1991603>.
- [33] E. Zengin, “Farklı tip otomobillerin elektrikli otomobile dönüştürülmesi için optimal enerji tüketimi açısından güç hesaplamaları üzerine gerçek bir uygulama,” Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2017.
- [34] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.musenor.com/collection/s/arts-et-education/automobile-electrique-la-jamais-contente>.
- [35] İ. Karakaş ve M. Pekcan, “Elektrikli taşıt tasarımı,” Lisans tezi, Otomotiv Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [36] N. Ünlü, Ş. Karahan, O. Tür, H. Uçarol, E. Özsu, A. Yazar, L. Turhan, F. Akgün ve M. Tırıs, “Elektrikli araçlar,” TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Türkiye, 2003.
- [37] M. Yıldırım, “Tekerlek içi motorlu elektrikli araçlarda elektronik diferansiyel sistemin gerçekleştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2015.
- [38] J. D. Power, “Drive green 2020: More hope than reality,” J. D. Power and Associates, USA, 2010.
- [39] R. Hulten ve S. Cowan, “Escaping lock-in: The case of the electric vehicle,” *Technological Forecasting and Social Change*, sayı 53, ss. 61-80, 1996.
- [40] M. S. Mökükçü, “Elektrikli araç sürüş sistemi tasarımı ve imalatı,” Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [41] A. Öztürk, “Elektrikli otomobil yol asistanı ve uzak ölçüm sistem tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, 2018.
- [42] Y. Mutlu, “Elektrikli araç motorunun soğutma sistem tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.

- [43] M. H. Westbrook, "Automotive electronics," *IEEE Proceedings A-Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education-Reviews*, c. 133, sayı 4, ss. 241-258, 1986.
- [44] R. N. Tuncay ve Ö. Üstün, "Otomotiv elektroniğindeki gelişmeler," *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2004.
- [45] N. Altanah, "Güneş pili ve hidrojen yakıt pilinden beslenen küçük bir elektrikli araç için batarya şarj sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [46] T. Trigg, "The third age of electric vehicles," *The Journal of the International Energy Agency*, ss. 30-31, 2013.
- [47] C. C. Chan ve K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford, England: Oxford University Press, 2001.
- [48] E. Köklükaya, M. Yıldız ve S. Bağcı, "Hibrit araçlarda güç elektroniği sistemlerinin genelleştirilmiş durum uzay ortalama yöntemiyle modellenmesi," *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2011.
- [49] M. Eshani, Y. Gao, S. E. Gay, ve A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design*, New York, USA: CRC Press, 2005.
- [50] M. H. Westbrook, *The Electric And Hibrid Electric Car*, London, England: SAE Press, 2001.
- [51] M. E. Bas, "Katı oksit yakıt pilleri," Lisans tezi, Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2005.
- [52] G. Tanç, "Elektrikli bisikletler için fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve üretimi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [53] O. Satılmış ve E. Mese, "Elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar için batarya şarj cihazı," *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 137-142.
- [54] G. Şen, A. R. Boynueğri ve M. Uzunoğlu, "Elektrikli araçların şarj yöntemleri ve araçların şebekeyle bağlantısında karşılaşılan problemlere yönelik çözüm önerileri," *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 357-362.
- [55] Anadolu Ajansı. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.aa.com.tr/tr/sirk-et-haberleri/enerji/zorlu-enerji-elektrikli-arac-sarj-istasyonlarini-artiriyor/649498>.
- [56] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, New York, USA: McGraw-Hill Companies Press, 1999.
- [57] S. B. Öztürk, "Modelling, simulation and analysis of low-cost direct torque control of PMSM using Hall-effect sensors," M.S. thesis, Electrical Engineering, Texas A&M University, Texas, USA, 2005.
- [58] T. J. E. Miller, *Brushless Permanent Magnet And Reluctance Motor Drives*, Oxford, England: Oxford University Press, 1989.

- [59] F. J. Gieras ve M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology Design And Applications*, New York, USA: CRC press, 1997.
- [60] D. C. Hanselman, *Brushless Permanen Magnet Motor Design*. 2nd Edition, Milwaukee, USA: Magna Physics Publishing, 2006.
- [61] B. Kürkcü, M. Çelik, S. Çetin ve İ. Özsoy, “Güdümlü Bir sistem için fırçasız DC motorun modellenmesi, simülasyonu ve uygulanması,” *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, 2013, ss. 699-704.
- [62] H. A. Toliyat ve T. Gopalarathnam, *AC Machines Controlled as DC Machines (Brushless DC Machines/Electronics)*, New York, USA: CRC Press, 2002.
- [63] B. Lee ve M. Ehsani, “Advanced simulation model for brushless DC motor drives,” *Electric Power Component and Systems*, c. 31, ss. 841-868, 2003.
- [64] D. Y. Ohm ve J. H. Park, “About commutation and current control methods for brushless motors,” *29. Annual IMCSD Symposium*, San Jose, USA, 1999.
- [65] H. C. Bayraktar, “Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü,” Yüksek lisans tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [66] Ö. Aydoğdu, “Fırçasız doğru akım motorlarının genetik tabanlı bulanık denetleyici ile sensörsüz kontrolü,” Doktora tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2006.
- [67] F. Güler, “Halbach dizilimlerinin fırçasız doğru akım motoruna uygulanması,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [68] Anaonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: [http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/fyrcasyz dc motorun lineer karesel kontrol lqr yontemi ile konum denetimi](http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/fyrcasyz%20dc%20motorun%20lineer%20karesel%20kontrol%20lqr%20yontemi%20ile%20konum%20denetimi).
- [69] S. Rambabu, “Modeling and control of a brushless DC motor,” M.S. thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2007.
- [70] K. S. Kan ve Y. Tzou, “Adaptive soft starting method with current limit strategy for sensorless BLDC motors,” *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, China, 2012, ss. 605-610.
- [71] E. Hüner, N. Ekren ve T. Ç. Akıncı, “Teker motorlar ve teker motorların elektrikli araçlarda kullanımına ilişkin bir inceleme,” *e-Journal of New World Sciences Academy*, c. 3, sayı 2, ss. 298-309, 2008.
- [72] W. Adams, “Electric motor,” USA. Patent 300827, June 24, 1884.
- [73] A. E. Parcelle, “Electromotor traction wheel,” USA. Patent 433180, July 29, 1890.
- [74] E. B. Parkhurst, “Dynamo-electric machine or electric motor,” USA. Patent 422148, December 25, 1890.
- [75] T. Miller, *Brushless PM And Reluctance Motor Drivers*, Oxford, USA: Oxford University Press, 1993, ss. 100-187.
- [76] Ş. Demirbaş, “Fırçasız DA motorlarının simülasyonu ve analizi,” Yüksek lisans

tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1995.

- [77] B. Singh, ve S. Singh, “State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives,” M.S. thesis, Electrical Engineering Department, Indian Institute of Technology, New Delhi, India, 2008.
- [78] C. Zeren, “Devridaim sistemleri için küçük güçlü fırçasız doğru akım motoru tasarımı, üretimi ve kontrolü,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [79] Y. Öner, “Sürekli mıknatıslı DC motor ile tahrik edilen sürekli mıknatıslı senkron generatörün çıkış geriliminin kontrolü,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [80] I. Mavioğlu ve A. Yücel, “Kalıcı mıknatıslık özelliği gösteren Nd31Fe68 B mıknatısının sentezi ve karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla Üniversitesi, Muğla, Türkiye, 2009.
- [81] B. Dodrill ve B. Kelley, *Measurements with a VSM Permanent Magnet Materials*, Columbus, USA: Lake Shore Cryotronics Inc., 2005.
- [82] C. Yıldırım, “PIC tabanlı fırçasız DC motor tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [83] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://miknatis.gen.tr/index.php?route=product/category&path=91>.
- [84] K. Hasanusta ve N. Serteller, “Fırçasız doğru akım motorlarında (FDAM) optimal Hall sensör yerinin incelenmesi ve motora etkisi,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 15 sayı 3, ss.1-7, 2015.
- [85] D. Görüş, “Sirkülasyon pompasında kullanılan sabit mıknatıslı motor sürücüsünün bilgisayar ortamında fonksiyonel modellemesi,” *Alarko Carrier Teknik Bülten*, sayı 32,2011.
- [86] M. Gökbulut, “Fırçasız doğru akım motorlarının yapay sinir ağları ile uyarlamalı denetimi,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 1998.
- [87] S. Ogasawara ve H. Akagi, “An approach to position sensorless drive for brushless DC motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 27, sayı 5, ss. 928-933, 1991.
- [88] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 2002.
- [89] Ş. Demirbaş ve G. Bal, “Fırçasız DA motorlarında pozisyon kontrolü,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 10, sayı 4, ss. 455-469, 1997.
- [90] H. Gödekoğlu, “Fırçasız doğru akım motoru konum kontrolörü tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [91] Milli Eğitim Bakanlığı, Endüstriyel otomasyon teknolojileri ve servo sürücüler, *Ders Notları*, Ankara, 2009.

- [92] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.peaktech.de/productdetail/kategorie/optischer-kontakt-drehzahlmesser/produkt/p-2795.html>.
- [93] E. L. C. Arroyo, "Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system," M.S. thesis, Electrical Engineering, University of Puerto Rico, Rio Piedras, Porto Riko, 2006.
- [94] E. İtlen, "Asenkron motorun dsPIC tabanlı kesirli Pİλ hız kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2013.
- [95] O. Armağan, "Hall etki sensörü kullanarak, düşük değerli manyetik alanları ölçen telemetrik sistem tasarımı," Yüksek lisans tezi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2012.
- [96] E. H. Hall, "On a new action of the magnet on electric currents," *American Journal of Mathematics*, c. 2, ss. 287-292, 1879.
- [97] M. Türen, "Hall etkili dönüştürücü kullanan diferansiyel rölenin transformatör korumasında kullanılması," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.
- [98] M. A. Buzpınar, "Hall effect sensörlü anahtarlama relüktans motor sürücü tasarımı," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2014.
- [99] E. Karakaş "Elektrikli araçlar için fırçasız doğru akım motorlarının sensörsüz doğrudan moment kontrolünün güç geri kazanımlı olarak gerçekleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2016.
- [100] A. Toprak ve A. Toprak, "300 W inverter devresi tasarımı ve gerçekleştirilmesi," *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, sayı 11, ss. 57-66, 2016.
- [101] İ. Yaşar, "Otonom araç için da motor sürücü sistemi ve denetleyicinin gerçekleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [102] S.W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California, USA: California Technical Publishing, 2002.
- [103] B. S. Cunha, J. R. Camacho ve C. A. Bissochi, "Single-phase induction motor speed control through a PIC controlled sinusoidal PWM inverter-the mathematical model and various load conditions," *IEEE Power Tech. Proceedings*, Porto, Portugal, 2001, ss. 95-119.
- [104] R. Parekh, "VF control of 3-phase induction motors using PIC16F7X7 microcontrollers," Microchip Technology Inc., USA, 2003.
- [105] G. Pandian ve S. R. Reddy, "Implementation of single phase to three phase PWM inverter fed induction motor drive," *Information and Communication Technology in Electrical Sciences*, ss. 355-360, 2007.
- [106] S. Sridhar, P. G. Raj, Ramakrishnan, R. Ramaprabha, ve R. Muthu,

- “Microcontroller based maximum power point tracking control for PV fed space vector controlled three phase induction motor,” *TENCON IEEE Region 10 Conference*, Hyderabad, India, 2008, ss. 1-4.
- [107] S. A. Waskar, U. L. Bombale ve T. B. Sonawane, “dsPIC based SPWM controlled three phase inverter fed induction motor drive,” *International Journal of Computer Applications*, c. 47, sayı 16, ss.17-20, 2012.
- [108] A. Ruzewski ve A. Sobolewski, “Comparative studies of control systems with fractional controllers,” *Przełąd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ss. 204-208, 2012.
- [109] Y. Dou ve Z. Ze, “Design and realization of fuzzy self-tuning PID speed controller based on TMS320F2812 DSPs,” *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, 2007, ss. 3316-3320.
- [110] G. Qingding, W. Limei ve L. Ruifu, “Completely digital PMSM servo system based on new self-tuning PID algorithm and DSP,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Shanghai, China, 1996, ss. 71-75.
- [111] G. Erünlü, “Sabit mıknatıslı senkron motorların servo uygulamalarında PID kontrolör parametrelerinin otomatik ayarlanması,” Yüksek lisans tezi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliğı Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [112] A. B. Ecevit, “Güç elektroniğı ve motor sürücü devrelerinde verim artırma yöntemleri,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [113] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/#!products>.
- [114] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5101.pdf>.
- [115] L. Balogh, “Fundamentals of MOSFET and IGBT gate driver circuits,” Texas Instruments, USA, 2017.
- [116] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Florida, USA: Academic Press, 2001.
- [117] N. Mohan, *Power Electronics-Converters, Application and Design*, New York, USA: John Wiley and Sons Inc., 1995.
- [118] M. Ikonen, O. Laakkonen, ve M. Kettunen. (2019, 18 Temmuz). *Two-level and three-level converter comparison in wind power* [Online]. Erişim: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.590.4221&rep=rep1&type=pdf>.
- [119] Y. Özcelep, “Güç mosfetlerinin güvenilirlik analizi,” Doktora tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [120] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://diyot.net/transistor/>.
- [121] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://teknoloji.amasya.edu.tr/media /1214/deney-6-mosfet.pdf>.

- [122] R. S. Ramshaw, *Power Electronics Semiconductor Switches*, London, England: London Chapman & Hall, 1993.
- [123] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.elektrikport.com/univer-site/igbt-nedir-guc-elektronigidersleri/11284>.
- [124] J. Zambada, "Motor control PWM Microchip dsPIC30F Family reference manual," Microchip Technology Inc., USA, 2005.
- [125] J. Zambada, "Mesuring speed and position control with QEI module," Microchip Technology Inc., USA, 2005.
- [126] H. Karaca, "PIC Mikro denetleyici kullanılarak fırçasız DC motorun sensörsüz kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2004.
- [127] R. A. Paz, "The design of the PID controller," *Klipsch School of Electrical and Computer Engineering*, ss. 1-23, 2001.
- [128] R. Malhotra, T. Kaur, G. S. Deol, "DC motor control using fuzzy logic controller," *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 2011.
- [129] İ. Coşkun ve H. Terzioğlu, "Gerçek zamanda değişken parametrelili PID hız kontrolü," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2009.
- [130] M. Kiki, "Yapay sinir ağları kullanarak Türkiye elektrik piyasası gün sonrası fiyat tahmini," Yüksek lisans tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan Üniversitesi, Erzincan, Türkiye, 2018.
- [131] Ö. Civalek ve Y. Calayır, "İnce dikdörtgen plakların titreşim frekanslarının yapay sinir ağları yaklaşımı ile tahmini," *İMO Teknik Dergi*, sayı 275, 2007.
- [132] H. R. Er, "Gezgin satıcı probleminin hadoop üzerinde çalışan paralel genetik algoritma ile çözümü," Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [133] H. Hashimoto, T. Nakayama, S. Kondo ve F. Harashima, "Practical variable structure approach for brushless servo motor control-practical implementation of DSP," *19. Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Kyoto, Japan, 1988, ss. 207-213.
- [134] Ü. Yavuzarslan ve S. Tosun, "Fırçasız Doğru Akım Motorları İçin Sürücü Devre Tasarımı ve Geliştirilmesi," *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 2019, ss. 847-856.
- [135] D. Hansson, "Study and test of a BLDC motor drive systems function and operation for a pump application," M.S. thesis, Institutionen for Elteknik, Chalmers Tekniska Hogskola, 2004.
- [136] Ş. Demirbaş ve H. Fidanboy, "Akım kontrollü gerilim kaynaklı evirici ile sürülen RL yükü üzerindeki akım harmoniklerinin incelenmesi," *6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 230-235.
- [137] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <http://www.amthi.com/en/product.asp?plt=40&pone=41>.

- [138] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-vNA-.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7c1c31671>.
- [139] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/12v-300v-nchannelpower-mosfet/irf3415/?redirId=109395>.
- [140] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.direnc.net/to247-silikon-izalator>.
- [141] Anonim. (2019, 18 Temmuz). [Online]. Erişim: <https://www.direnc.net/to220-sogutucu-boncuk>.



# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Ümit YAVUZARSLAN  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 1983, Çarşamba/SAMSUN.  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : elektrofizikci@gmail.com  
**Web sitesi** : www.elektrofizikci.com  
: Evli ve iki çocuk babası (Habibe Asya ve Alparslan).

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Ön lisans	Fotoğrafçılık ve Kameramanlık	Anadolu Üniversitesi	2018
Ön lisans	Elektrik Enerjisi Üretimi, İletimi ve Dağıtımı	Anadolu Üniversitesi	2015
Lisans	Fizik Bölümü	Fırat Üniversitesi	2007
Lise	Elektronik Bölümü	Çarşamba Endüstri Meslek Lisesi	2000

## YAYINLAR

[1] Ü. Yavuzarslan ve S. Tosun, “Fırçasız Doğru Akım Motorları İçin Sürücü Devre Tasarımı ve Geliştirilmesi,” *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 2019, ss. 847-856.

## İŞ TECRÜBELERİ

KURUM	GÖREVİ	GÖREV SÜRESİ
1. Volta Motor	Elektrik Elektronik Müh.	2019
2. Düzce Bilim ve Sanat Merkezi	Robotik Kodlama Öğretmeni	2017 -2019
3. Düzce Halk Eğitim Merkezi	Robotik Kodlama Öğretmeni	2018
4. Emniyet Genel Müdürlüğü	Polis Memuru	2011-2017
5. Türk Silahlı Kuvvetleri	Yedek Subay	2010
6. Özel Çarşamba Dershanesi	Fizik Öğretmeni	2007-2009
7. Bahar Fotokopi Kırtasiye	Kurucu	2005-2006

## STAJLAR

KURUM	KURUM İLİ	STAJ YILI
1. Delta Tuğla Fabrikası	Düzce	2018
2. Turkuaz Elektrik A.Ş.	İstanbul	2015
3. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu	Ankara	2004
4. Çarşamba Şeker Fabrikası	Çarşamba	2000