



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİKLİ ENGELLİ ARAÇLARI İÇİN**  
**GELİŞTİRİLEN TEST SİSTEMİYLE PMDC**  
**VE PM SENKRON MOTOR KULLANIMININ**  
**ANALİZİ**

**Fatih Alpaslan KAZAN**

**DOKTORA TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Aralık-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Fatih Alpaslan KAZAN tarafından hazırlanan “Elektrikli Engelli Araçları İçin Geliştirilen Test Sistemiyle PMDC Ve PM Senkron Motor Kullanımının Analizi ” adlı tez çalışması 02/12/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

#### Danışman

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

#### Üye

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

#### Üye

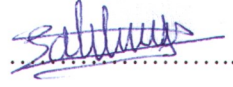
Doç. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

#### Üye

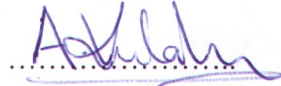
Doç. Dr. Hayri ARABACI

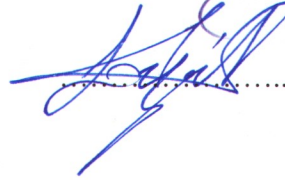
### İmza











Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 17101008 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

  
Fatih Alpaslan KAZAN  
10.12.2019

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### ELEKTRİKLİ ENGELLİ ARAÇLARI İÇİN GELİŞTİRİLEN TEST SİSTEMİYLE PMDC VE PM SENKRON MOTOR KULLANIMININ ANALİZİ

**Fatih Alpaslan KAZAN**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ramazan AKKAYA**

**2019, 137 Sayfa**

#### Jüri

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA  
Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ  
Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU  
Doç. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ  
Doç. Dr. Hayri ARABACI**

Yapılan bu tez çalışmasında akülü engelli araçlarının bir türü olan 3 ve 4 tekerlekli akülü scooter modelleri için test ve arıza tespit sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sistem, araç hızının ölçülmesini sağlayan test platformu, veri okuma kartı ve C# programında hazırlanan bir arayüzden oluşmaktadır. Gerçekleştirilen veri okuma kartı sayesinde akü ve motor akımları, akü ve motor uç gerilimleri, teker devir sayısı, yol eğimi, ortam ve motor sıcaklıkları olmak üzere 8 adet büyüklük test işlemi süresince anlık olarak ölçülmüş ve USB üzerinden bilgisayara aktarılmıştır. Aktarılan bu veriler kullanılarak motor devir sayısı, motorun ürettiği tork, motorun mil gücü, motor ve sürücü verimleri, aracın anlık hızı ve araç kullanılmaya başlandığı andan itibaren alınan toplam yol bilgileri C#'da hazırlanan arayüzde deneysel çalışmalar süresince gerçek zamanlı olarak hesaplanmış, grafikleri çizdirilmiş ve kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen bu sistem sayesinde, engelli araçlarının akü, motor veya sürücülerindeki arızalar farklı ortam sıcaklığı, farklı kullanıcı ağırlığı, farklı eğimli yollar gibi değişik koşullar altında yapılan test ve analizler sayesinde kolayca tespit edilebilir hale getirilmiştir.

Genelde açısız konum ölçümünde kullanılan analog çıkışlı mutlak enkoderlerin hız ölçümünde de kullanılabileceği literatürdekilerden farklı, yeni bir hız ölçüm bir yöntemi olarak ortaya konulmuş ve literatüre M+ADC yöntemi olarak kazandırılmıştır. Sadece frekans yöntemi kullanılarak yapılan hız ölçümünde % 4.91 olarak gerçekleşen ortalama bağıl hata, yeni yöntem kullanıldığında % 0.08'e düşmüştür.

Gerçekleştirilen sistem kullanılarak elde edilen veriler ışığında kalıcı mıknatıslı doğru akım (Permanent Magnet Direct Current-PMDC) motoru ile sürülen engelli aracının farklı yük ve yol eğimlerindeki davranışları ile rejeneratif frenleme etkisi incelenmiş ve analiz edilmiştir. Daha sonra engelli aracındaki PMDC motor yerine kalıcı mıknatıslı (Permanent Magnet-PM) senkron motor takılmış ve tek motora sahip 4 tekerlekli bir akülü engelli aracı Türkiye'de ilk kez bu tez çalışmasında PM senkron motorla sürülmüştür. PM senkron motorla sürülen araç için de benzer testler yapılarak her iki araç için enerji tüketim (Wh/km) değerleri elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Farklı eğimli yollarda farklı ağırlıklara sahip kullanıcılarla yapılan testlerde de kullanıcı ağırlığı ve yol eğiminin enerji tüketimi üzerindeki etkileri deneysel verilerle net bir şekilde ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Akülü scooter, akülü tekerlekli sandalye, engelli aracı, M+ADC yöntemi, ölçme, PMDC motor, PM senkron motor.

## ABSTRACT

### PhD THESIS

# ANALYSIS OF THE USE OF PMDC AND PM SYNCHRONOUS MOTOR WITH THE TEST SYSTEM DEVELOPED FOR ELECTRIC VEHICLES FOR DISABLED PEOPLE

**Fatih Alpaslan KAZAN**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ramazan AKKAYA**

**2019, 137 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA  
Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ  
Assoc. Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU  
Assoc. Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ  
Assoc. Prof. Dr. Hayri ARABACI**

In this thesis study, fault detection and test system was designed and realized for 3 and 4 wheels electric mobility scooter (EMS) models, which are a type of battery-operated wheelchairs. The system is composed of a test platform that enables measurement of vehicular velocity, a data acquisition card, and an interface prepared in the C# program. Using the data acquisition card, eight quantities, namely, battery and motor currents, battery and motor terminal voltages, wheel speed in revolution per minute, road slope, and ambient and motor temperatures, were measured instantaneously during the test procedure and transferred to a computer via a USB device. Using these data that were transferred, motor speed in revolution per minute, torque generated by the motor, motor shaft power, motor and driver efficiency, instantaneous velocity of the vehicle, and total distance covered information obtained from the moment the vehicle began to be used were computed in real time throughout the experiment in the interface prepared in the C#, and their graphs were drawn and recorded. Thus, the faults in the battery, motor, or driver of disabled vehicle (DV) were becoming easily detectable by means of tests and analyzes conducted under various conditions such as different ambient temperatures, different user weights, and roads with different slopes.

It was demonstrated that the absolute encoders with analog output, which are generally used in angular position measurement, can also be used in speed measurement by a different method from those in the literature, and was introduced as M + ADC method to the literature. The average relative error, which was 4.91% when using only the frequency method in speed measurement, decreased to 0.08% when using the proposed new method.

In the light of the data obtained by using the realized system, the behavior of the EMS driven by permanent magnet direct current (PMDC) motor at different load and road slopes and the regenerative braking effect were examined and analyzed. Then, permanent magnet (PM) synchronous motor was mounted instead of PMDC motor on the DV and a 4-wheeled DV, which has a single motor, was driven by PM synchronous motor at this thesis study at the first time in Turkey. Similar tests were performed for the vehicle driven by PM synchronous motor and energy consumption (Wh/km) values were obtained and compared for both vehicles. Tests on different slopes with users, which have different weights, have clearly demonstrated by experimental data the effects of user weight and road slope on energy consumption.

**Keywords:** Battery-operated wheelchair, disabled vehicle, electric mobility scooter, measurement, M + ADC method, PMDC motor, PM synchronous motor.

## ÖNSÖZ

Yapılan bu tez çalışmasında akülü engelli araçlarının bir türü olan ve engelli ya da yaşlı insanlar tarafından yaygın olarak kullanılan 3 ve 4 tekerlekli akülü scooter modelleri için test ve arıza tespit sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sistem sayesinde bu araçların akü, motor veya sürücülerindeki arızalar farklı ortam sıcaklığı, farklı kullanıcı ağırlığı, farklı eğimli yollar gibi değişik koşullar altında yapılan test ve analizler sayesinde kolayca tespit edilebilir hale gelmiştir. Bu sistem, konuyla ilgili teorik ve pratik çalışma yapan kişi ve firmalara katkı sağlayacaktır.

Doktora çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, desteklerini esirgemeyen ve her şeyden önemlisi bana zaman ayıran saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ramazan AKKAYA'ya çok teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesi'ndeki saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ ve Doç. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ'a da tez sürecindeki katkı ve yönlendirmelerinden dolayı teşekkür ederim.

Özellikle test sistemindeki mekanik bölümün hayata geçirilmesindeki katkılarından dolayı Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN'a, tezin her aşamasında kendileriyle istişare ettiğim birbirinden kıymetli mesai arkadaşlarıma, bu günlere ulaşmamda en büyük paya sahip olan sevgili aileme ve bilhassa kendilerine ayırmam gereken zamandan fedakârlık gösterip destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili eşim Gülser KAZAN'a, gözümün nurları olan evlatlarım İrem, Beyza ve Furkan Ahmet'e en kalbî teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Fatih Alpaslan KAZAN  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
<b>3. AKÜLÜ ENGELLİ ARAÇLARI</b> .....	<b>14</b>
3.1. Akülü Engelli Araçları Ve Türleri .....	14
3.1.1 Standart akülü tekerlekli sandalye .....	15
3.1.2 Akülü scooter (Elektrikli mobility scooter) .....	16
3.1.3 Ayağa kaldıran akülü tekerlekli sandalye .....	17
3.1.4 Asansörlü tip akülü tekerlekli sandalye .....	18
3.1.5 Merdivenden çıkabilen/inebilen akülü tekerlekli sandalye .....	18
3.1.6 Hibrit akülü tekerlekli sandalye .....	19
3.2 Akülü Engelli Araçlarının Bileşenleri .....	20
3.2.1 Akü.....	20
3.2.2 Motor .....	23
3.2.3 Redüktör.....	24
3.2.4 Kontrol paneli ve kumanda kolu (Joystick).....	25
3.2.5 Sürücü .....	25
3.3 Akülü Engelli Araçlarında Kullanılan Elektrik Motorları Ve Sürücüleri.....	26
3.3.2 PMDC motor.....	31
3.3.3 PM senkron Motor .....	35
<b>4. AKÜLÜ ENGELLİ ARAÇLARI İÇİN ARIZA TESPİT VE TEST SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ</b> .....	<b>48</b>
4.1 Hız Ölçümünde Kullanılacak Test Platformu ve Geçici Kart .....	48
4.2 Hız Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	50
4.2.1 Hız ölçüm yöntemleri .....	51
4.2.2 Artımsal enkoderle hız ölçümü.....	53
4.2.3 Mutlak enkoderle hız ölçümü .....	53
4.2.4 Hall sensör ve mıknatıslar kullanılarak yapılan hız ölçümü.....	58
4.3 Akü Ve Motor Akımlarının Ölçümü .....	59
4.4 Akü Ve Motor Gerilimlerinin Ölçümü .....	60
4.5 Deney Ortamı Ve Motor Yüzey Sıcaklıklarının Ölçümü .....	62
4.6 Veri Okuma Kartı .....	63
4.7 Veri Okuma Arayüz Programı .....	67

<b>5. TASARLANAN ARIZA TESPİT VE TEST SİSTEMİ KULLANILARAK YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>75</b>
5.1 Tasarlanan Test Sisteminden Elde Edilen Verilerin Doğrulanması .....	76
5.2 PMDC Motorlu Akülü Scooter İle Yapılan Test Çalışmaları.....	79
5.2.1 Laboratuvarında yapılan test çalışmaları .....	80
5.2.2 Dış ortamda yapılan test çalışmaları .....	90
5.3 PM Senkron Motorlu Akülü Scooter İle Yapılan Test Çalışmaları.....	102
5.3.1 Laboratuvarında yapılan test çalışmaları .....	104
5.3.2 Dış ortamda yapılan test çalışmaları .....	109
5.4 Motor Yüzey Sıcaklığı Artışının İncelenmesi .....	115
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>118</b>
6.1 Sonuçlar .....	118
6.2 Öneriler .....	120
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>122</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>132</b>
EK-1 Araç Üzerindeki PMDC Motora Ait Üretici Firma Test Verileri .....	132
EK-2 Akülü Engelli Aracına Takılan PM Senkron Motorun Katalog Bilgisi.....	134
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>135</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$B$	: Viskoz sürtünme katsayısı
$B_r$	: Artık mıknatısiyet
$C_s$	: Enkoderin bağlandığı silindirin çevresi
$C_w$	: Tekerlek çevresi
$E_a$	: Endüviye uygulanan gerilim
$E_b$	: Endüvi sargılarında endüklenen zıt elektromotor kuvvet
$e_a, e_b, e_c$	: Kalıcı mıknatıslı rotor tarafından stator sargılarında endüklenen zıt emk
$H_c$	: Kalıcı mıknatısın alan şiddeti
$I_a$	: Endüvi akımı
$I_b$	: Aküden çekilen akım
$i_a, i_b, i_c$	: Stator faz akımlarının ani değerleri
$i_d, i_q$	: Faz akımlarının d-q bileşenleri
$J$	: Rotor ataleti
$K_b$	: Motorun yapısından kaynaklanan bir sabit
$K_t$	: Motorun tork sabiti
$L_a$	: Endüvi sargısının endüktansı
$L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$	: Faz sargılarının toplam endüktansları
$L_{ab}, L_{ba}, L_{bc}, L_{cb}, L_{ca}, L_{ac}$	: Faz sargıları arasındaki karşılıklı endüktans
$L_d, L_q$	: d-q eksenli endüktansları
$N_m$	: Motorun devir sayısı
$N_s$	: Enkoderin bağlandığı silindirin saniyedeki tur sayısı
$N_w$	: Tekerlek devir sayısı
$P_b$	: Aküden çekilen güç
$P_d$	: Sürücünün harcadığı güç
$P_{lose}$	: Motorda kaybolan güç
$P_{mot}$	: Motorun çektiği güç
$P_{shf}$	: Motorun mil gücü
$p$	: Motorun çift kutup sayısı
$p_g$	: Redüktör oranı
$p_u$	: Enkoderin 1 saniyede ürettiği pals sayısı
$R_a, R_b, R_c$	: Faz sargılarının omik dirençleri
$T$	: Sıcaklık
$t$	: Zaman
$T_m$	: Motorun ürettiği moment
$T_L$	: Yük momenti
$T_j$	: Motorun atalet momenti
$T_\omega$	: Sürtünme momenti
$V_b$	: Akü uç gerilimi
$V_{N_{ilk}}$	: İlgili veri aralığının ilk değeri
$V_{N_{son}}$	: İlgili veri aralığının son değeri
$v_a, v_b, v_c$	: Stator sargılarına uygulanan faz gerilimlerinin ani değerleri
$v_d, v_q$	: Giriş geriliminin d-q bileşenleri
$X_s$	: Aracın bir saniyede aldığı yol
$X_t$	: Aracın aldığı toplam yol
$W$	: Aküden çekilen toplam enerji
$\omega_m$	: Motorun açısal hızı

$\psi_a, \psi_b, \psi_c$	: Faz sargılarının akıları
$\psi_d, \psi_q$	: d-q eksenli manyetik akıları
$\eta_s$	: Sürücü verimi
$\eta_{mot}$	: Motor verimi

### Kısaltmalar

ABS	: Kilitlenme karşıtı frenleme sistemi (Anti-lock braking system)
AC	: Alternatif akım (Alternating current)
ADC	: Analog-dijital dönüştürücü (Analog-to-digital converter)
AGM	: Cam elyafa emdirilmiş (Absorbed glass mat)
Ah	: Amper saat (Ampere-hour)
BFO	: Bakteriyel toplayıcı optimizasyon (Bacterial foraging optimization)
BLDC	: Fırçasız doğru akım (Brushless direct current)
CCP	: Compare/Capture/PWM
DC	: Doğru akım (Direct current)
DKS	: Düşen kenar sayısı
DTC	: Doğrudan tork kontrolü (Direct torque control)
EMK	: Elektro motor kuvvet
FOC	: Alan yönlendirmeli kontrol (Field oriented control)
FWC	: Alan zayıflatmalı kontrol (Field weakened control)
GSM	: Mobil iletişim için küresel sistem (Global system for mobile communications)
MTPA	: Amper başına maksimum tork (Maximum torque per ampere)
PI	: Oransal-integral (Proportional-integral)
PID	: Oransal-integral-türevsel (Proportional-integral-derivative)
PM	: Kalıcı mıknatıs (Permanent magnet)
PMDC	: Kalıcı mıknatıslı doğru akım (Permanent magnet direct current)
PMSM	: Kalıcı mıknatıslı senkron motor (Permanent magnet synchronous motor)
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu (Pulse-width modulation)
sEMG	: Yüzey elektromiyografisi
VRLA	: Sübap ayarlı kurşun asit (Valve regulated lead acid)

## 1. GİRİŞ

Birçok insan günlük yaşamlarında felç veya trafik kazası gibi kendi kontrollerinin dışında gerçekleşen ve onları bir ömür boyu tekerlekli sandalyeye mahkûm eden hastalık veya kazalarla karşılaşabilmektedir. Bazı insanlar ise doğuştan yürüme engellidirler. Dolayısıyla akülü veya aküsüz tekerlekli sandalyeler onların hayatlarında vazgeçilmez bir unsurdur.

Maddi durumları el verdiği ölçüde akülü engelli aracı kullanmak isteyen engelli insanlar için günümüzde geniş bir yelpazede akülü tekerlekli sandalye ve akülü scooter modelleri üretilmektedir. Bunların çift motorlu olanlarına akülü tekerlekli sandalye, tek motorlu olanlarına ise akülü scooter (elektrikli mobility scooter) denir.

Kullanım koşullarına göre farklı güç seçenekleri sunulduğu gibi, kullanıcıyı araç üzerinde dik pozisyona getirebilen akülü engelli aracı modelleri de mevcuttur (Putra ve ark. 2017). Ancak hangi model veya güçte üretilirse üretilsinler, bu araçların temel bileşenleri akü, motor ve sürücüdür. Bu tür araçların üreticileri incelendiğinde genelde farklı firmalardan motor, akü ve sürücü satın aldıkları, ardından bunları bir gövde (şase) üzerine yerleştirerek aracı satışa sundukları görülmektedir. Araçta bir arıza meydana geldiğinde ise çok teknik olmayan yollarla arızayı tespit etmeye çalıştıkları gözlenmiştir.

Bu tür araçlarda meydana gelen arızalar her zaman motorun dönmemesi veya akünün şarj tutmaması olarak ortaya çıkmaz. Zamanla motor ve sürücü verimlerinde yaşanan azalmalar, motorun çok çabuk ısınması, akünün normale göre daha hızlı deşarj olması, buna bağlı olarak da aracın tam şarjla daha kısa mesafe kat etmesi muhtemel arızalardandır. Sadece motor akımı veya sadece akü akımı ölçülerek sürücü verimindeki düşmenin tespit edilmesi mümkün olmadığı gibi sadece oda sıcaklığında yapılan testlerde çok düşük veya çok yüksek sıcaklıklarda kendini gösteren arızaların tespit edilmesi de olası değildir. Veya arızalı olduğu düşünülen motorun alınıp başka bir araçta test edilmesi doğru bir arıza tespit yöntemi değildir. Tüm bunlar dikkate alındığında arıza tespiti sırasında aracın tüm bileşenlerinin birbiriyle etkileşim içerisinde olması ve bunların bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekir. Bunu sağlamak için de akü ve motor akımlarının, akü ve motor uç gerilimlerinin, motor devir sayısının, motor ve ortam sıcaklıklarının, motorun ürettiği momentin, aracın anlık hızının ve araç kullanılmaya başlandığı andan itibaren kat edilen mesafe bilgilerinin toplanarak bilgisayara aktarılması ve bunların analiz edilerek problemin gerçek kaynağının tespit edilmesi gerekir.

Bu araçlarla ilgili yapılan yayınlar tarandığında Chen ve ark. (2008) tarafından yapılmış olan tekerlekli sandalyede ağırlık merkezi, eylemsizlik momenti, motorun hız ve tork sabitleri gibi parametrelerin bulunmasına yönelik bir çalışma göze çarpmaktadır. Yine yapılan yayınlar incelendiğinde eli ve kolu olmayanlar için farklı çözümler üretilmeye çalışıldığı görülmektedir. Örneğin sandalyenin baş hareketleriyle kontrol edilmesi (Deniz ve ark. 2017; Marins ve ark. 2017; Nasif ve Khan 2017; Yokota ve ark. 2009), gözle kontrol edilmesi (Arai ve Mardiyanto 2011; Gajwani ve Chhabria 2010; Jain ve ark. 2015; Nguyen ve Jo 2012; Sharma ve ark. 2017), sesli komutla kontrol edilmesi (Chauhan ve ark. 2016; Ghule ve ark. 2016; Škraba ve ark. 2015; Wang ve Yu 2017), ağız hareketiyle kontrol edilmesi (Ju ve ark. 2009) bunlardan bazılarıdır. Yolcu karakteristiklerinin değerlendirildiği (Sawabe ve ark. 2017), insan faktörünün incelendiği (Hashimoto ve ark. 2018), aracın eylemsizlik momentinin deneysel yolla ölçüldüğü (Wang ve ark. 2007), koltuk altına yerleştirilen 9 eksenli sensörle aracın farklı yol koşullarındaki titreşiminin incelendiği (Wang ve ark. 2017a), aracın mekaniksel ve elektriksel empedanslarının sensörle ölçüldüğü (Hondori ve ark. 2013) çalışmalar da mevcuttur. Ancak akülü araçların arıza tespitinde veya test edilmesinde kullanılacak komple bir sistemin tasarlandığı çalışmaya rastlanamamıştır.

Doruk ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada akülü engelli aracında bu verilerden bazıları alınarak veri tabanına aktarılmıştır. Ancak ilgili çalışmadaki hız ölçümünün tekerlek içerisine konulan mıknatıs ve reed anahtarla yapılması, saniyedeki devir sayısı birin çok altında olan hızlar için yeterli bir ölçüm yöntemi değildir. Ayrıca bu durum hıza bağlı olarak hesaplanan diğer parametrelerin hesaplanma aralığını da açacak, dolayısıyla farklı hız kademelerinde farklı veri alma sıklıklarına neden olacaktır. Bu da aküden çekilen enerjinin yanlış hesaplanmasına yol açacaktır.

Bu ihtiyaçların karşılanması için yapılan bu tez çalışmasında engelli veya yaşlı insanların kullandıkları akülü scooter modellerine yönelik arıza tespit ve test düzeneği tasarlanmıştır. Söz konusu sistemde akü ve motor akımları, akü ve motor uç gerilimleri, teker devir sayısı, yol eğimi, ortam ve motor sıcaklıkları olmak üzere 8 farklı veri, test işlemi süresince ölçülmekte ve anlık olarak USB üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır. Ardından bu veriler kullanılarak motor devir sayısı, motorun ürettiği tork, motorun mil gücü, motor ve sürücü verimleri, aracın anlık hızı ve araç kullanılmaya başlandığı andan itibaren alınan toplam yol bilgileri, C#'da hazırlanan arayüzde anlık olarak hesaplatılmakta, grafikleri çizdirilmekte ve kaydedilmektedir. Ölçülen ve hesaplanan tüm veriler aynı zamanda arayüzde anlık olarak da izlenebilmektedir. Motor akımı ve buna bağlı olarak motor sıcaklığının anormal şekilde artması durumunda sistem, sesli bir hata uyarısı vermektedir.

Ölçülen parametrelerin grafikleri deneyimli bir teknik eleman tarafından değerlendirildiğinde hatanın nedeni daha ayrıntılı olarak belirlenebilecektir.

Tezin ikinci bölümünde, akülü engelli araçları ve bileşenleriyle ilgili daha önceden yapılan akademik çalışmalar özetlenmiştir. Akülü engelli araçlarının türleri ve özelliklerinin anlatıldığı üçüncü bölümde bu araçların temel bileşenleri de detaylı olarak verilmiştir. Dördüncü bölümde ise bu araçlarda kullanılan motorların yapıları, matematik modeli ve kontrol yöntemleri anlatılmıştır. Tezin çıkış noktası olan ve hem kalıcı mıknatıslı doğru akım (Permanent magnet direct current-PMDC) motoruyla hem de ilk defa bu tez çalışmasında gerçekleştirilecek olan kalıcı mıknatıslı (Permanent magnet-PM) senkron motor ile sürülen akülü scooter modellerinin test ve analizlerinin gerçekleştirilebileceği test sistemi, tezin beşinci bölümünde tanıtılmıştır. Tezin altıncı bölümünde, tasarlanan sistem kullanılarak elde edilen verilerle test aracı üzerindeki PMDC motorun üreticisine ait veriler karşılaştırılarak tasarlanan sistemin doğruluğu ortaya konulmuş ve ardından aracın hem PMDC hem de PM senkron motorla sürülmesine ilişkin laboratuvar ve dış ortam testleri verilmiştir. Yapılan bu test ve analizlerden elde edilen sonuçlar ise tezin yedinci bölümünde tartışılmış olup bundan sonraki çalışmalara ışık tutacak bazı önerilerde de bulunulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde akülü engelli araçları, bileşenleri, bu araçlarda kullanılan motorların kontrolleri ve bu araçların test edilmesine yönelik yapılan çalışmalar taranmıştır. Bu tez çalışmasında PMDC motorlu akülü scooter türü engelli aracının PM senkron motor ile sürülmesi de denendiği için bu motorların kontrolü de araştırılmış olup önemli görülenler aşağıda özetlenmiştir.

Jelonkiewicz ve Linnman (1993) tarafından yapılan çalışmada akülü tekerlekli sandalyede PM senkron motor kullanabilmek için bir inverter önerilmiştir. Girişindeki 24 Vdc gerilimi 3 faz 100 Vac gerilime dönüştüren ve 1 kW gücünde olan bu inverterin frekans aralığı 0,1-100 Hz arasında olup çözünürlüğü 0,1 Hz'dir. Mikrodenetleyici olarak SAB 80C3537 kullanılmış olup çalışma sonunda sürücünün genel verimi analiz edilmiştir.

Hamilton (2000) tarafından DC motorlarda kullanılan fırçaların kullanım ömürleri üzerine yapılan çalışmada motor yükü ve hızının fırça ömrünü etkilediği, orta güçlü bir DC motorda fırça ömrünün minimum 2000-5000 saat arasında olduğu, maksimum fırça ömrünün de 10000 saati geçmeyeceği vurgulanmıştır.

Carella ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada akülü tekerlekli sandalyede kullanılan PM senkron motorun rotor konumunu belirlemek için Hall etkisini temel alan zıt emk tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Hem rotorun başlangıç konumunu tespit etmek hem de her 60 elektriki derecede rotor konum bilgisi hatasını resetlemek için üç tane Hall sensör kullanılmıştır. 200 W, 14 N·m ve 136 d/dk olan 3 fazlı, 16 kutuplu PM senkron motorun kullanıldığı bu uygulamada 16 bitlik işlemci kullanılmıştır. Hız tahmin algoritmasıyla donatılmış sürücünün sıfıra yakın hızlarda çalışması simülasyonlar ve kapsamlı bir deneysel test süreci ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, hızın artımsal enkoder kullanılarak elde edilen gerçek değerlere kıyasla kesinlikle ihmal edilebilecek düzeyde bir hata oranıyla, hem geçici hem de kararlı durumlarda tahmin edildiğini ortaya koymuştur.

Nilssen ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada akülü tekerlekli sandalyede kullanılmak üzere konsantre sargılı, aksel akılı bir PM senkron motor tasarımı anlatılmıştır. Motor; anma gücü 300 W, anma hızı 150 d/dk, maksimum torku 90 N·m, kutup sayısı 38 ve verimi % 85 olacak şekilde tasarlanmıştır. Motorun anma hızı, aracın saatte 10-12 km'lik hıza ulaşması dikkate alınarak tespit edilmiştir. Tasarlanan bu motor yerden tasarruf sağlamak için tekerlek jantıyla bütünleştirilmiş olup, bu sayede redüktörlü

sistemlere kıyasla genel verimde % 40 ile % 80 arasında bir artış sağlanacağı iddia edilmiştir.

Zeraoulia ve ark. (2006) tarafından hibrit elektrikli araçlar için en uygun elektrikli sürme sisteminin seçilmesine imkân veren karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında DC motor, asenkron motor, PM senkron motor ve anahtarlamalı relüktans motorun performansları etkin bir şekilde karşılaştırılmıştır. Sonuçta hibrit elektrikli araçların sürülmesinde ana gereksinimleri daha iyi karşılayan motorun asenkron motor olduğu belirtilmiştir.

PM senkron motorların elektrikli ev aletlerinde kullanılması için Sakamoto ve ark. (2007) tarafından basitleştirilmiş bir vektör kontrol yöntemi önerilmiştir. Herhangi bir otomatik hız ya da akım regülâtörü kullanımının gerekmediği ifade edilen çalışmada önerilen yöntemin geleneksel vektör kontrolü ile neredeyse aynı performansa sahip olduğu yapılan benzetimler ve deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir. Önerilen yöntem bataryadan beslenen elektrikli bir süpürge üzerinde uygulanmıştır.

Lopes ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada elektrik mühendisliği öğrencilerinin endüstriyel elektronik dünyasına ilgilerini artırmak amacıyla akülü tekerlekli sandalyede kullanılmak üzere bir PM senkron motor sürücüsü ve bu sürücünün kontrolünü bilgisayarda izlemek için bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan arayüzde PI parametreleri ve motor hızı kontrol edilebilmektedir. Mikrodenetleyici olarak dsPIC30F4012 kullanılmıştır.

Tarımer ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada elektrikli tekerlekli sandalyelerdeki aktarma organlarının kullanımını ortadan kaldırmak için tasarlanan hub (tekerlek içi) motorun tasarım süreci anlatılmıştır. Maxwell 2D kullanılarak tasarlanan bu hub motor fırçasız DC (brushless direct current-BLDC) motor olup 24 V, 8.08 A, 160 d/dk, 160 W, 120 Nm anma değerlerine sahiptir.

Wang ve ark. (2009) tarafından kaleme alınan çalışmada üç farklı kontrol yönteminin akülü tekerlekli sandalyenin sürüş hızı değişimi ve tekerlek kayması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tekerlekli sandalyenin hızını ve çekişini kontrol etmek için bir kinematik model ile üç boyutlu bir dinamik model geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada tekerlek hızlarını kaydetmek ve kaymayı tespit etmek için bilgisayarlı bir kontrolör ve enkoderler kullanılarak akıllı bir tekerlekli sandalye platformunun tasarlandığı ve üretildiği belirtilmiştir. Ancak verilerin alınmasında ve kaydedilmesinde kullanılan bu sistemin detayları paylaşılmamıştır. Araca dört farklı yüzeyde üç farklı hızda model tabanlı, PID ve açık döngü kontrol uygulanmıştır. Hız hataları, yükselme

süresi, oturma süresi ve kayma katsayısı hesaplanmış ve bir hız adım-cevap girişi ile karşılaştırılmıştır. Paylaşılan deneysel sonuçlara göre model tabanlı kontrol tüm hızlarda ve yüzeylerde en iyi performansı göstermiştir.

Zhang ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada elektrikli taşıtlarda kullanılmak üzere yekpare rotorlu 30 kW'lık bir PM senkron motor tasarlanmıştır. Kalıcı mıknatıslar, yol verme çubukları ve yarıklı bölümlerden oluşan bu rotor sayesinde kalkınma momentinde artış sağlanmıştır.

Zhi-Fu ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan PM senkron motorun sıcaklığını belirlemek için stator direncine dayalı yeni bir hesaplama yöntemi önerilmiştir. Öncelikle PM senkron motorun dinamik matematiksel modeli kurulmuştur. Ardından model referans uyarlamalı sistem teorisi üzerine direnç tanımlama sistemi modeli inşa edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, önerilen modelin etkili olduğunu göstermiştir.

Kim ve ark. (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmada, tekerlek içi motor uygulamalarında 3 fazlı PM senkron motorun yerine 2 fazlı PM senkron motor kullanımı üzerine durulmuştur. Öncelikle 2 fazlı motor modeli ve karakteristikleri analiz edilmiştir. Ardından motorun sürülmesi için 2 fazlı tam köprü inverter önerilmiştir. Önerilen inverter 20 kutuplu, 850 W, 30 N·m, 500 d/dk ve 60 A değerlerine sahip 2 fazlı tekerlek içi motorda test edilmiştir.

Oonishi ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada güç destekli tekerlekli sandalye için yeni bir denetleyici tasarlanmıştır. Geleneksel güç destek kontrol cihazları sadece tork sensörü kullanılarak insan giriş kuvvetinin güçlendirilmesine odaklanmaktadır. Ancak bu çalışmada önerilen denetleyicide tork sensörü kullanılmayıp sürücünün niyetini tahmin etmek için bir elektromyogram sensörü kullanılmıştır. Tahrik torku bilgisinin eksikliğini telafi etmek için de bir bozucu gözlemci kullanılmıştır. Ardından, filtrelenmiş miyoelektrik sinyallerini ve bozucu gözlemci tarafından hesaplanan tahmini insan torku sinyalini birleştirerek yardımcı torka karar verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, önerilen güç yardım yönteminin hızlı, kararlı ve düzgün bir ivme gerçekleştirdiğini göstermiştir.

Ruiz ve ark. (2010) tarafından kaleme alınan çalışmada, özellikle durağan olmayan koşullar altında çalışan PM senkron motorlarda demanyetize hatalarının tespiti ve teşhisi üzerine yoğunlaşan bir zaman-frekans yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntemin etkinliği deneysel sonuçlar ile kanıtlanmaya çalışılmıştır.



Cer ve elektrikli taşıt uygulamalarında yüksek hız modu oldukça önemlidir. Dolayısıyla etkili bir alan zayıflatma tekniği kaçınılmazdır. Ancak ortamdaki sıcaklık, toz ya da titreşim gibi birçok parametre genel kontrol tekniğini etkileyebilmektedir. PM senkron motorlardaki bu problemleri çözmek için Aymen ve Lassâad (2012) tarafından yeni, güvenilir ve yüksek hızlı bir adaptif kontrol tekniği sunulmuştur. Önerilen teknik bakteriyel toplayıcı optimizasyon (Bacterial foraging optimization-BFO) algoritmalarına dayanmakta olup PI parametrelerinin ayarlanması BFO tabanlı akıllı algoritma ile sağlanmıştır. Önerilen kontrol yönteminin etkinliği simülasyon sonuçlarıyla kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Deaconu ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada 380W 3000d/dk anma değerlerine sahip olan bir PM senkron motor, iki farklı besleme tekniği dikkate alınarak çalıştırılmış ve bu durumlardaki sıcaklık yönetimi analizi sunulmuştur. Kullanılan tekniklerin ilkinde ayarlanabilir frekanslı 3 fazlı bir sinüsoidal gerilim kaynağı ile besleme yapılmıştır. İkincisinde ise üç fazlı sinüsoidal darbe genişlik modülasyonlu (Pulse Width Modulation-PWM) inverter ile besleme yapılmıştır. Motorun farklı besleme teknikleri altındaki termal davranışlarını tam olarak gözlemleyebilmek için, aynı yük modeli altında 500, 1000, 2000 ve 3000 d/dk'lık hızlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar her hız kademesi için ayrı grafikler şeklinde sunulmuştur.

Groot ve ark. (2013) tarafından kaleme alınan makalede lastik türü ve lastik basıncının fiziksel zorlanma ve tekerlekli sandalye sürme tekniği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu etki incelenirken lastik basıncı, lastik türü ve toplam kütle olmak üzere üç faktör üzerinde değişiklik yapılmıştır. Testlerde manuel bir tekerlekli sandalye kullanılmış olup, test için bir koşu bandı üzerine çıkartılmıştır. Ardından kullanıcının kalp atım hızı ve oksijen alımı gibi değerleri ölçülerek sonuca varılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda sert lastiklerin daha çok zorlanmaya yol açtığı, artırılan ağırlığın da dolgu lastikler üzerinde daha çok etkili olduğu, dolayısıyla kullanıcının daha çok güç sarf etmesi gerektiği görülmüştür.

Lakshmi ve ark. (2013) tarafından kaleme alınan çalışmada hibrit elektrikli araçlar için PM senkron motor sürücüsünün analizi yapılmıştır. Analiz kapsamında PM senkron motorun matematik modeli hibrit elektrikli araçlara uygun olarak simüle edilmiş ve sistemin her bir parçasındaki akım ve gerilim değerlerinin ölçümüne imkân verilmiştir. Böylece anlık veya ortalama kayıpların hesaplanması ve verimlilik takibi mümkün kılınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, PM senkron motor sürücüsünün hız-moment

karakteristiklerinin hibrit elektrikli araçların sürülmesi için uygun olan çok iyi geçici ve sürekli durum özelliklerine sahip olduğu vurgulanmıştır.

Kondori ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada tekerlekli sandalyenin kontrolünü doğrudan kullanıcının baş hareketlerine göre tahmin edip gerçekleştiren yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yeni yöntemde kullanıcının baş hareketi tahmin edilmekte ve tekerlekli sandalyeyi yönlendirmek için kontrol mimikleri üzerine haritalamaktadır. Önerilen yöntemin gerçek zamanlı olarak doğru bir şekilde çalıştığı belirtilen bu yayında, sistemin açık havada çalışırken bazı zorluklarla karşılaşabildiği ancak bunun da diğer bazı derinlik sensörleri kullanılarak çözülebildiği vurgulanmıştır.

Doruk ve ark. (2015) tarafından kaleme alınan çalışmada, elektrikli araçlarda araca ait bazı elektriksel veriler alınarak veri tabanına aktarılmıştır. Hız ölçümü, tekerlek içerisine konulan mıknatıs ve reed anahtarla yapılmıştır.

Pavlidou ve ark. (2015) tarafından kaleme alınan çalışmada güç destekli bir tekerlekli sandalye ile manuel bir tekerlekli sandalyenin yuvarlanma dirençleri koşu bandında ölçülüp karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada güç desteklideki yuvarlanma direncinin daha büyük olduğu, bu nedenle kullanıcının daha çok enerji tüketmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Takura ve Akatsu (2015) tarafından yapılan çalışmada, fırça ucu açısını değiştirerek DC motorun çalışma aralığını genişletme önerilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği simülasyon ve deney sonuçlarıyla kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Silva ve ark. (2016) tarafından kaleme alınan çalışmada, tekerlekli sandalyelerde hareket halindeki lastik ile yer arasındaki temas kuvvetini ölçmek için bir test düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Toplamda üç adet load cell kullanılan test düzeneğinde verilerin toplanması için veri okuma sistemi kullanıldığı belirtilmiş ancak detayları paylaşılmamıştır. 10 cm ile 70 cm arasındaki çaplara sahip lastiklerin test edilebileceği belirtilen çalışmada havalı ve dolgulu olmak üzere 15 ve 20 cm çaplarında 3 adet lastik türü test edilmiştir. Ancak elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu, bu nedenle test sisteminin biraz daha geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Tang ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada sensörsüz dâhili tip PM senkron motorların sürücüleri için yeni bir kapalı çevrim V/f kontrol şeması sunulmuştur. Önerilen kontrol şeması, basit ve yüksek performanslı bir motor sürücüsü elde etmek için geleneksel V/f ve alan yönlendirmeli kontrol yöntemlerinin mezziyetlerini birleştirmiştir. V/f gerilim vektör referansını düzeltmek ve tüm sistemin kararlılığını geliştirmek için iki tane geri besleme tasarlanmıştır. Önerilen tasarımın geniş bir hız aralığında iyi bir kontrol

performansı gerektiren uygulamalar için ideal olduğu, aynı zamanda sıcaklık artışı veya akı doygunluğu nedeniyle parametre değişimlerine karşı da dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Önerilen kontrol şemasının etkinliğini doğrulamak için karşılaştırmalı simülasyon ve deney sonuçlarıyla birlikte teorik analiz verilmiştir.

Ji ve ark. (2016) tarafından kaleme alınan çalışmada sinüzoidal enkoderler (resolver) için yeni bir interpolasyon yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemle, servo motor sürme sisteminin hem sinüs hem de kosinüs dalga sinyallerini alabileceği, bunları yüksek çözünürlüklü darbe dizilerine dönüştürebileceği, bu darbeleri sayarak motorun hızını ve konumunu hesaplayabileceği ifade edilmiştir. Yöntem yaklaşık doğrusal fonksiyon hesaplamasını ve aralık bölme algoritmasını içermektedir. Yüksek hassasiyet elde etmek amacıyla hız hesaplamasında ek donanım masrafı olmaksızın az bir ekstra hesaplama ile sisteme kolayca uygulanabileceği vurgulanan çalışmada önerilen yöntemin deneysel olarak gerçekleştirildiği ve doğrulandığı, çok düşük hız bölgelerinde bile çoğu sürücüye uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Lee (2016a) tarafından yapılan çalışmada, manyetik bir kodlayıcı kullanarak elektrik güç kumanda motorunun hızının ölçülmesinde yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen M/T (frekans/periyot) yönteminin elektrik güç kumanda uygulamaları için hızı daha doğru bir şekilde ölçebildiği ifade edilmiş olmasına rağmen herhangi bir doğruluk yüzdesi verilmemiştir.

Yan ve ark. (2016) tarafından kaleme alınan çalışmada mutlak optik enkoderlerle donatılmış düşük hızlı PM senkron motor sürücülerin hız ölçüm performansını artırmak amacıyla, üst üste binen ölçüm bölgelerine dayanan bir hız ölçme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği ve etkinliği deneysel sonuçlarla kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Kaiser ve ark. (2016) tarafından kaleme alınan makalede fiziksel engelliler için güneş enerjili bir tekerlekli sandalye tasarımı ve uygulaması sunulmuştur. Tekerekli sandalyeyi hareket ettirmek için gerekli sinyaller, yüzey elektromiyografisi (sEMG) tekniği kullanılarak elin farklı kaslarından elde edilmiştir. Ham sEMG sinyallerinden çıkarılan kalıpları ve özellikleri sınıflandırmak için yapay sinir ağı temelli sınıflandırıcı inşa edilmiştir. sEMG sinyallerinden çıkarılan parametrelerin sınıflandırma doğruluğunun mevcut yöntemlere kıyasla nispeten yüksek olduğu belirtilen çalışmada, önerilen tekerlekli sandalyenin düşük maliyetli olduğu vurgulanmıştır.

Karim ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ikinci el klasik bir tekerlekli sandalyeye DC motor, Raspberry Pi 3, Zigbee modül ve uzaklık sensörleri yerleştirilerek engellere çarpmadan hastaya ulaşan akülü bir engelli aracı üretilmiştir. Hastaya 30 cm

mesafeye kadar yaklaşan ve prototip olarak üretilen bu aracın geliştirilmeye ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir.

Sawa ve ark. (2017) tarafından yapılan deneysel çalışmada DC motor hızının komütasyon süresi, ark süresi ve fırça aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Komütasyon ve ark sürelerinin hızla ters orantılı olarak azaldığı vurgulanan çalışmada, deneysel sonuçlara dayanılarak dönme hızının aşınma üzerindeki etkisini ortaya koyan bir model önerilmiştir.

Qiu ve ark. (2017) tarafından kaleme alınan makalede yüzey montajlı bir PM senkron motorda, akım harmoniklerinin motor performansı üzerindeki etkisini belirlemek için, motora farklı harmonik akımlar enjekte edilmiştir. Öncelikle harmonikli akımın motor manyetik alanı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, motor manyetik alanın ayrıştırılmasına yönelik yeni bir ayrıştırma yöntemi önerilmiştir. İkinci olarak, temel ve farklı harmonik akımlarında motor torkundaki dalgalanma karşılaştırılarak, harmoniklerin motor torku dalgalanmasına etkisi araştırılmıştır. Daha sonra farklı akım harmoniklerinin motorun girdap (eddy) akımı kaybı üzerindeki etkisi karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Son olarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, farklı harmoniklerle motor sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Simülasyonun ardından yapılan deneysel çalışmalarda, termal kamera ile motorun yüzey sıcaklığı da izlenmiştir. Soğutma kanallarına sahip olan motorun ilave olarak bir fan yardımıyla da soğutulmaya çalışıldığı deneyde, motorun fana en yakın ve en uzak olan bölgeleri arasındaki yüzey sıcaklığı farkının yaklaşık 22 °C olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonunda; farklı genliklere sahip harmonikli akımların motorun ortalama torkunu etkilemediği, ancak harmonikli akımın genliğindeki artışın torktaki dalgalanmayı daha da artırdığı vurgulanmıştır. Ayrıca aynı genliğe sahip harmonikli akımlarda, derecesi yüksek olan harmoniklerde kalıcı mıknatıs sıcaklığının daha da arttığı ifade edilmiştir.

Wang ve ark. (2017b) tarafından kaleme alınan makalede düşük maliyetli bir görüntüleme cihazına dayalı hız ölçüm sistemi sunulmuştur. Görüntülerin işlenmesi için yapısal benzerlik ve iki boyutlu korelasyon algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen çalışmada farklı işaretçilerin, görüntü işleme algoritmalarının ve aydınlatma koşullarının ölçüm sisteminin performansı üzerindeki etkileri, deneysel testler aracılığıyla incelenmiştir. İnceleme sonucunda, önerilen sistemin 0 – 700 d/dk hız aralığında % 0.8'den daha düşük normalleştirilmiş standart sapma ve maksimum  $\pm\%$  1'lik göreceli hata ürettiği ifade edilmiştir.

Gyro olarak da bilinen jiroskop sensörleri, yön ölçümü işlemlerinde kullanılan ve açısal dengenin korunması ilkesiyle çalışan sensörlerdir. Günümüzde başta akıllı telefonlarda olmak üzere oyun konsolları, dijital pusulalar ve robotlar gibi birçok bilinen cihazda kullanılmaktadır. Ayrıca bu sensörler, Segway tarzı bisikletlerin de temel denge unsurudur. Süzen ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada gyro sensöründen gelen verilerin işlenmesi ile tekerlekli sandalyenin hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Ellerini ve ayaklarını kullanmadan tekerlekli sandalyede yaşaması gereken bir hastanın, başını hareket ettirerek sandalyeyi yönlendirmesi sağlanmıştır. Baş hareketleri hastanın giyeceği bir şapka üzerindeki gyro sensör yardımıyla algılanmıştır. Sensörden alınan bilgiler bir mikrodenetleyici ile işlenip gelen verilere göre tekerlekli sandalye hareket ettirilmiştir. Tasarlanan kontrol devresi bir prototip üzerinde çalıştırılmıştır.

Nguyen ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada akülü tekerlekli sandalyelerin kullanımı sırasında kullanıcıların konfor ve güvenliğini sağlamak için yol takip denetleyicisi önerilmiştir. Kullanıcı rahatlığını etkileyen sarsıntı ve hızlanma problemlerini dikkate alan yöntemin etkinliği, farklı sürüş durumlarına sahip sayısal simülasyonlarla gösterilmeye çalışılmıştır.

Hong ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada PMDC motorlarda elektromanyetik titreşimi azaltmak için motorun sabit mıknatıslı kutbuna bakır halka yapılandırılması önerilmiş ve deneysel olarak da denenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda titreşimin % 40'a kadar azaldığı vurgulanmıştır.

Rabhi ve ark. (2018) tarafından kaleme alınan çalışmada akülü tekerlekli sandalyenin kumanda kolunu kullanamayacak düzeyde fiziksel engeli olan hastalar için yeni bir kontrol önerilmiştir. Önerilen hareket kontrol sisteminde tekerlekli sandalyeye sabitlenmiş bir kamera bulunmaktadır. Hastanın el hareketleri görsel tanıma algoritması ve yapay zekâ kullanılarak tanınmakta ve araç gerçek zamanlı olarak kontrol edilmektedir. Bu kontrol tekniğinin diğer kameralı sistemlerden farkı, hastanın tekerlekli sandalyeyi standart bir kumanda koluna benzer şekilde değişken bir hızla sürmesine izin vermesidir.

Rojas ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada engelli araçlarının engellerden kaçınması için bulanık mantık ve ultrasonik sensör tabanlı bir engelden kaçınma denetleyicisi sunulmuştur. Prototipi denemek ve denetleyici performansını değerlendirmek için 0,65 m/s'lik bir hız ve sınırlı bir alanda çeşitli testlerin yapıldığı çalışmada, sensörlerden veri toplayan sistemin saniyede 46,16 kez karar alabildiği ve engellerden kaçma konusunda kullanıcıya yardımcı olabileceği ifade edilmiştir.

Sato ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada akülü tekerlekli sandalye için kendi kendine sürüş sistemi geliştirmiştir. Önerilen yöntem akıllı telefon ile elde edilen görüntüleri kullanan derin öğrenme yoluyla konum tahminine dayanmaktadır. İlk konumdan hedefe olan rota, sistemde depolanan bir harita kullanılarak hesaplanmaktadır. Yapılan deneyler sayesinde bu sistemin, akülü bir tekerlekli sandalyeyi başlangıç konumundan varış noktasına kadar bir rota boyunca götürebildiği doğrulanmıştır.

Wu ve ark. (2018a) tarafından yapılan çalışmada, sürüş güvenliğini arttırmak için akülü tekerlekli sandalyeye kilitlenmeyi önleyen fren sistemi (ABS) uygulanmıştır. Geliştirilen bu sistemde kullanıcı bir stop komutu verdiğinde, sistem yolun mevcut durumuna adapte olmakta ve sürtünme katsayısını hızlı ve doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Daha sonra mevcut ivme, hız ve diğer bilgileri sürekli güncelleyen sensör sayesinde, güç tekerleğinin ters dönüş torku uygun şekilde ayarlanmakta ve aracın güvenli ve en kısa sürede durması sağlanmaktadır.

Wu ve ark. (2018b) tarafından yapılan bir diğer çalışmada akülü tekerlekli sandalyelerin yokuş yukarı emniyetle çıkmalarını sağlamak için bir denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici, adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi içermektedir. Güvenli hız, eğim sınıflandırmasından elde edilen açığa göre otomatik olarak hesaplanmakta ve kullanıcının tehlikeli rampaya doğru hareket etmesini veya yetersiz hız nedeniyle geri dönmesini önlemek için eğimli sürüş sırasında gerçek zamanlı olarak revize edilmektedir. Yapılan deneylerde tasarlanan sistemin rampa algılamasız denetleyiciden % 23 daha hızlı bir şekilde ve daha az enerji harcayarak sürüşü tamamladığı belirtilmiştir.

Payne ve Sanchez (2018) tarafından yapılan çalışmada Unity isimli üç boyutlu oyun motoru kullanılarak tekerlekli sandalye kullanıcıları için sanal bir ortam oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sanal ortamda iki farklı kontrol sisteminin kıyaslandığı ve tekerlekli sandalye kullanımına yönelik dış dünyadakine benzer testlerin yapılabileceği vurgulanmıştır.

Azad ve ark. (2018) tarafından kaleme alınan çalışmada akülü tekerlekli sandalye uygulamaları için 250 W'lık bir akıllı otonom kablosuz şarj sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Yapılan testlerde sabit akım-sabit gerilim modundaki akü şarj işleminin yüksek bir şarj verimliliğine sahip olduğu vurgulanmıştır.

Asyraf ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada tekerlekli sandalyelerde tekerlekle tümleşik olan BLDC motora ait parametrelerin tahmini ve kalibrasyon yöntemi önerilmiştir. Deney düzeneğinde BLDC motor sürücüsü, 36 V akü, arduino

mikrodenetleyici, hız sensörü ve ilgili ölçü aletleri kullanılmıştır. Parametre tahmininde ise eğri uydurma yöntemi ve Matlab'ın parametre tahmin etme aracı kullanılmıştır.

Cruz ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada joystick kullanamayan engelli araç kullanıcıları için göz hareketlerini ve beyin sinyallerini kullanan bir sürüş sistemi önerilmiştir.

Dey ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada tekerlekli sandalyenin kafa hareketlerine göre beş farklı yöne hareket ettirilmesi tanıtılmıştır. Bu işlem için akselerometre sensörü kullanılmıştır. Güneş paneli, emniyet kemeri sensörü ve ultrasonik sensör kullanımı çalışmada öne çıkan diğer ayrıntılardır.

Gomes ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, kullanıcının kafasına yerleştirilmiş atalet sensörlerine dayanan bir benmerkezci arayüz önerilmiştir. Kullanıcının doğal duruşuna göre kafanın o anki konumunun başlangıç pozisyonu olmasına izin veren bu arayüz, kafa hareketlerine göre tekerlekli sandalyeyi yönlendirmek için sürekli yön ve hız komutları sağlamaktadır. Çalışmaya dair daha sağlıklı bir doğrulama yapabilmek için deneylerin motor bozukluğu olan insanlarla yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Joshi ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada sesle kontrol edilen ve engellerden kaçabilen bir akıllı tekerlekli sandalye geliştirilmiştir. Aracın hızını kontrol etmek için oluşturulan kontrol ünitesinde ATmega328, GSM modülü, ultrasonik sensör, kızılötesi sensör ve sıcaklık sensörü kullanılmıştır.

Nabil ve ark. (2019) tarafından kaleme alınan çalışmada üç tekerlekli tek kişilik bir elektrikli aracın tasarımı ve üretimi anlatılmıştır. Tasarımı nedeniyle engelli kişilerin kullanımına uygun olmayan bu araçta 48 V'luk lityum iyon pil ve 1000 W'lık bir DC motor kullanılmıştır. Maksimum verimin % 70 olduğu vurgulanan çalışmada aracın enerji tüketiminin 100 km/kWh olduğu belirtilmiştir.

Sankardoss ve Geethanjali (2019) tarafından yapılan çalışmada, PMDC motor kullanılarak sürülen akülü tekerlekli sandalye için yön ve hız kontrol cihazı tasarlanmış ve gerçekleştirmiştir. PMDC motor kontrolünün üç farklı denetleyici ile simüle edilip gerçekleştirildiği bu çalışmada yapay sinir ağının ve bulanık mantık denetleyicisinin performansı incelenmiş ve PID denetleyicisi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda bulanık mantık denetleyicisinin PID ve sinir ağı denetleyicisine kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği vurgulanmıştır.

### 3. AKÜLÜ ENGELLİ ARAÇLARI

Doğumdan önceki, doğum esnasında ya da doğumdan sonraki dönemde herhangi bir nedenle iskelet, kas veya sinir sisteminde meydana gelen bozulmalara bağlı olarak, fiziksel yeteneklerini belirli derecelerde kaybeden, toplumsal hayata uyum sağlamakta ve günlük gereksinimlerini karşılamakta zorluk çeken, bu nedenlerden dolayı da korunma, rehabilitasyon ve bakıma ihtiyaç duyan insanlara bedensel (ortopedik) engelli insanlar denir.

Bedensel engelli veya yürümesi sakıncalı olan insanların günlük aktivitelerini yerine getirmede onların en büyük yardımcıları tekerlekli sandalyelerdir. Tekerlekli sandalyeler hareket enerjisinin kaynağına göre elle hareket ettirilen, akülü ve hibrit olmak üzere 3 temel sınıfa ayrılabilir. Elle hareket ettirilen tekerlekli sandalyeler bacakları sakat ancak elleri sağlam olan bedensel engelliler tarafından kullanılırlar. Bu tür bedensel engelli insanların akülü araç kullanmaları doktorlar tarafından pek önerilmez. Nedeni ise üst kas grubunun çalışmasını sağlayarak kas erimesine engel olmaktır. Sportif faaliyetlerde kullanılmak üzere veya katlanabilir olarak tasarlanan türleri de bulunan elle hareket ettirilen tekerlekli sandalyenin genel amaçlı kullanım için üretilen bir modeli Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Genel amaçlı kullanıma uygun olarak üretilmiş elle hareket ettirilen tekerlekli sandalye.

#### 3.1. Akülü Engelli Araçları Ve Türleri

Elleriyle tekerlekli sandalyeye hareket ve yön veremeyecek düzeyde bedensel engele sahip olan ya da uzak mesafelere gitme ihtiyacı duyan bedensel engelli insanlar



akülü engelli aracı kullanmaktadırlar. Bu tür tekerlekli sandalyeler hareket enerjini aküden beslenen elektrik motorundan/motorlarından alırlar.

Maddi durumları el verdiği ölçüde akülü engelli aracı kullanmak isteyen engelli insanlar için günümüzde çok geniş bir yelpazede akülü engelli aracı üretilmektedir. Üretilen bu modellerden bazıları aşağıdaki başlıklar altında toplanmıştır.

1. Standart akülü tekerlekli sandalye
2. Akülü scooter
3. Ayağa kaldıran akülü tekerlekli sandalye
4. Asansörlü tip akülü tekerlekli sandalye
5. Merdivenden çıkabilen/inebilen akülü tekerlekli sandalye
6. Hibrit akülü tekerlekli sandalye

### 3.1.1 Standart akülü tekerlekli sandalye

En yaygın kullanılan akülü engelli aracı türüdür. Akülü engelli aracı denildiğinde ilk bu modeller akla gelir. Bu nedenle günlük hayatta bu modellerden bahsedebilirken standart ifadesi kullanılmaz. İç ve dış ortamlarda kullanıma uygun olarak üretilen bu araçlarda araca hareket vermek için iki adet motor kullanılır. Bu tür bir akülü engelli aracı Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Standart akülü tekerlekli sandalye.

Bu engelli araçlarında motorun ön tekerleğe bağlandığı modeller de mevcuttur. Önden çekişli olarak da nitelendirilebilecek bu tür bir akülü engelli aracı Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 Önden çekişli akülü tekerlekli sandalye.

Standart akülü tekerlekli sandalyelerde aracın yön kontrolü motorlardan birinin diğerine göre daha hızlı/yavaş dönmesi sağlanarak yapılır. Örneğin araç tam sola dönecekse sadece sağ tekerlek motoru enerjilenir. Şayet sağa tam dönüş yapılacaksa bu defa da sadece sol tekerlek motoru enerjilenir. Araç hareket halindeyken sağa veya sola hafif dönüş yapılacaksa bu durumda motorlardan biri diğerine göre daha yavaş döndürülür. Yani hangi yöne dönecekse o taraftaki tekerleğe ait motorun hızı düşürülür.

### 3.1.2 Akülü scooter (Elektrikli mobility scooter)

Daha çok dış ortamlarda kullanıma uygun olarak tasarlanan bu engelli araçlarında dış ortamlarda kullanım sırasında ihtiyaç duyulacak far, sinyal lambaları ve dikiz aynaları gibi detaylar bulunmaktadır. Standart akülü tekerlekli sandalyeden farklı olarak bir tane ancak daha güçlü motor kullanılır. 3 ve 4 tekerlekli modelleri bulunan bu araçlarda araca gidon/direksiyon yardımıyla yön verilir. Dolayısıyla kontrolü ve kullanımı standart akülü tekerlekli sandalyeden daha kolaydır. Şekil 3.4’de üç ve dört tekerlekli akülü scooter modelleri görülmektedir.



Şekil 3.4 Üç ve dört tekerlekli akülü scooter modelleri.

### 3.1.3 Ayağa kaldıran akülü tekerlekli sandalye

Bedensel engelli insanlar günlük yaşantılarında sayısız problemle karşılaşır. Bu problemlerden biri de yüksekteki bir noktaya ulaşmaktır. Örneğin normal insanlar için evdeki bir dolaba ulaşmak sıradan bir eylemken, onlar için büyük bir problemdir. Veya bir banko ya da gişede işlem yaptırmak istediklerinde ciddi zorluklar yaşamaktadırlar. Karşılaşılan bu tür problemlerin üstesinden gelebilmeleri için kullanıcıyı ayağa kaldıran akülü tekerlekli sandalyeler üretilmiştir. Bu tür araçlarda kullanıcının dik duruş pozisyonundaki güvenliği farklı noktalarda bulunan kemer sistemleri sayesinde sağlanmaktadır. Şekil 3.5'te bu tür bir engelli aracı görülmektedir.



Şekil 3.5 Kullanıcısını ayağa kaldırabilen akülü tekerlekli sandalye modeli.

### 3.1.4 Asansörlü tip akülü tekerlekli sandalye

Bir önceki engelli aracına benzer bir yapıya sahip olan bu model, ayaklarının üzerine basamayacak şekilde bedensel engeli olan kullanıcılar için idealdir. Kullanıcısını bir metreden daha fazla yükseltebilen bu modellerden birisi Şekil 3.6'da görülmekte olup, bu araç kullanıcısını 108 cm yükseltebilmektedir.



Şekil 3.6 Asansörlü tip akülü tekerlekli sandalye.

### 3.1.5 Merdivenden çıkabilen/inebilen akülü tekerlekli sandalye

Bedensel engelli insanların karşılaştıkları en büyük problemlerden birisi de merdivenler ve yüksek kaldırımlardır. Günümüzde her ne kadar bina girişlerinde tekerlekli sandalyeler için rampalar tasarlanıyor olsa da birçok rampanın kullanıma uygun olmadığı bilinen bir gerçektir. Benzer şekilde tekerlekli sandalyesiyle yüksek bir kaldırımda ilerleyen bir bedensel engelinin, kaldırımın herhangi bir noktasından inebilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Kullanıcıların bu problemlerini çözmeye yönelik yapılan akademik çalışmalar (Lawn ve Ishimatsu 2003; Quaglia ve ark. 2009; Tao ve ark. 2016; Yu ve ark. 2010) netice vermiş ve artık merdivenden inip çıkabilen akülü engelli araçları ticari olarak üretilebilir hale gelmiştir. Bu tür bir tasarım Şekil 3.7'de görülmektedir.

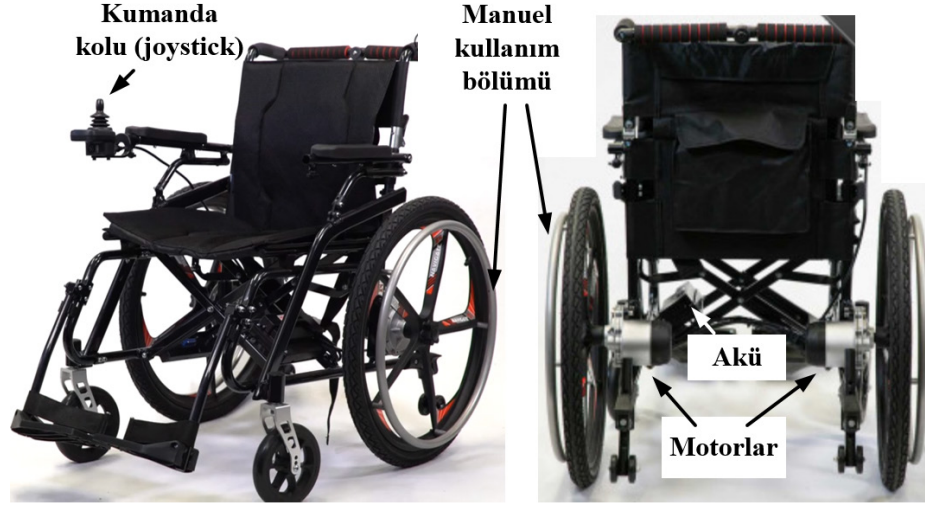


**Şekil 3.7** Merdiven inip çıkabilen akülü tekerlekli sandalye.

Normal kullanımda standart bir akülü tekerlekli sandalyeden farkı olmayan bu model, merdiven başına geldiğinde altındaki paleti alçaltarak aracın palet üzerinde kalmasını sağlar. Araç merdivenden inerken veya çıkarken merdivenin o anki eğimine göre koltuğunu her zaman yatay pozisyonda tutmaya devam etmektedir. Bu işlem, koltuk altında bulunan bir piston yardımıyla sağlanmaktadır. Merdivenden inerken ileri doğru, merdivenden çıkarken geri doğru hareket etmektedir.

### 3.1.6 Hibrit akülü tekerlekli sandalye

Hem normal hem de akülü tekerlekli sandalyeyi bünyesinde barındıran bir modeldir. Olabildiğince hafif tasarlanırlar. Standart bir akülü tekerlekli sandalyede olduğu gibi bunda da elektrik motoru ve akü vardır. Ancak bu modelin onlardan farkı, sürekli akülü tekerlekli sandalye modunda kullanıma uygun olmamasıdır. Çünkü araçta kullanılan akü, standart akülü tekerlekli sandalyedekilere kıyasla oldukça küçüktür. Nedeni ise manuel kullanım sırasında oldukça hafif olmasını sağlamaktır. Dolayısıyla aküleri diğerlerine kıyasla daha kısa mesafede deşarj olur. Bu modellerin artısı, çok yorulan ya da rampa çıkmak zorunda kalan kullanıcıya kolaylık sağlamasıdır. Şekil 3.8’de hibrit bir akülü tekerlekli sandalye görülmektedir.



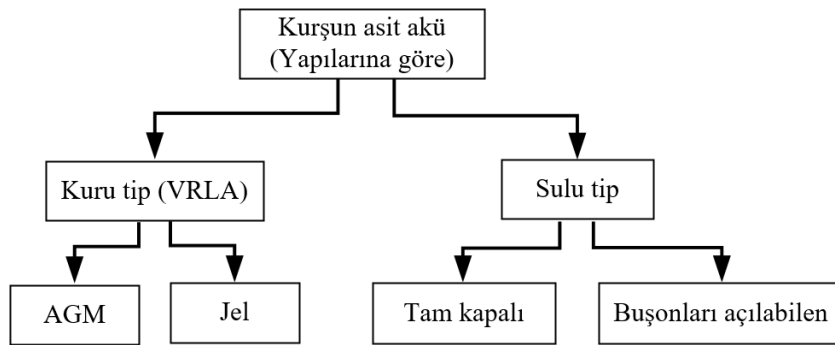
Şekil 3.8 Hibrit akülü tekerlekli sandalye.

### 3.2 Akülü Engelli Araçlarının Bileşenleri

Akülü engelli araçlarının temel bileşenleri akü, motor, redüktör, kumanda kolu ve sürücü olup bunlar ayrı ayrı ele alınacaktır.

#### 3.2.1 Akü

Akülü engelli aracının kalbi olan akü, elektrik enerjisini şarj yoluyla kimyasal enerji olarak belli bir süreliğine depo eden, gerektiğinde de bu enerjiyi deşarj yoluyla elektrik enerjisi olarak sağlayan bir ayardır. Kullanılan malzemenin cinslerine göre kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-demir, lityum-iyon gibi çeşitlere ayrılan akülerin günümüzde en yaygın kullanılan türü kurşun-asit akülerdir. Bunların yapılarına göre sınıflandırılması Şekil 3.9'da verilmiştir.

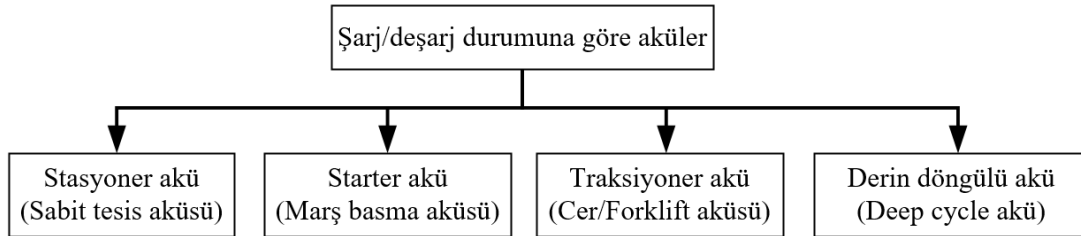


Şekil 3.9 Kurşun-asit akülerin yapılarına göre sınıflandırılması.

Kurşun-asit akülerin en yaygın kullanılabildiği sulu tipler olup fosil yakıtlı araçlarda kullanılan aküler bunlardır. Tam kapalı olanlara su eklenemediği için tam kapalı olanların şarj düzenekleri iyi olan araçlarda kullanılması daha uygundur (<https://www.mutlu.com.tr>, erişim 5.5.2019).

Kuru tip olarak da bilinen sübat ayarlı kurşun asit (Valve Regulated Lead Acid-VRLA) akülerin içyapıları ve teknolojileri sulu olanlardan farklıdır. VRLA aküler, akü içerisindeki elektroliti sabitleme yöntemindeki farklılığa göre AGM (Absorbed Glass Mat) ve jel olarak iki gruba ayrılır. AGM aküler elektroliti seperatörlere emdirilmiş olan türdür. Jel aküler ise içerisinde jel kıvamında elektrolit bulunduran aküler olup sıcaklık ve titreşim gibi ağır çevresel koşullara dayanıklıdırlar. Bakım da istemezler. Bu yüzden denizcilik sektöründe ve yenilenebilir enerji sistemlerinde özellikle tercih edilirler. Jel akü hemen şarj edilmese bile derin deşarjdan tamamen geri döndürülebilir. Günlük çevrimsel kullanım için ideal olan bu aküler uzun deşarjlarda mükemmel performans gösterirler (<http://www.akunedir.com>, erişim 5.5.2019). Bu nedenle engelli araçlarında daha çok jel aküler tercih edilir.

Aküler şarj-deşarj durumlarına göre Şekil 3.10'daki gibi sınıflandırılırlar.



Şekil 3.10 Akülerin şarj/deşarj durumuna göre sınıflandırılması.

Stasyonery aküler sabit tesislerde kullanılan ve anlık yüksek akım yerine uzun süreli sabit akım çekilerek boşaltılan sulu tip akülerdir. Kesintisiz güç kaynakları, telekom ve acil aydınlatma sistemlerinde bu tip aküler kullanılmaktadır.

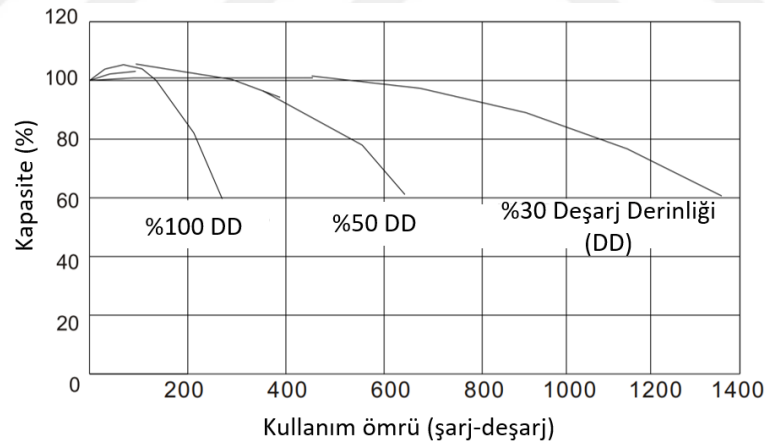
Starter aküler marş basma aküsü, yol verme aküsü veya başlatma aküsü olarak da isimlendirilirler. Anlık olarak ve kısa süreli yüksek akımlar verebilen bu aküler, sürekli sabit akım çekmeye uygun değildirler. Yani stasyonery akülerin yerine kullanılamazlar. Fosil yakıtlı araçlarda ve jeneratörlerde start amaçlı olarak kullanılmaktadırlar.

Traksiyonyer aküler genelde 24 V, 40 V veya 80 V oluşturulacak şekilde bir kutu içerisine 2 V'luk hücreler halinde konulan sulu tip akülerdir. Forklift aküsü olarak da

bilinirler. Özellikle forklift ve vinç gibi yük kaldırma, indirme ve taşıma araçlarında kullanılırlar.

Deep cycle (derin döngülü) aküler nominal kapasitelerinin % 20'sine kadar deşarj olmalarına rağmen kapasite kaybına uğramayan akülerdir. Genellikle marine uygulamalarında ve yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılırlar (<http://www.akunedir.com>, erişim 5.5.2019). Derin deşarj özellikleri nedeniyle aracın tek şarjla daha uzun yol kat etmesini sağlarlar.

Ancak jel aküler her ne kadar derin deşarja müsaade etseler de deşarj düzeylerinin akü kullanım ömrü üzerinde negatif bir etkisi vardır. Bu durum, akü üreticilerinin kataloglarından kolayca gözlemlenebilir. Örneğin SB Battery isimli firma tarafından SPG33-12 ürün koduyla üretilen 12V-33Ah'lik aküye ait Şekil 3.11'deki kullanım ömrü grafiği incelendiğinde, deşarj derinliği arttıkça akü kullanım ömrünün azaldığı çok net bir şekilde görülebilmektedir. Bu grafiğe göre akü % 30'luk bir deşarj derinliğiyle kullanılırsa akünün % 60 kapasiteye düşmesi için ortalama 1300 kez şarj-deşarj edilmesi gerekir. Ancak sürekli % 100 deşarj derinliğinde kullanılırsa yaklaşık 300 kullanım sonunda kapasite % 60'a düşmektedir.



Şekil 3.11 SPG33-12 kodlu akünün deşarj derinliği ve kullanım ömrü arasındaki ilişki.

Engelli araçlarında kullanılan motorlar genelde 24 V'luk DC gerilime ihtiyaç duyarlar. Bu gerilim 24 V'luk tek bir akü ile sağlanabileceği gibi 2 adet 12 V'luk akünün seri bağlanmasıyla da elde edilebilmektedir. Genelde başvurulan yöntem de budur. Ancak seri bağlanacak akülerin amper-saat (Ah) değerlerinin eşit olması gerektiği unutulmamalıdır.

Bilindiği gibi aküler farklı Ah değerlerinde üretilirler. Düşük ve yüksek Ah'li aküler arasındaki fark, şarj ve deşarj süreleridir. Engelli araçlarından beklenen şey, tek



şarjla olabildiğince uzun mesafe kat edebilmesidir. Bu nedenle genelde yüksek Ah değerlerine sahip aküler tercih edilmektedir. Ancak yüksek Ah'li akülerin hem daha pahalı hem de daha büyük ve ağır oldukları unutulmamalıdır.

### 3.2.2 Motor

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip modern kalıcı mıknatısların mevcudiyeti, 1950'lerde kalıcı mıknatıs uyarımlı DC makinelerin gelişmesini sağlamıştır. Elektrik enerjisine ihtiyaç duyan elektromanyetik kutupların kalıcı mıknatıslarla yer değiştirmesi, kompakt DC makinelerin üretilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu nedenle günümüz akülü engelli araçlarında yaygın olarak PMDC motorlar kullanılmaktadır. İyi bir hız-moment karakteristiğine sahip olan bu motorlarda fırça ve kollektör bulunduğu arızalanma olasılıkları yüksektir ve periyodik bakım gerektirirler. Ancak kontrolleri oldukça kolay olduğundan ve faydalı frenlemeye imkân sağladıklarından bu araçlarda en çok tercih edilen motor türüdür. Motorun hızı PWM sinyalleri kullanılarak kolayca kontrol edilebilir. Engelli aracın türüne göre 240 W, 300 W, 350 W, 400 W, 450 W, 750 W ve 1500 W gibi çok farklı güçlerde üretilirler. Standart akülü engelli araçlarında düşük güçlü 2 adet motor kullanılırken şaft sistemine sahip olanlarda daha yüksek güçlü tek motor kullanılır.

Akülü engelli araçta kullanılan motorlar ortalama % 75 verimle çalışmalıdırlar (Akpınar 2007). Bu amaçla redüktörü devre dışı bırakan ve tekerlekle tümleşik olan kalıcı mıknatıslı alternatif akım motorları tasarlanmıştır. Hub (tekerlek içi) motor olarak adlandırılan bu yapıdaki motorlar aslında fırçasız doğru akım (brushless direct current-BLDC) motoru ve PM senkron motorlardır. Bilindiği gibi bu motorlar, rotordaki geleneksel elektromanyetik alan kutupları kalıcı mıknatıs kutuplarla değiştirilerek fırça ve bileziklerin ortadan kaldırıldığı senkron motorlardır.

Akülü engelli araçlarında kullanıma uygun olarak farklı boyut ve şekillerde tasarlanmış hub motorlar bulunmaktadır. Hub motorların iç yapısı ve farklı tekerleklere uygulanmış halleri Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 Hub motorların iç yapısı ve farklı tekerleklere uygulanmış hâli.

### 3.2.3 Redüktör

Engelli aracının ihtiyaç duyduğu yüksek torku klasik bir PMDC motorla üretip doğrudan tekerleklere aktarmak için motorun oldukça yüksek güçte üretilmesi gerekir. Bu da maliyet, boyut, ağırlık ve motorun çekeceği akım bakımından bir dezavantajdır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için redüktörler kullanılır. Birbirini çeviren dişli sistemlerinden oluşan ve bu sayede devir-tork oranını değiştiren redüktörler, girişindeki mekanik enerjiyi oldukça düşük bir kayıpla çıkışa aktarırlar. Böylece kullanıcıların yüksek tork veya yüksek hız talepleri sağlanmış olur.

Sahip oldukları dişli sistemine göre helis dişli, sonsuz dişli, konik dişli ve planet dişli olarak sınıflandırılan redüktörler gövde yapılarına, mil bağlantılarına ve kullanım alanlarına göre de sınıflandırılabilir.

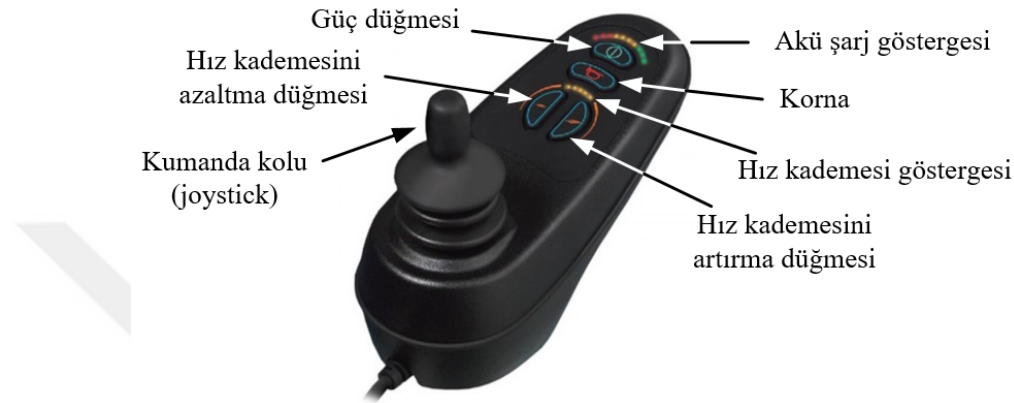
Engelli araçlarında kullanılan redüktörler ihtiyaç duyulan yüksek torku motorun devir sayısını düşürerek yükseltirler. Dolayısıyla 13:1, 17:1, 21:1, 28:1, 32:1, 63:1, 96:1 gibi çok farklı dişli oranlarında üretilirler. Şekil 3.13’de engelli araçlarında kullanılmak üzere tasarlanmış ve PMDC motora monte edilmiş farklı redüktörler görülmektedir.



Şekil 3.13 Engelli araçlarında kullanılmak üzere tasarlanmış ve PMDC motora monte edilmiş farklı redüktörler.

### 3.2.4 Kontrol paneli ve kumanda kolu (Joystick)

Standart bir akülü engelli araçta açma-kapama düğmesi, hız kademesi ayarı, kumanda kolu, akü şarj durumu göstergesi ve korna fonksiyonlarını üzerinde barındıran bölüme kontrol paneli denir. Klasik akülü engelli araçlarında hız ve yön kontrolü için Şekil 3.14'dekine benzer kontrol panelleri kullanılmaktadır.



Şekil 3.14 Standart bir akülü engelli araçta kullanılan örnek bir kontrol paneli.

Engelli araçlarındaki hız ve yön değişimleri için gereken komutlar kumanda kolu üzerinden verilmektedir. Fakat günümüzde engelli bireye bağlı olarak sesle (Joshi ve ark. 2019), gözle (Cruz ve ark. 2019), baş hareketleriyle (Deniz ve ark. 2017; Dey ve ark. 2019; Gomes ve ark. 2019; Kondori ve ark. 2014) veya görüntü işleme yoluyla (Sato ve ark. 2018) da engelli araçları kontrol edilebilmektedir. Endüktif ya da Hall sensör barındıran kumanda kolları bulunmakla birlikte en yaygın kullanılan tür, gerilim bölücü mantığıyla çalışan direnç tipi kumanda kollarıdır. Ancak direnç tipi kumanda kollarının belirli periyotlarla kalibre edilmesi gerekir.

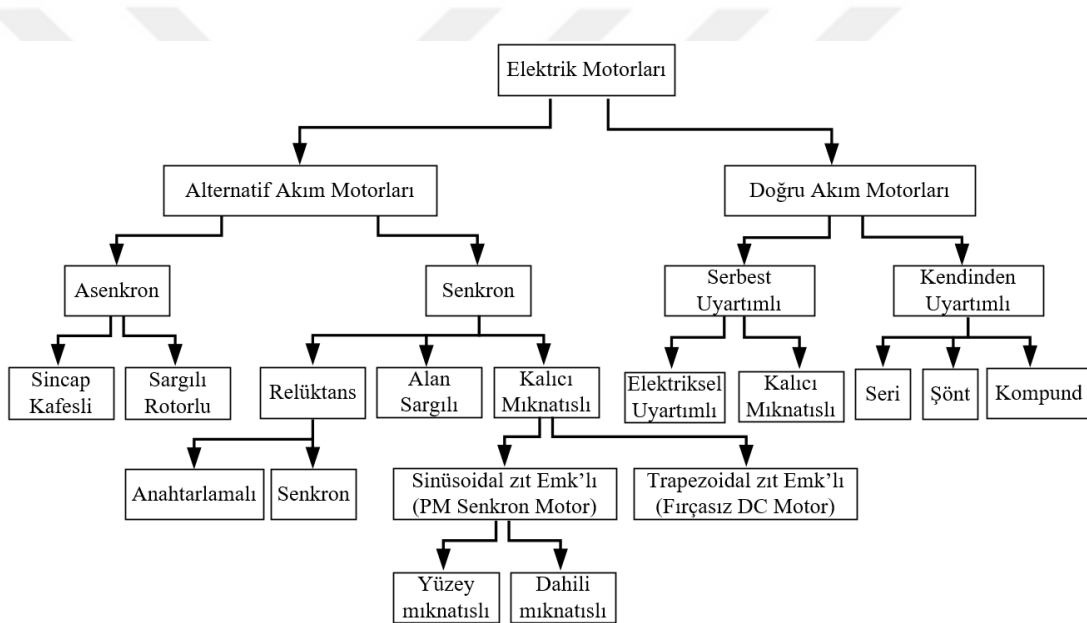
### 3.2.5 Sürücü

Akülü engelli araçlarında aracın ileri/geri hareketini sağlayabilmek ve hızını değiştirebilmek için kullanılan cihaza *sürücü* denir. Sürücüler; motorlarda hız, yön ve tork gibi büyüklükleri kontrol etmek için mikrodenetleyici, yarı iletken anahtarlar ve elektronik devre elemanları kullanılarak tasarlanmış devre kartları olup hız ve yön değişimleri için gereken komutları aracın kumanda kolundan alırlar.

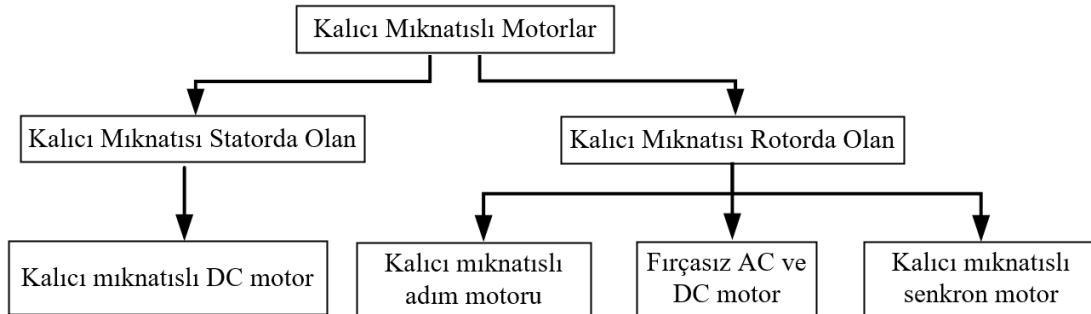
Her motorun kendine özgü bir sürücüsü vardır. Akülü engelli araçlarında kullanılmakta olan elektrik motorları ve bunlara ait sürücüler aşağıda detaylı olarak anlatılacaktır.

### 3.3 Akülü Engelli Araçlarında Kullanılan Elektrik Motorları Ve Sürücüleri

Elektrik motorlarının besleme gerilimlerinin türü, faz sayısı veya mıknatıslı olup olmamaları gibi çok farklı açılardan sınıflandırmak mümkündür. Besleme gerilimlerine göre yapılan genel bir sınıflandırma Şekil 3.15.a'da, kalıcı mıknatıs barındıran elektrik motorlarının mıknatısın bulunduğu yere göre sınıflandırılması ise Şekil 3.15.b'de verilmiştir.



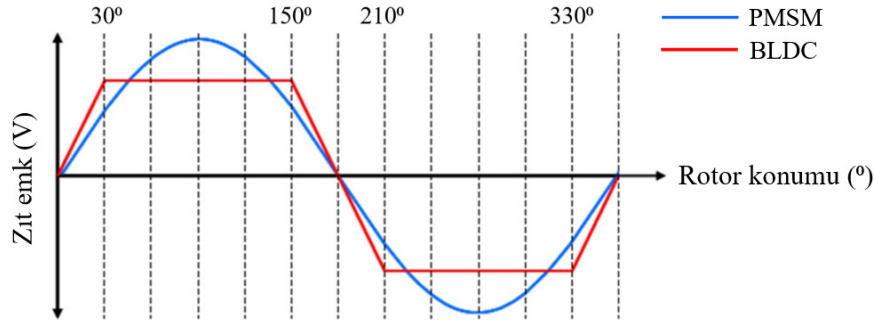
(a)



(b)

Şekil 3.15 Elektrik motorlarının sınıflandırılması  
(a) Besleme gerilimlerine göre (Nam 2019) (b) Kalıcı mıknatısın bulunduğu yere göre.

Kalıcı mıknatıslı alternatif akım motorları, rotorlarındaki kalıcı mıknatısların stator sargılarında endükledikleri zıt emk dalga şekillerine göre isimlendirilirler. Zıt emk dalga şekli Şekil 3.16'daki gibi sinüzoidal olanlara PM senkron motor, trapezoidal olanlara ise BLDC motor denir.



Şekil 3.16 Kalıcı mıknatıslı AC motorların bir faz sargısında indüklenen emk.

PM senkron motor sürücüsü, motoru sinüzoidal akım veya gerilimle beslemek için rotor konum geri beslemesini ve PWM'i kullanır. Bu sayede çok küçük bir dalgalanmaya sahip sabit tork üretilir. BLDC motorun sürücü sistemi de rotor konum geri beslemesi üzerine kuruludur. Bu geri besleme PM senkron motordaki gibi sürekli olmayıp faz akımlarının komütasyonu için tercihen elektriksel olarak her 60 derecelik sabitlenmiş noktalarda elde edilir. BLDC motor, dikdörtgen biçimli akımların motoru beslemesine gereksinim duyar. Alternatif olarak motorun kapasitesini aşmadan akımları belli bir sınır değerinde tutarak her 120 derecede bir motora gerilim uygulanabilir. Çünkü faz akımları zıt emk'nın sabit bölümü ile eşzamanlı uyartılarak sabit tork üretilir (Toliyat ve Campbell 2004).

BLDC motorlarda hata oranı daha yüksek olan daha basit rotor konum sensörleri kullanılabilir. Ancak PM senkron motorlar daha hassas konum bilgisine ihtiyaç duyarlar. Çünkü faz sargılarına uygulanacak akımın dalga şeklinin hassas olarak izlenmesi gerekir. Kontrol işlevinin basitliği nedeniyle ilk olarak fırçasız DC motorlar üretilmiştir. Ancak torkun çok dalgalı olması, bu motorların yüksek performanslı hareket kontrol uygulamalarında kullanılmasını kısıtlamıştır. Vektör kontrol yöntemiyle alternatif akım motorlarından yüksek performans elde edildikten sonra, sinüzoidal motorlar geliştirilmiştir.

Günümüz taşıtlarında silecek, klima, cam, dikiz aynası, direksiyon, devir daim, far ayarı ve marş motoru gibi onlarca elektrik motoru kullanılmaktadır. Fosil yakıtların

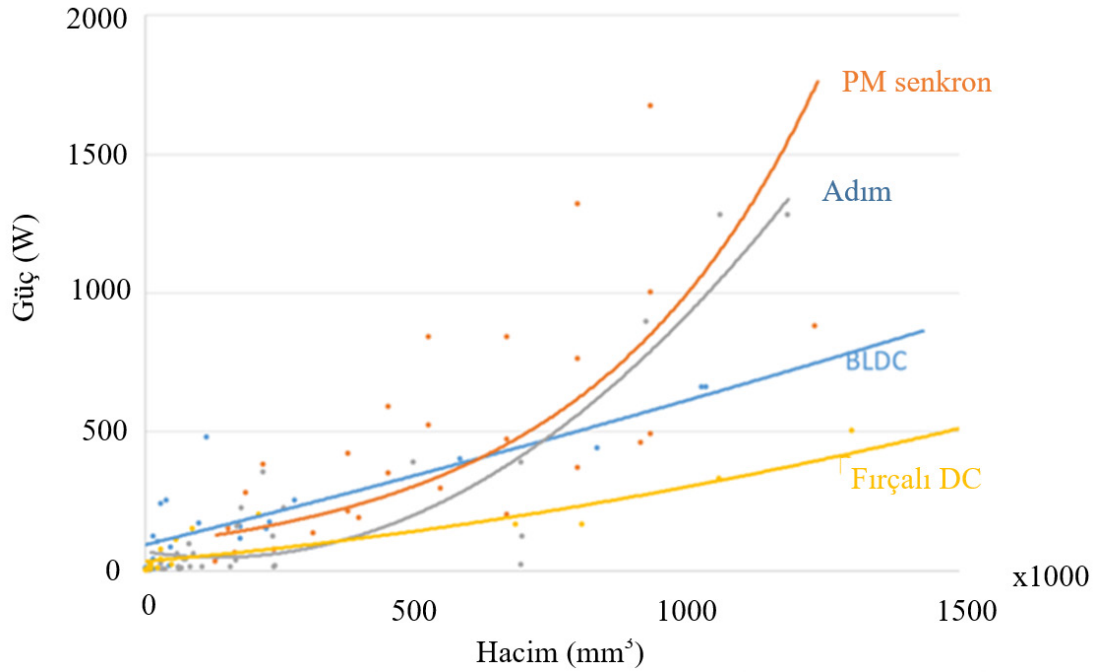
giderek azalması ve her geçen gün pahalalanmasıyla birlikte yakıt tüketimini azaltmak için araçlarda daha verimli elektrik motorları kullanılmaya başlanmıştır. Hatta bir adım daha ileriye gidilerek aracın ihtiyaç duyduğu mekanik enerji kısmı ya da tam olarak elektrik motorundan sağlanarak fosil yakıtta olan gereksinim ortadan kaldırılmış ve böylece hibrit ve elektrikli araçlar üretilmeye başlanmıştır. Artık günümüzde seri üretimleri yapılan elektrikli araçlarda kullanılmakta olan elektrik motorları ve özellikleri Tablo 3.1'deki gibi özetlenebilir.

**Tablo 3.1** Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının kıyaslanması (Xia 2012).

<b>Motor türü</b>	<b>Fırçalı DC motor</b>	<b>Asenkron motor</b>	<b>Fırçasız DC motor</b>	<b>Anahtarlama relüktans motor</b>
<b>Performans indeksi</b>				
Güç yoğunluğu	Düşük	Orta	Yüksek	Çok yüksek
En yüksek verim (%)	<90	90-95	95-97	<90
Yük verimi (%)	80-87	90-92	85-97	78-86
Kontrol edilebilirlik	Basit	Karmaşık	Alan zayıflatması zor	Karmaşık
Güvenilirlik	Normal	İyi	Mükemmel	İyi
Isı dağılımı	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Boyut & ağırlık	Büyük, ağır	Normal, normal	Küçük, hafif	Küçük, hafif
Yüksek hız performansı	Kötü	Mükemmel	İyi	Mükemmel
Yapı	Biraz kötü	Daha iyi	Biraz daha iyi	Mükemmel
Motor maliyeti (\$/kW)	10	8-10	10-15	6-10
Denetleyici maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Normal

Tablo 3.1'de verilen motorlar her ne kadar elektrikli otomobillerde kullanılanlar olarak verilse de bunlardan fırçalı (brushed) DC ve BLDC motorlar akülü engelli araçlarında da kullanılmaktadır. Tablo 3.1 incelendiğinde BLDC motorların maliyet ve kontrol edilebilirlik dışında fırçalı DC motorlardan daha üstün özelliklere sahip olduğu göze çarpmaktadır.

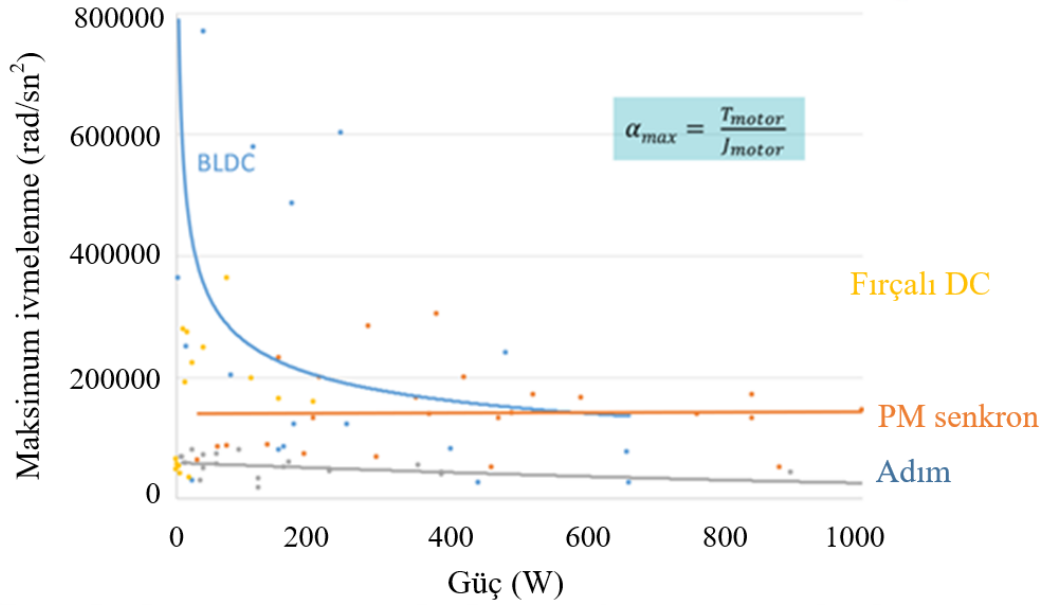
Bu iki motor türüne PM senkron motoru da ekleyerek kıyaslamayı genişletmek, tezin deneysel çalışma kısmında kullanılacak olan PM senkron motorun tercih edilme nedenini açıkça ortaya koyacaktır. Derammelaere ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada yukarıda sözü edilen motorlara adım (stepper) motoru da eklenerek kapsamlı bir kıyaslama yapılmıştır. Yapılan kıyaslamada yaklaşık 100 motora ait veriler dikkate alınmıştır. Elde edilen veriler ışığında çizdirilen güç yoğunluğu grafiği Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.17 Fırçalı DC, BLDC, PM senkron ve adım motorlarında anma gücünün motor hacmine göre değişimi (Derammelaere ve ark. 2016).

Şekil 3.17 incelendiğinde motor gücü yaklaşık 400 W'ın üstüne çıktığında en yüksek güç yoğunluğuna sahip olan motorun PM senkron motor olduğu görülmektedir. Elektrikli taşıtlarda önemli bir kriter olan yüksek güç yoğunluğu (Zeraoulia ve ark. 2006; Zhu ve Howe 2007) küçük ve kompakt bir yapıya sahip olmak zorunda olan akülü engelli araçlarında da önemli bir kriter olmaktadır. Bu nedenle tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılacak akülü engelli araçta fırçalı DC motor yerine PM senkron motor kullanmak, daha doğru bir tercih olarak görülmektedir.

İlgili çalışmada maksimum motor torku rotor ataletine bölünerek maksimum motor ivmesi bulunmuş ve ardından anma gücüne karşı grafiği çizdirilmiştir. Söz konusu motorlara ait Şekil 3.18'deki güce göre ivmelenme grafikleri incelendiğinde, yaklaşık 600 W'ın üzerindeki güçlerde en iyi ivmelenmenin PM senkron motorda olduğu gözle çarpılmaktadır. PM senkron motorun güç yoğunluğundaki üstünlüğü, motorların ivmelenmesinde de geçerlidir. Dolayısıyla dinamik uygulamalar için önemli bir parametre olan maksimum ivmelenme dikkate alındığında da fırçalı DC veya BLDC yerine PM senkron motor kullanmak daha doğru bir yaklaşımdır. İlgili motorların farklı açılardan yapılan karşılaştırmaları Tablo 3.2'de özetlenmiştir.



Şekil 3.18 Fırçalı DC, BLDC, PM senkron ve adım motorlarında maksimum ivmelenmenin motor gücüne göre değişimi (Derammelaere ve ark. 2016).

Tablo 3.2 Fırçalı DC, BLDC, PM senkron ve adım motorlarının farklı kriterlere göre performansları (1: en iyi, 4: en kötü).

Karşılaştırma konuları	Fırçalı DC	BLDC	PM senkron motor	Step
Anma hızı	2-3	1	2-3	4
Anma torku	4	3	2	1
Güç yoğunluğu	4	3	1	2
Maksimum ivmelenme	-	1	2	4
Aşırı yük kapasitesi	1	2-3	2-3	4
Fiyat	2	3	4	1

Tablo 3.2'deki karşılaştırmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Yüksek anma hızı gerektiren düşük güçlü uygulamalarda BLDC en uygundur.
- Yüksek torklar için adım motorları en iyi seçenektir.
- Güç yoğunluğu söz konusu olduğunda, bir PM senkron motor en uygun olanıdır.
- Maksimum ivmelenme BLDC makinelerde elde edilmektedir.
- Aşırı yük kapasitesi en iyi olan fırçalı DC makinelerdir.
- Step motorlar en ekonomik çözümdür

Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılacak akülü engelli aracı hem PMDC motorla hem de PM senkron motorla sürülerek testler yapılacaktır. Dolayısıyla bu iki



motor türü hakkında detaylı bilgi verilecektir. Ancak test aracının üzerindeki motor PMDC olduğundan öncelikle bu motorlar incelenecektir.

### 3.3.2 PMDC motor

PMDC motor, kutup sargısı yerine kalıcı mıknatıs barındıran DC motor türüdür. Dolayısıyla hava aralığı akısı alan sargısı yerine kalıcı mıknatıstan sağlanmaktadır.

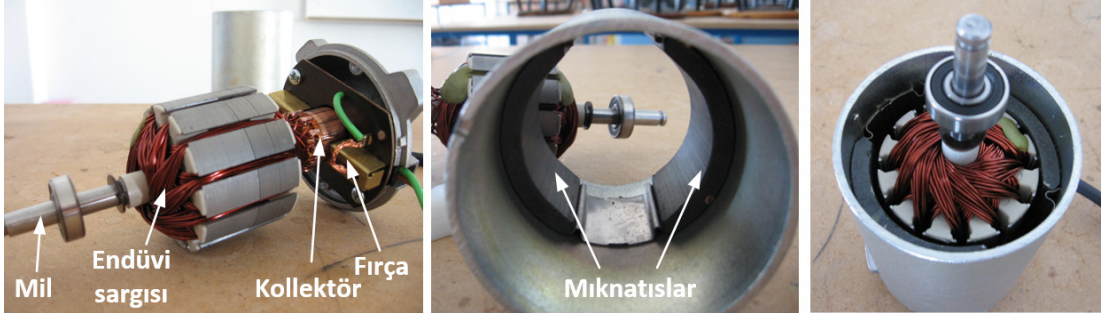
DC güç kaynağına sahip sistem ve cihazlarda yaygın olarak kullanılan bu motorlar faydalı frenlemeye de imkân sağladıklarından akülü engelli araçlarında en çok tercih edilen motor türüdür. Ancak fırça ve kollektöre sahip olduklarından daha sık arızalanırlar. Bu nedenle periyodik bakıma ihtiyaç duyarlar. Elektrikli trenler, elektrikli otomobiller, elektrikli vinçler, oyuncaklar, su altı taşıtları, lineer aktüatörler ve elektrikli küçük ev aletleri bu motorların kullanım alanlarından bazılarıdır. Araçlarda marş motoru olarak da kullanılan PMDC motorların pozitif özellikleri şunlardır:

- Harici bir uyarım devresine ihtiyaç duyulmadığından alan sargılı DC motorların uyarım devresindeki bakır kayıpları bunlarda söz konusu değildir. Bu nedenle verimleri diğer fırçalı DC motorlara kıyasla daha yüksektir.
- Hız kontrolü, geleneksel DC motorlarda olduğu gibi basittir.
- Hava aralığı akısı sabit olduğundan gerilimdeki değişimlere hızlı tepki verirler.

Bununla birlikte PMDC motorlarda şönt uyarımlıdaki kadar yüksek bir akı yoğunluğu üretilmediğinden, aynı boyut ve yapıdaki bir şönt motora kıyasla endüvi akımı başına daha düşük bir moment üretilir (J Chapman 2004). Bir diğer dezavantajı da mıknatısların zaman içerisinde manyetiklik özelliklerini kaybetmeye başlamasıdır.

#### 3.3.2.1 PMDC motorun yapısı ve çalışma ilkesi

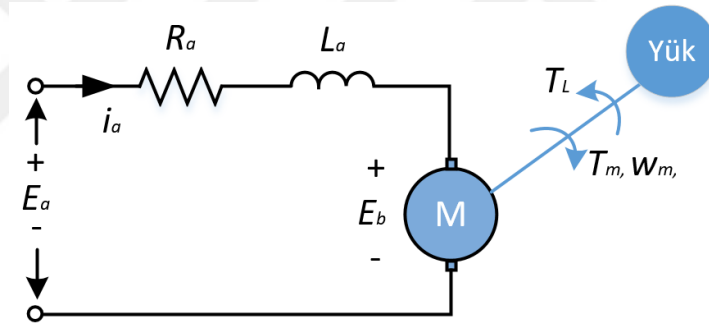
PMDC motorlar, endüvi sargılarında üretilen manyetik alanla mıknatısların ürettiği manyetik alanın etkileşimi sonucunda mekanik enerji üretirler. Mıknatıslar dışındaki kısımları itibarıyla şönt motorla aynı yapıya sahiptirler. Dolayısıyla DC motorların temel parçaları olan fırça, kollektör ve endüvi sargısı bunlarda da vardır. Bir PMDC motorun yapısı ve temel bileşenleri Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.19 PMDC motorun yapısı ve temel bileşenleri.

### 3.3.2.2 PMDC motorun matematiksel modeli

PMDC motorun matematiksel modelini elde etmek için Şekil 3.20'deki eşdeğer devreden faydalanılır. Şekildeki  $E_a$  motora uygulanan DC gerilimi,  $R_a$  endüvi sargı direncini,  $L_a$  endüvi sargının endüktansını,  $i_a$  endüvi akımını ifade etmektedir.  $E_b$  ise endüvi sargılarında endüklenen zıt elektromotor kuvvettir.



Şekil 3.20 PMDC motorun eşdeğer devresi.

Şekil 3.20'deki eşdeğer devreye Kirchoff'un gerilim kanunu uygulanırsa denklem (3.1) elde edilir.

$$E_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E_b \quad (3.1)$$

Kararlı durumda endüvi sargılarında endüklenen zıt emk denklem (3.2)'ye eşittir.

$$E_b = K_b \cdot \omega_m \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'deki  $K_b$  fiziksel boyutlar, bobinin sarım sayısı ve stator manyetik alan yoğunluğu gibi motorun yapısından kaynaklanan zıt emk sabitidir.  $\omega_m$  ise açısal hız olup sürekli durumda denklem (3.3)'teki gibi hesaplanır.

$$\omega_m = \frac{E_a - i_a \cdot R_a}{K_b} \quad (3.3)$$

Sistemin enerji dengesini temin etmek için sistemdeki momentlerin toplamının sıfıra eşit olması gerekir. Bu durumda

$$T_m - T_j - T_\omega - T_L = 0 \quad (3.4)$$

olur. Denklemdaki  $T_m$  motorun ürettiği momenti,  $T_j$  motorun atalet momentini,  $T_\omega$  sürtünme momentini,  $T_L$  ise yük momentini ifade etmektedir. Motorun ürettiği moment endüvi sargılarından geçen akımla doğru orantılı olup denklem (3.5)'de verilmiştir.

$$T_m = K_t \cdot i_a \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'deki  $K_t$  motorun tork sabitidir. Motorun atalet momentini ve sürtünme momentleri sırasıyla denklem (3.6) ve (3.7)'de verilmiş olup denklemdeki  $J$  rotor ataletini,  $B$  ise viskoz sürtünme katsayısını ifade eder.

$$T_j = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.6)$$

$$T_\omega = B \cdot \omega_m \quad (3.7)$$

(3.5), (3.6) ve (3.7) denklemleri denklem (3.4)'deki yerlerine konulursa denklem (3.8) elde edilir.

$$K_t \cdot i_a - j \cdot \frac{d\omega_m}{dt} - B \cdot \omega_m - T_L = 0 \quad (3.8)$$

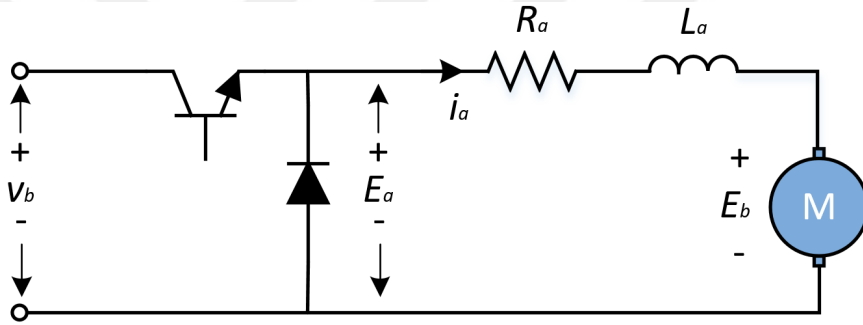
### 3.3.2.3 PMDC motor kontrol yöntemleri

Alan sargılı DC motorlarda hava aralığı akısı kontrol edilebilirken PMDC motorlarda sabittir. Dolayısıyla PMDC motorların hızları ya endüvi giriş gerilimiyle ya da endüvi akımıyla kontrol edilebilir. PMDC motorların kontrol yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Moussavi ve ark. 2012):

1. Klasik PID denetleyici.
2. Akıllı denetleyici (bulanık mantık ve yapay sinir ağı).
3. Modern denetleyici (adaptif).

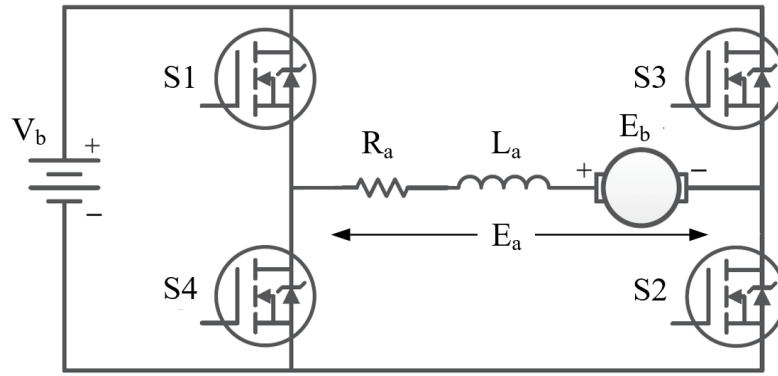
Ancak hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, hepsinde yapılan şey motora uygulanan gerilimi kontrol etmek için darbe genişliğini değiştirmektir. PWM yöntemiyle bir PMDC motorun hızını kontrol etmek, güç tüketimi açısından geleneksel analog kontrol yöntemlerine kıyasla çok daha verimli bir yoldur. Çünkü geleneksel analog kontrolde motora seri bağlı değişken değerli bir direnç eklenerek motorun hızı kontrol edilmektedir (Condit 2004). Bu da direnç üzerinde ısı şeklinde güç kaybına ve dolayısıyla düşük verime neden olmaktadır.

Akülü engelli araçlarında hızla birlikte yön kontrolü de yapılması gerekir. Çünkü aracın hem ileri hem de geri gidebilmesi gerekir. Bu gibi durumlarda Şekil 3.21'deki gibi tek yarı iletken anahtarla yapılan sürücü devresi ihtiyacı karşılayamaz. Çünkü bu tür sürücülerde sadece bir yarı iletken anahtar kullanılmakta olup akımın sargılardan geçiş yönü değiştirilemeyeceğinden araç sadece ileri veya sadece geri yönde gidebilecektir.



Şekil 3.21 Tek yarı iletken anahtarla yapılan sürücü devresi.

Aracın her iki yönde de hareketini temin edebilmek için 4 adet yarı iletken anahtardan oluşan bir H-köprü devresi kullanılır. Şekil 3.22'de verilen örnek H-köprü devresinde S1 ve S2 anahtarları sürüldüğünde motor saat yönünde dönüyorsa yani araç ileri gidiyorsa, S3 ve S4 sürüldüğünde motor saat yönünün tersine döner, yani araç geriye doğru hareket eder. Böylece isteğe göre aracın ileri veya geriye gitmesi sağlanmış olur. Şekil 3.22'de görülen H-köprü devresi ile aracın hızı da kontrol edilebilmektedir. Bunu sağlamak için devredeki yarı iletken anahtarlar PWM yöntemiyle sürülürler. PWM sinyallerini üretmek için de mikrodenetleyici kullanılır. Farklı darbe/periyo (duty cycle) değerlerine sahip PWM sinyalleri kullanılarak motora uygulanan gerilimin değeri sıfır ile anma gerilimi arasında istenildiği gibi değiştirilebilir. Böylece motorun hızı sıfırdan anma hızına kadar kontrol edilmiş olur. Kullanılan PWM sinyalinin frekansı isteğe bağlı olarak değişebilmektedir. Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan engelli aracındaki sürücünün PWM anahtarlama frekansı 20 kHz'dir.



Şekil 3.22 H-köprü yapısı

### 3.3.3 PM senkron Motor

PM senkron motor, rotorundaki manyetik alanın kalıcı mıknatıstan sağlanması dışında DC uyarımlı bir senkron motorla benzer bir yapıya sahiptir. Stator yapısı asenkron motorunkine benzer ancak asenkron motordan üstün özelliklere sahiptir. PM senkron motorlar diğer motorlarla kıyaslandığında basit bir yapı, doğrusal bir hız moment ilişkisi, daha büyük bir moment/hacim oranı, yüksek hızlarda çalışabilme ve hızlarının çok geniş sınırlar içerisinde kontrol edilebilmesi gibi özellikleri öne çıkmaktadır. Çalışırken ark çıkarmadıklarından her ortamda güvenle kullanılabilen bu motorların moment/eylemsizlik momenti oranı da daha yüksek olduğundan daha hızlı tepki verirler (Pillay ve Krishnan 1991).

PM senkron motorlar tüm bu olumlu özelliklerinin yanında rotor konum bilgisi için kullanılan konum sensörünün maliyeti artırması, DC ve asenkron motorlara göre daha pahalı olmaları ve doğrudan yol alamadıkları için harici güç elektroniği devrelerine ihtiyaç duymaları gibi dezavantajlara da sahiptir.

Değişken hız ve yüksek verim gereken birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olan PM senkron motorların uygulama alanları birkaç Watt'tan birkaç MW'a kadar geniş bir aralıkta değişmektedir. Verimleri yüksek olduğundan yüksek kaliteli beyaz eşyalarda, yüksek kaliteli pompalarda, fanlarda ve üst düzeyde verim ve emniyet gerektiren birçok cihazda kullanılırlar (Prokop ve Grasblum 2005). Metal tel işleme, sac işleme ve kesme, kablo üretimi, değişken hızlı hidrolik pompalar, kâğıt ve karton üretim hatları, kumaş işleme makineleri, elektrikli/hibrit araçlar, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, buzdolabı, asansör, klima, robot uygulamaları, süpürgeler, fanlar ve gemi pervaneleri bu motorların kullanım alanlarından bazılarıdır.

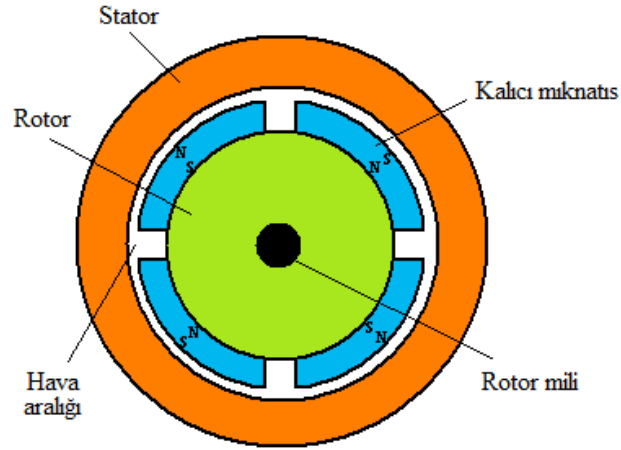
### 3.3.3.1 PM senkron motorun yapısı ve çalışma ilkesi

Bilindiği gibi senkron motorlar çift uyarımlı motorlardır. Bu motorların statorlarına alternatif gerilim, rotorlarına ise fırça ve bilezikler yardımıyla doğru gerilim uygulanmaktadır. Ancak PM senkron motorların rotorundaki alan mıknatısları ile sağlandığından harici bir doğru gerilim kaynağına ihtiyaç duymazlar. Stator bakımından asenkron motorlarla aynı yapıya sahiptirler.

Motorda kullanılacak kalıcı mıknatısların seçiminde kalıcı mıknatısın ağırlığına, verimliliğine, çalışma sıcaklığı üst sınırına, motor performansına sağlayacağı katkıya ve maliyetine bakılır. Motor performansını etkileyen faktörlerin bir diğeri de mıknatısların rotora yerleştirilme biçimleridir. PM senkron motorlar kalıcı mıknatısların rotora yerleştirilme biçimlerine göre ikiye ayrılır. Bunlardan ilki kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği yüzey montajlı veya yüzeysel mıknatıslı olarak isimlendirilen PM senkron motor, diğeri ise kalıcı mıknatısların rotor içine yerleştirildiği dâhili mıknatıslı olarak adlandırılan PM senkron motor türüdür.

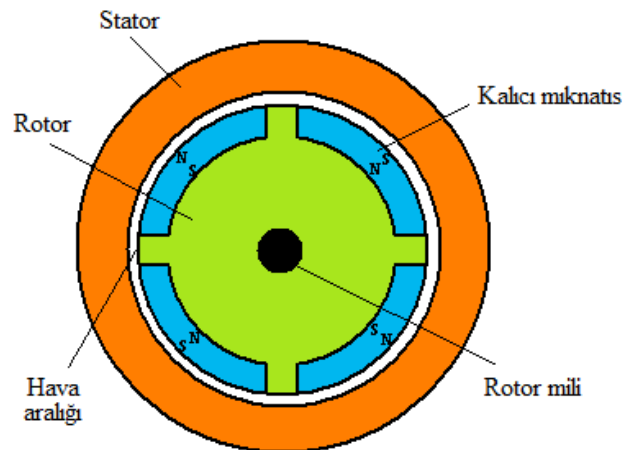
Bu iki tasarımdan başka bir de radyal ve aksel akılı tasarımlar vardır. Radyal akılı tasarımda akı yönü makinenin yarıçapı boyuncaadır. Aksel akılıda ise akının yönü rotor miline paraleldir ki esasında bunlar dâhili mıknatıslı PM senkron motor modellerinin farklı biçimlerde tasarımından ibarettir. Bu karma rotor yapısında kalıcı mıknatıslardan başka kısa devre çubukları da bulunabilmektedir. Bunun nedeni ise senkron motorlarda yaşanan yol alma problemini gidermektir.

Şekil 3.23’de yapısı görülmekte olan yüzey mıknatıslı PM senkron motorlarda kalıcı mıknatıslar çelik nüveli rotor üzerine yerleştirilirler. Kalıcı mıknatısın alan şiddeti ( $H_c$ ) yüksek olduğundan kolay demagnetize olmazlar. Bu motor türünde etkin hava aralığı geniş olduğundan bununla ters orantılı olarak endüktans düşüktür. Yani endüktans, kalıcı mıknatıs olan ve olmayan rotor bölümlerinde sabit ve eşit kabul edilebilir. Mıknatıslardaki kaçakların hava aralığındakine göre küçük olması daha küçük mıknatıs kullanımını sağlar. Tezin deneysel çalışma bölümünde de yüzey montajlı PM senkron motor kullanılmıştır.



Şekil 3.23 Yüzey montajlı PM senkron motorun yapısı (Kazan 2009).

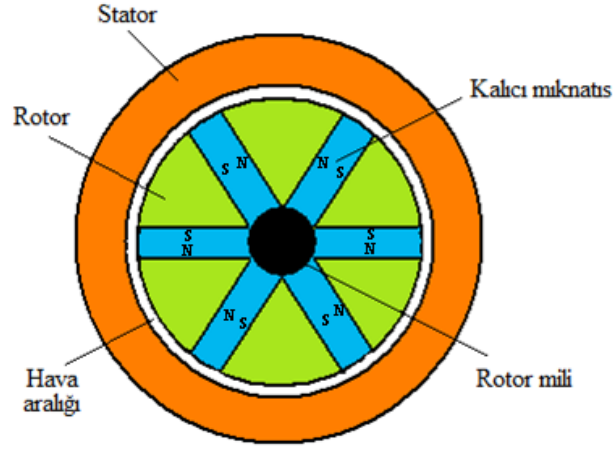
Kalıcı mıknatısın alan şiddetindeki azalma, demagnetizasyon riskini ortaya çıkarmaktadır. Bunu engellemek için mıknatıs rotor içerisine doğru büyütülerek yerleştirilir. Elde edilen bu yeni yapı dâhili mıknatıslı PM senkron motor olarak adlandırılır (Şekil 3.24). Bu motor yapısında mıknatısların bulunduğu bölgelerde hava aralığı etkinken, mıknatısların bulunmadığı ve çelik nüve tarafından doldurulan bölgelerde hava aralığı etkisi azdır. Bu nedenle bu motor yapısı çıkıntılı kutuplu senkron motor gibi davranış sergiler. Aynı mıknatıs boyutlarına göre kıyaslandığında yüzey montajlı yapıya göre daha yüksek pik torku üretir. Çünkü dâhili mıknatıslı rotor yapısı relüktans torku üretir. Aynı torku üretecek mıknatıs kalınlığı dâhili mıknatıslı rotor yapısında daha incedir. Bunun sonucunda  $L_d$  daha büyüktür (Bal 2004).



Şekil 3.24 Dahili mıknatıslı PM senkron motorun yapısı (Kazan 2009).

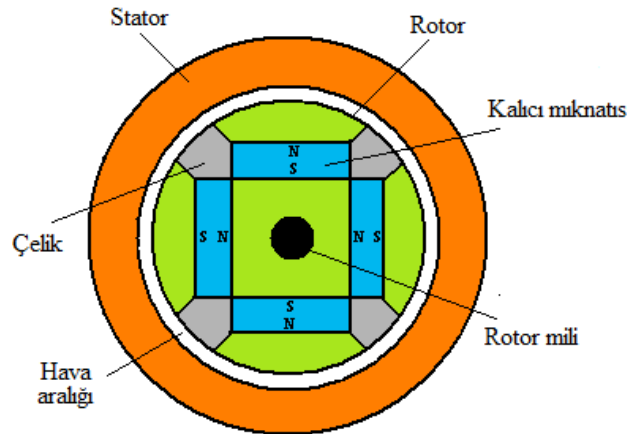
Radyal akılı PM senkron motorlarda kalıcı mıknatıslar rotor içine radyal (merkezden çevreye doğru) mıknatıslanacak biçimde yerleştirilirler. Şekil 3.25’de yapısı

verilen bu motor yüzey montajlı ve dâhili mıknatıslı ile karşılaştırıldığında daha büyük  $L_d$  ve  $L_q$  değerlerine sahiptir.



Şekil 3.25 Radyal akılı PM senkron motorun yapısı (Kazan 2009).

Şekil 3.26'da yapısı görülmekte olan eksenel akılı PM senkron motorda ise akı odaklayıcı etkiden dolayı radyal mıknatıslanmaya göre çok daha büyük bir hava aralığı akısı meydana gelir. Çıkıntılı kutuplu senkron makine özelliği gösteren bu PM senkron motor türünde, eksenel mıknatıslanma düzeni akı yoğunluğunda artışa neden olduğundan, akı yoğunluğu bakımından düşük olan ferrit mıknatısların bu motorlarda kullanılmaları mümkündür.



Şekil 3.26 Eksenel akılı PM senkron motorun yapısı (Kazan 2009).

Kalıcı mıknatısların rotora yerleştirilme şekilleri motorun analizi sırasında büyük önem taşımaktadır. Çünkü yüzey montajlı PM senkron motorlarda d eksenli endüktansı ( $L_d$ ), ile q eksenli endüktansı ( $L_q$ ) eşitken, dâhili PM senkron motorlarda  $L_q > L_d$ 'dir. Aynı



durum radyal akılı PM senkron motorlar için de geçerlidir ( $L_q > L_d$ ). Ancak aksenal akılı PM senkron motorlarda bu durum tam tersidir ( $L_q < L_d$ ). Dolayısıyla yüzey montajlı PM senkron motorların matematik modeli diğer tasarım türlerine göre biraz daha kolay yapılabilir.

PM senkron motorun rotorundaki kutuplar, kalıcı mıknatısların rotor miline N-S kutup çifti oluşturacak şekilde yerleştirilmeleri ile elde edilir. Stator kutupları ise sargılardan geçen akımlarla sağlanır. Rotor kutupları sabit olmasına karşın stator kutupları uygulanan gerilimin frekansına bağlı olarak sürekli değişir ve buna bağlı olarak döner alan oluşur. Rotor kutuplarının oluşturduğu alan ile stator döner alanı, motorun dönüşü için gerekli olan torku üretir. PM senkron motorlar besleme türlerine göre doğrudan hat beslemeli (line started) ve inverter beslemeli (inverter feed) olarak ikiye ayrılır.

Doğrudan hat beslemeli PM senkron motorların rotorlarında, asenkron motorlarda kullanılan kısa devre çubuklarının işlevine sahip kafes çubuklar bulunur. PM senkron motorun kalkınma anında hızı sıfır olduğundan stator döner alanı yol alma anında bu çubukları tam olarak keser ve böylece motorun kalkınması için gereken tork oluşur. Motor senkron hıza ulaştığında stator döner alanı ile rotor hızı eşitlendiğinden çubuklarda gerilim düşümü olmaz. Bu nedenle çubuklar sadece yol alma anında güç harcarlar. Doğrudan hat beslemeli bu PM senkron motorlar geri beslemeli veya geri beslemesiz olarak çalıştırılabilir.

İnverter beslemeli PM senkron motorlar çoğunlukla kafesizdirler. Bu besleme türüne sahip motorlar da geri beslemeli veya geri beslemesiz üretilebilirler. Geri besleme olmayan yapıda motor frekansı düşük seviyeden başlayıp rampa şeklinde artırılarak motorun senkron hıza ulaşması sağlanır. Geri beslemelide ise motorun konum ve faz akımı bilgilerinin algılanması gerekir. Algılanan konum bilgisi ile gerçek hız elde edilerek referans hız değeriyle arasındaki hata bulunur ve bu bilgi kullanılarak inverter için gereken anahtarlama sinyalleri üretilir. Bu yapıda inverter frekansı ve gerilimi ayarlanarak hemen hemen tüm hızlarda senkronizasyon bozulmamış olur (Üstün 2004).

### ***3.3.3.2 PM senkron motorun matematik modeli***

Elektrik motorlarının kontrolünde motorun matematik modelinin çok iyi bilinmesi gerekir. Çünkü motorun kontrolü çıkartılacak olan bu matematik modeline göre

yapılmaktadır. Dolayısıyla motorun matematik modelindeki hata kontrol işleminde başarısızlığa neden olacaktır.

PM senkron motorun modellenmesinde 3 çeşit matematik modeli kullanılmaktadır. Bunlar:

- Değişkenlerin stator referans düzleminde ifade edildiği 3 faz modeli.
- Değişkenlerin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 faz d-q modeli.
- Değişkenlerin 2 fazlı sabit düzleme aktarıldığı 2 faz  $\alpha$ - $\beta$  modeli.

Üç fazlı motorların modelleri uygun iki fazlı modele çevrilerek motorun dinamik denklemlerindeki karmaşıklık azaltılır. Stator büyüklüklerinin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 faz d-q modeli, serbest uyarımlı DC motor modeline benzemekte olup bu model kullanıldığında motorun kontrolü kolaylaştırılmış ve böylece denklemlerin çözüm süreleri kısaltılmış olur.

Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan sürücüde alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Bilindiği gibi bu kontrol yönteminde d eksen akımı sıfırda tutulur ve motorun üreteceği tork q eksen akımıyla kontrol edilir. Bu yüzden burada PM senkron motorun rotor referans düzlemindeki matematik modeli detaylı olarak verilecektir. Modeli çıkartılacak olan yüzey montajlı PM senkron motor 3 fazlı olup sargıları yıldız bağlıdır.

Motorun matematik modeli çıkartılmadan önce bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kalıcı mıknatıslara bağlı hava aralığındaki akı dağılımı sinüzoidaldir. Dolayısıyla stator sargılarında endüklenen zıt emk sinüzoidaldir.
- Stator sargılarının dağılımı sinüzoidaldir.
- Girdap akımları ve histerisiz kayıpları ihmal edilmiştir.
- Rotor üzerinde damper sargısı bulunmamaktadır.
- Doyma ihmal edilmiştir.
- Kalıcı mıknatısa bağlı kutup akısı sabittir (Muni ve ark. 1996).

PM senkron motorun statoruna uygulanan gerilimin ani değeri, denklem (3.9)'daki gibi matris formunda ifade edilebilir.

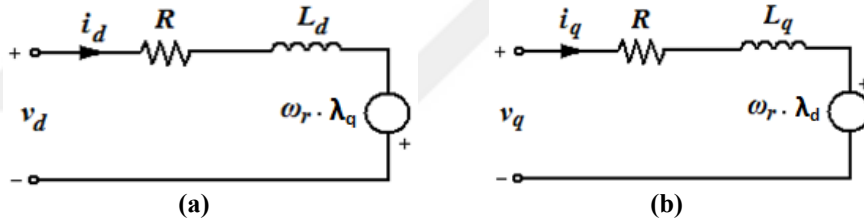
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'daki  $v_a, v_b$  ve  $v_c$  stator sargılarına uygulanan faz gerilimlerinin ani değerlerini;  $R_a, R_b$  ve  $R_c$  faz sargılarının omik dirençlerini;  $i_a, i_b$  ve  $i_c$  stator faz akımlarının ani değerlerini;  $L_{aa}, L_{bb}$  ve  $L_{cc}$  faz sargılarının toplam endüktanslarını;  $L_{ab}, L_{ba}, L_{bc}, L_{cb}, L_{ca}$  ve  $L_{ac}$  faz sargıları arasındaki karşılıklı endüktansı;  $e_a, e_b$  ve  $e_c$  kalıcı mıknatıslı rotor tarafından stator sargılarında endüklenen zıt emk'yı temsil etmektedir.

$R_a, R_b$  ve  $R_c$  dirençleri eşit olduğundan bu dirençler  $R$  ile gösterilebilir. Denklemdeki zıt emk ve endüktans ifadeleri manyetik akı türünden yazıldığında denklem (3.10) elde edilir. Denklemdeki  $\psi_a, \psi_b$  ve  $\psi_c$  faz sargılarının akılarını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

PM senkron motor, dq model kullanılarak rotor referans düzleminde de ifade edilebilir. Buna göre PM senkron motorun rotor referans düzlemindeki eşdeğer devresi Şekil 3.27'deki gibi çizilebilir.



Şekil 3.27 PM senkron motorun rotor referans düzlemindeki eşdeğer devresi  
(a) d eksenini, (b) q eksenini.

Denklem (3.10), Şekil 3.27'deki eşdeğer devreler kullanılarak denklem (3.11)'deki gibi yazılabilir (Pillay ve Krishnan 1988).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'deki  $v_d$  ve  $v_q$  ifadeleri giriş geriliminin d-q bileşenlerini,  $i_d$  ve  $i_q$  faz akımlarının d-q bileşenlerini,  $R$  stator sargılarının omik direncini,  $L_d$  ve  $L_q$  d-q eksenini endüktanslarını,  $\omega_r$  rotorun açısal hızını,  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  ise d-q eksenini manyetik akılarını simgelemektedir.

Motorun d-q eksenini manyetik akıları denklem (3.12)'de verilmiştir. Denklem (3.12)'teki  $\psi_m$  ifadesi kalıcı mıknatıstan dolayı meydana gelen manyetik akıdır.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Denklem (3.11) durum uzay formunda yazılırsa:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_m \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

elde edilir. Bu denklem incelendiğinde motor kontrolünün d-q eksen akımlarıyla sağlanabileceği görülmektedir. Motorun ürettiği elektromanyetik tork ise denklem (3.14)'de verilmiştir. Tork denklemindeki  $p$  ifadesi motorun çift kutup sayısını temsil etmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi_m \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d] \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) incelendiğinde motorun üreteceği torkun d-q eksen akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. Bu denklem, yüzey mıknatıslı PM senkron motorlarda d-q eksen endüktanslarının eşit olduğu (Juming ve ark. 2003; Modran 2008) göz önünde bulundurularak tekrar yazılırsa:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_m \cdot i_q \quad (3.15)$$

elde edilir. Denklem (3.15) incelendiğinde yüzey mıknatıslı PM senkron motordaki tork kontrolünün q eksen akımına bağlı olduğu görülmektedir. Rotorun açısal hız ( $\omega_r$ ) ve konum ( $\theta_r$ ) ifadesi ise sırasıyla denklem (3.16) ve (3.17)'de verilmiştir.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_l - B_m \cdot \omega_r}{J} \quad (3.16)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3.17)$$

Denklem (3.16)'daki  $T_l$  ifadesi yük torkunu,  $B_m$  ise sönüm katsayısını simgelemektedir.

Motorun toplam giriş gücü ( $P$ ) 3 faz modelindeki değişkenler kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

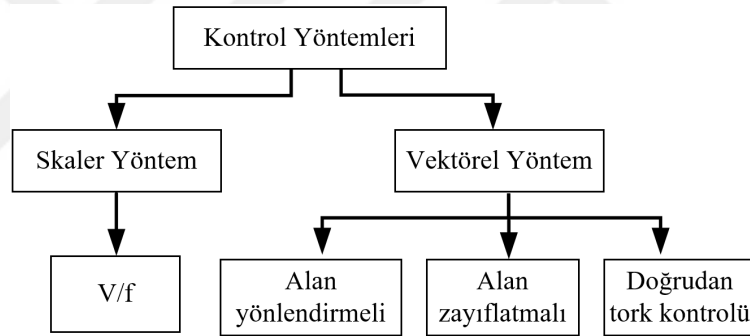
$$P = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (3.18)$$

Motor giriş gücünün d-q değişkenlerine göre ifadesi ise denklem (3.19)'da görülmektedir.

$$P = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (3.19)$$

### 3.3.3.3 PM senkron motor kontrol yöntemleri

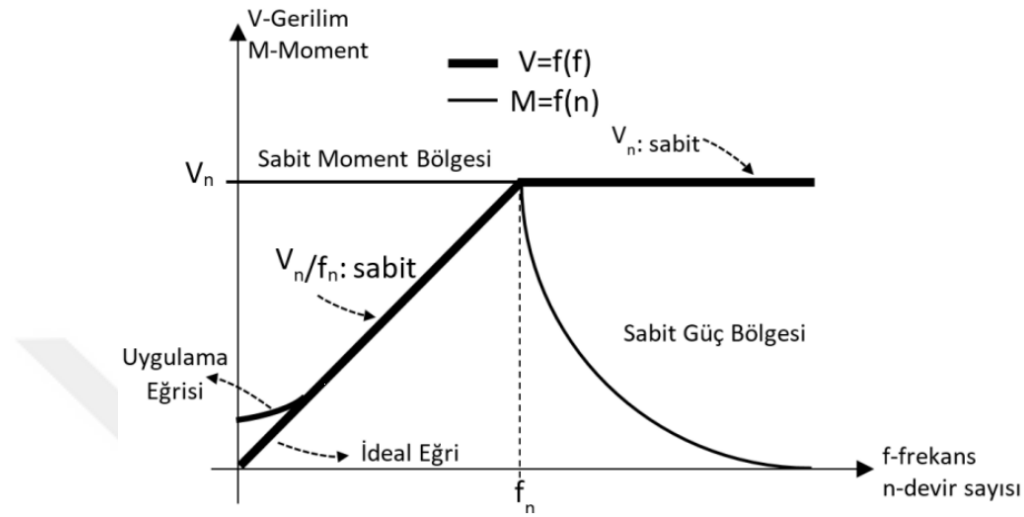
Bilindiği üzere motor kontrol yöntemleri, kontrol edilen parametreye göre iki ana gruba ayrılmaktadır. Eğer parametrenin sadece büyüklüğü kontrol ediliyorsa bu yöntem *skaler yöntem* denir. Ancak parametrenin büyüklüğü ile beraber yönü de kontrol ediliyorsa bu yöntem *vektörel yöntem* denir. Bu iki ana grup Şekil 3.28'de de gösterildiği gibi kendi içinde alt gruplara ayrılmaktadır.



Şekil 3.28 Kontrol yöntemleri.

Skaler kontrol yöntemi olan V/f yöntemi açık çevrim bir yöntem olup bu yöntemde akım, dolayısıyla da tork kontrolü yapılamamaktadır. Tork yerine stator sargısına uygulanan gerilimin genliği ve frekansı belli bir V/f oranına göre değiştirilmektedir. Motorun hızı değiştirilmek istendiğinde gerilimin frekansı değiştirilmektedir. Frekansın bu orana bağlı olarak değiştirilmesi beraberinde senkron hızı da değiştirdiğinden hız ayarı etkin bir biçimde yapılabilir. Devrilme momenti V/f oranının sabit tutulması ile belli oranda sabit kalır. Ancak V/f oranı sabit tutularak yapılan hız ve moment ayarında bu yöntem anma gerilimi ve frekansının altındaki değerlerde geçerlidir. Anma gerilimine ve anma frekansına kadar ayar yapılan bölgeye bu sebepten dolayı *sabit moment bölgesi* adı verilir. Anma geriliminin üstüne çıkılmayacağından, senkron hızın üstüne çıkmak için gerilim anma değerinde sabit tutulurken frekans

arttırılır, dolayısıyla  $V/f$  oranı sabit tutulamaz, küçülür. Buna bağlı olarak manyetik akı azalırken devrilme momenti karesel olarak azalır. Bu çalışma bölgesi ise *sabit güç bölgesi* olarak adlandırılır (Kocabaş 2016). Bu kontrol yönteminde gerilimle frekans arasındaki ilişki Şekil 3.29'da verilmiştir.

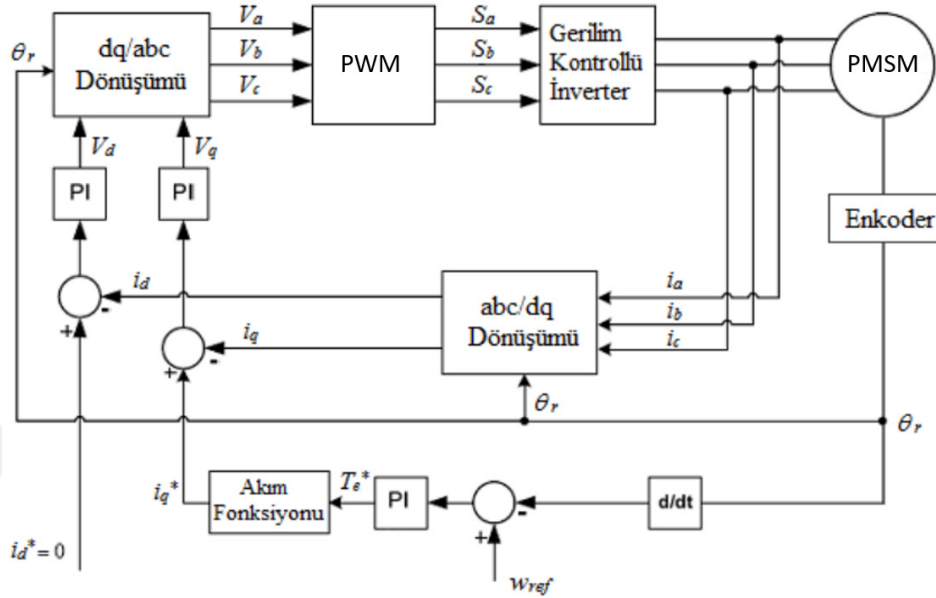


Şekil 3.29 V/f kontrol eğrisi (Kocabaş 2016).

Bu yöntemde tork kontrolü yapılmadığı için diğer yöntemlere kıyasla yük değişimlerinden daha fazla etkilenirler. Açık çevrim bir yöntem olduğundan dinamik performansı kötüdür, rotor konum bilgisi gerektirmez. Aşım değeri yüksek, yerleşme süresi uzundur. Orta ve yüksek hız bölgelerinde avantajlıdır. Ayrıca kontrol işleminde yüksek performanslı bir işlemciye gereksinim duymaz. Motorda sabit bir akıya sahip olmak için çıkış frekansı ile çıkış gerilimi arasındaki oran sabit tutulur (Itoh ve ark. 2002).

Vektör kontrol yöntemlerinin temeli akım vektörlerini manyetik alan üreten bileşen ve tork üreten bileşen olarak vektörlere ayırmaya dayanır. Hem akının genliği hem de konum kontrol edilir. Skaler yönteme göre daha yüksek performans elde edilir. Tork, bu kontrol yönteminde düşük hız aralıklarında bile (sıfır hız dâhil) kontrol edilebilir. Kendi içerisinde alan yönlendirmeli kontrol (field oriented control-FOC) ve alan zayıflatmalı kontrol (field weakened control-FWC) olarak ikiye ayrılır. Ancak kontrol işlemi her iki yöntemde de stator akımlarının dönen d-q eksen takımına dönüştürülmesiyle yapıldığından motorun 3 faz stator akımı ile rotor konum bilgisine ihtiyaç vardır.

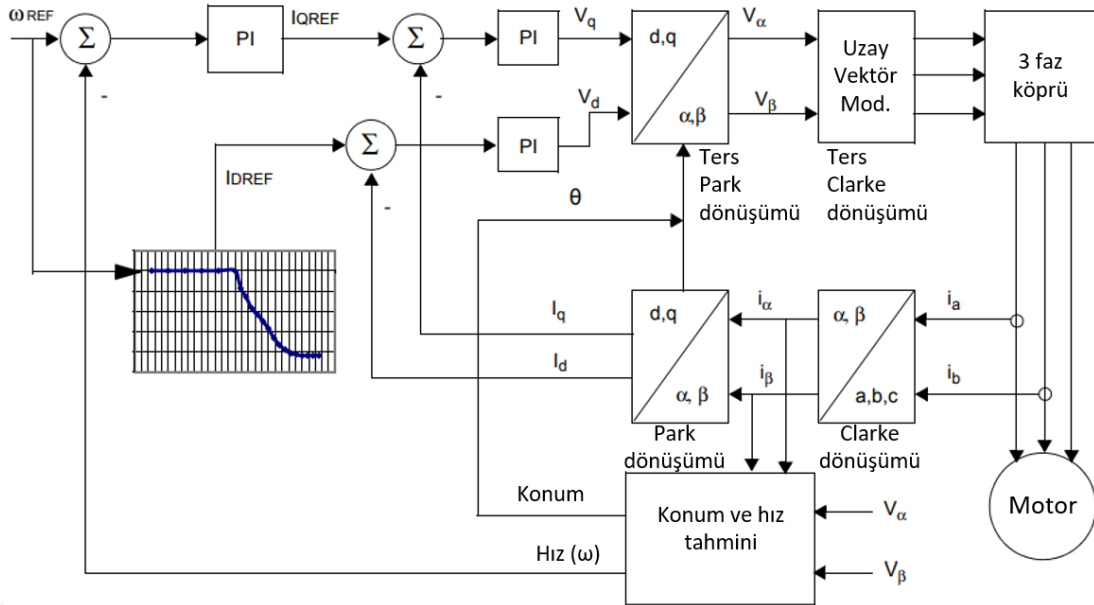
FOC, özellikle simetrik manyetik devreli motorlar için uygundur. Bu nedenle yüzey montajlı PM senkron motorlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kontrol yönteminin blok diyagramı Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30 Alan yönlendirmeli vektör kontrol yönteminin blok diyagramı.

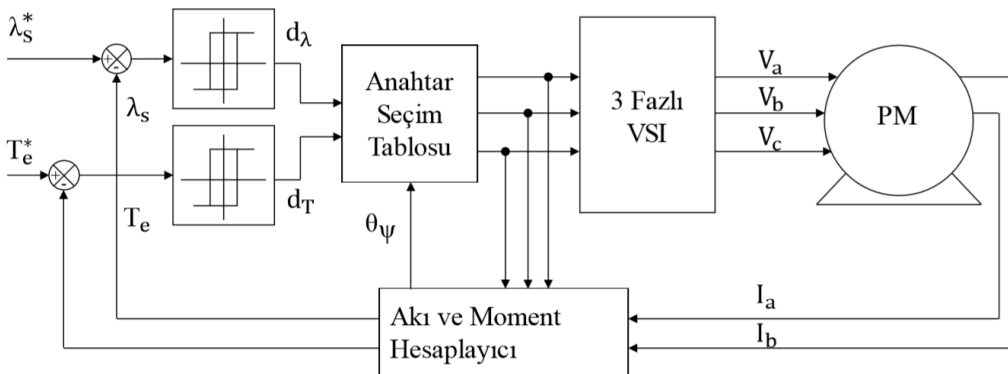
Blok diyagramında da görüldüğü üzere hız denetleyicisinin çıkışından öncelikle referans moment ardından  $i_q$  için referans akım elde edilir. Referans ve ölçülen  $i_q$  akımları karşılaştırılarak elde edilen hata değeri PI denetleyiciye uygulanarak  $V_q$  değeri elde edilir.  $V_d$  değeri de benzer şekilde elde edildikten sonra ters Clarke ve ters Park dönüşümleri kullanılarak  $V_d$  ve  $V_q$  gerilimlerinden üç fazlı  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  referans gerilimleri elde edilir. PWM bloğunda referans gerilimleri elde etmek için gerilim kaynaklı inverterin anahtarlarına uygulanacak sürme işaretleri oluşturulur (Çelik ve Kürüm 2013).

Manyetik devresi simetrik olmayan dâhili mıknatıslı PM senkron motorlarda ve yüksek hız söz konusu olduğunda blok şeması Şekil 3.31'de verilen FWC kullanılır. Bu yöntemde kalıcı mıknatısın oluşturduğu alana zıt yönde bir alan üretildiğinden kalıcı mıknatısın demanyetize olma riski vardır. Ancak büyük koerzif kuvvete sahip kalıcı mıknatıslar kullanılarak bu risk en aza indirilebilmektedir. Bu yöntemle maksimum tork üretilerek yüksek hızlarda çalışılabilir.



Şekil 3.31 Alan zayıflatmalı vektör kontrol yönteminin blok şeması (Zambada ve Deb 2010).

Vektör kontrol yöntemine alternatif olarak geliştirilen doğrudan tork kontrol (direct torque control-DTC) yönteminde tork ve akının referans değerleri ile gerçek değerleri arasındaki farka göre gerilim vektörü doğrudan seçilir. Böylece stator akısı, uygulanan stator gerilimiyle değiştirilmiş olur. Stator akısındaki değişiklikte birlikte yük açısı ve üretilen tork da değiştirilir. Bu kontrol yönteminin basitleştirilmiş bir blok şeması Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32 DTC'nin basitleştirilmiş blok şeması (Hisar 2019).

Şekil 3.32’de de görüldüğü gibi DTC’de tork ve akı hataları histeresiz komparatörlerle karşılaştırılır. Önceden oluşturulan bir tablodan karşılaştırma sonucuna göre iletme sokulacak anahtarlar (gerilim vektörü) seçilir. Akım kontrolüne gerek olmayan bu kontrol yönteminde motor parametresi olarak sadece stator sargı direncine



ihtiyaç vardır. PWM yöntemi yerine seçilen anahtarların ürettiği altı gerilim vektöründen birisi örnekleme süresi boyunca motora uygulanır. Tüm hesaplamalar, rotor konumunun açık bilgisini içermeyen sabit referans çerçevesinde yapılır. Ancak PM senkron motor için kalkış anındaki rotor konum bilgisinin bilinmesi zorunludur. Sistemin dinamik performansı iyidir ancak kararlı halde stator akımı ve tork değerlerinde yüksek dalgalanmalar oluşmaktadır (Hisar 2019).

DTC’de tork ve akı için iki farklı histerezis kontrolör kullanılır. Çünkü DTC’de akı ve momentin değiştirilebileceği belirli bir bandın içinde olması gerektiğinden, bu değerlerin istenen değerden “ne kadar uzak” olmasına izin verileceğine dair toleransın ayrı ayrı belirlenmesi gerekir. FOC ile DTC yöntemleri karşılaştırıldığında Tablo 3.3’deki sonuçlar elde edilmektedir.

**Tablo 3.3** FOC ve DTC yöntemlerinin karşılaştırılması.

<b>Karşılaştırma konusu</b>	<b>Alan yönlendirmeli kontrol (FOC)</b>	<b>Doğrudan tork kontrol (DTC)</b>
Kontrol edilen değişkenler	Tork Rotor akısı	Tork Stator akısı
Kontrol değişkenleri	Stator akımları	Stator gerilim uzay vektörleri
Algılanan değişkenler	Rotor mekanik hızı Stator akımları	Stator gerilimleri Stator akımları
Tahmin edilen değişkenler	Kayma frekansı Rotor akısı pozisyonu	Tork Stator akısı
Regülatörler	Üç fazlı akım regülatörleri (Histerisiz)	Tork regülatörü (histerisiz) Stator akı regülatörü (histerisiz)
Tork kontrolü	Stator akımlarıyla dolaylı kontrol Yüksek cevap hızı Tork dalgalanması	Doğrudan kontrol Yüksek cevap hızı Tork dalgalanması
Akı kontrolü	Stator akımlarıyla dolaylı kontrol Düşük cevap hızı	Doğrudan kontrol Yüksek cevap hızı
Parametre hassasiyeti	Rotor zaman sabitindeki değişimlere duyarlı	Stator direncindeki değişimlerine duyarlı
Gerçekleştirme zorluğu	Yüksek seviyeli karmaşıklık Hesaplamalarda trigonometrik fonksiyon gerekli	Orta seviyeli karmaşıklık

#### 4. AKÜLÜ ENGELLİ ARAÇLARI İÇİN ARIZA TESPİT VE TEST SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Akülü engelli araçlarında farklı arızalar meydana gelebilir. Bu arızalar her zaman motorun dönmemesi veya akünün şarj tutmaması olarak ortaya çıkmaz. Zamanla motor ve sürücü verimlerinde yaşanan düşmeler, motorun çok çabuk ısınması, akünün normale göre daha hızlı deşarj olması, buna bağlı olarak aracın tam şarjla daha kısa mesafe kat etmesi muhtemel arızalardandır. Sadece motor akımı veya sadece akü akımı ölçülerek sürücü verimindeki düşmenin tespit edilmesi mümkün olmadığı gibi sadece oda sıcaklığında yapılan testlerle çok düşük veya çok yüksek sıcaklıklarda kendini gösteren arızaların tespit edilmesi de olası değildir. Ayrıca arızalı olduğu düşünülen motorun alınıp başka bir araçta test edilmesi doğru bir arıza tespit yöntemi değildir. Tüm bunlar dikkate alındığında arıza tespiti sırasında aracın tüm bileşenlerinin birbiriyle etkileşim içerisinde olması ve bunların bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekir. Bunu sağlamak için de akü ve motor akımlarının, akü ve motor uç gerilimlerinin, motor devir sayısının, motor ve ortam sıcaklıklarının, motorun ürettiği momentin, aracın anlık hızının ve araç kullanılmaya başlandığı andan itibaren alınan toplam yol bilgilerinin toplanarak bilgisayara aktarılması ve bunların analiz edilerek problemin gerçek kaynağının tespit edilmesi gerekir.

Tezin bu bölümünde hem PMDC motorlu hem de Türkiye’de ilk defa bu tez çalışmasında monte edilecek PM senkron motorlu akülü scooter modellerinin test edilebileceği bir test düzeneği tasarlanıp gerçekleştirilecektir. Test sistemin tüm bileşenleri detaylı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

##### 4.1 Hız Ölçümünde Kullanılacak Test Platformu ve Geçici Kart

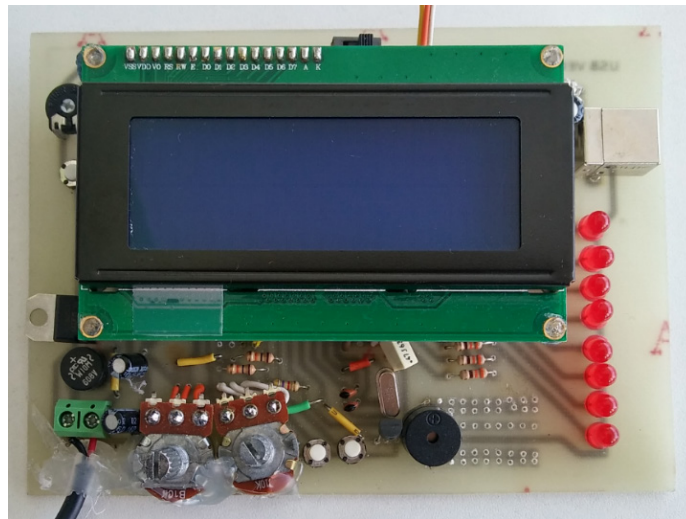
Tezin nihai aşamasında PMDC ve PM senkron motor takılı aracın kat ettiği mesafeler ve performansları inceleneceğinden, öncelikle araçların hız bilgilerinin laboratuvar ortamında fiziksel olarak test edilmesine imkân sağlayacak mekanik bir düzene tasarlanması gerekir. Ardından bu düzeneğe bir enkoder bağlanarak aracın ve araçtaki motorun hız bilgilerinin elde edilebilir olması sağlanmalıdır. Bu nedenle oldukça basit ve etkin olacak şekilde bir test platformu tasarlanmıştır. Tasarlanan platform Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 Akülü aracın laboratuvar ortamında test edilmesi için tasarlanan test platformu.

Test platformu hazırlanırken 2 adet silindir, rulmanlı yataklar sayesinde profil üzerine oturtulmuştur. Ardından hız ölçümünde kullanılmak üzere bu düzeneğe bir enkoder takılmıştır. Silindirler arasındaki açıklık, farklı tekerlek çaplarına uygun olması açısından ayarlanabilir olarak tasarlanmıştır. Böylece farklı tekerlek çaplarına sahip araçlarda aracın ve motorun hız bilgisinin elde edilebilir olması sağlanmıştır.

Tasarlanan platformun ve hız ölçüm algoritmasının test edilmesinde kullanılmak üzere oldukça basit ve ucuz bir elektronik kart tasarlanmıştır. Bu kart kullanılarak LED, ADC, sıcaklık, buzzer, LCD ve USB uygulamaları yapılabilmektedir. Tasarlanan kartta mikrodenetleyici olarak PIC18F4550 tercih edilmiş olup PLL yöntemi sayesinde 48MHz'de çalıştırılmıştır. Tasarlanan elektronik kart Şekil 4.2'de görülmektedir.



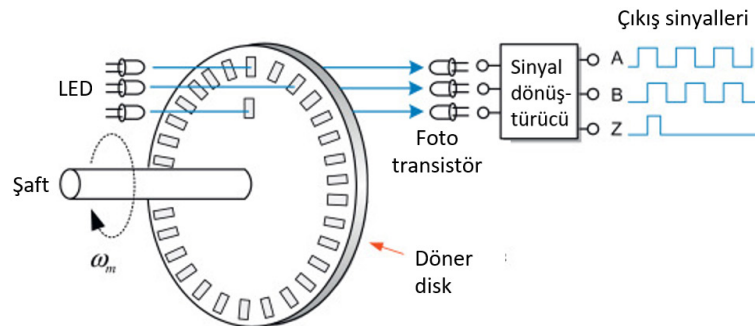
Şekil 4.2 Hız ölçümünde kullanılmak üzere tasarlanan geçici kart.

Tasarlanan kartta enkoder çıkışındaki sinyaller kullanılarak sinyalin frekansı, motorun ve tekerleğin devir sayıları, aracın anlık hız bilgisi ve o ana kadar kat ettiği toplam mesafe hesaplatılarak LCD ekrana yazdırılmıştır. Bu bilgiler hesaplanırken enkoderin bağlandığı silindirin çevresi, tekerlek çevresi ve redüktör oranı dikkate alınmıştır.

## 4.2 Hız Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Elektrik motorlarının açısal konum ve hız geri beslemelerinde çoğunlukla enkoderler kullanılmaktadır. Enkoderler, bağlandıkları milin hareketine göre dijital veya analog sinyal üreten elektromekanik cihazlardır. Milin dönme sayısı ve açısal konumu hakkında bilgi verirler. Konum ve hız kontrolü gereken robot, hareketli kamera, CNC tezgâhları, otomotiv gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Hareketin türüne göre döner (rotary) ve lineer enkoder olmak üzere ikiye ayrılırlar. Motorlarda kullanılanlar döner enkoderler olup bunların da mutlak ve artımsal olmak üzere iki türü bulunur. Bağlandıkları milin gerçek açısal pozisyonunu sıfır hızda bile veren enkodere *mutlak (absolute) enkoder* denir. Veremeyenlere ise *artımsal (incremental) enkoder* denir. Motor uygulamalarında genellikle artımsal enkoderler tercih edilir.

Döner enkoderlerin çalışma prensibi, Şekil 4.3'den de anlaşılacağı üzere, döner bir disk üzerine belli bir düzen dâhilinde açılan yarıklardan geçen ışığın, diskin diğer tarafında bulunan ışığa duyarlı eleman tarafından algılanması ve buna uygun çıkış vermesine dayanmaktadır.



Şekil 4.3 Rotary enkoderlerin çalışma prensibi.

Sıfır hızdayken milin açısal konumunun bilinmesi gereken yerlerde mutlak enkoderler kullanılır. Bu enkoderler çözünürlüklerine uygun olarak milin açısal

konumuna bağlı çıkış üretirler. Bu çıkış, milin aynı pozisyonunda hep aynı değere sahiptir. Bu da milin her açısal konumuna karşılık gelen bir sayısal değerin varlığı anlamına gelmektedir. Mil dururken bile mutlak enkoderin çıkış sinyaline bakılarak milin o anki gerçek açısal konumu tespit edilebilir. Ancak artımsal enkoderlerde böyle bir imkân yoktur. Artımsal enkoderler, mil dönmeye başladığı andaki mil pozisyonunu sıfır kabul ederler. Eğer sıfır hızdaki açısal konum bilgisi gerekmiyorsa artımsal enkoder daha kullanışlıdır. Artımsal enkoder kullanılarak yapılan hız ölçüm uygulamalarına literatürde (Anuchin ve ark. 2017; Anuchin ve ark. 2016; Ilmiawan ve ark. 2014; Lopera ve ark. 2014; Merry ve ark. 2010; Negrea ve ark. 2012b; Ozturk ve ark. 2017; Petrella ve ark. 2007) rastlamak mümkündür.

#### 4.2.1 Hız ölçüm yöntemleri

Artımsal enkoder kullanılarak üç farklı şekilde hız ölçülebilir. Bunlardan ilkinde sabit bir örnekleme zamanında enkoderin ürettiği darbeler sayılır (M yöntemi). İkincisinde ise enkoderin bir darbesinin süreci hesaplanarak devir sayısı elde edilir (T yöntemi). Bu yöntem düşük hızlarda doğru ölçüm yapabilir ancak yüksek hız bölgelerinde çok yüksek frekanslarda çalışan bir denetleyici gerektirir. Çok çok düşük bölgelerde ise hız ölçüm periyodu değişebilir. Üçüncü yöntem olan M/T yönteminde ise, ilk iki yöntemin birleşimi söz konusudur. Hem M yöntemine benzer şekilde önceden belirlenmiş bir örnekleme süresi boyunca enkoderden gelen darbeler sayılarak motorun hızı hesaplanır hem de darbe süresi hesaplanır. Örnekleme zamanı ve bir kodlayıcı darbesi birbiriyle senkronize edilmediğinde, M/T yöntemi bir sonraki darbenin toplandığı zamanı ölçebildiğinden hatayı azaltabilir.

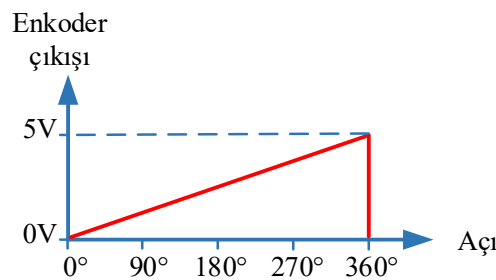
M yönteminde enkoder çıkış sinyalinin frekansı tespit etmek için mikrodenetleyicinin timer/counter özelliği kullanılır. Enkoderin ürettiği palsler, Timer ayarlanarak belirlenmiş olan bir süre boyunca sayılır. Sayma işleminde counter kullanılır. Palslerin sayılmasında yükselen kenar veya düşen kenar tercih edilebilir. Süre sonunda counterden elde edilen değer, enkoderin bir turda üreteceği pals sayısına bölünür. Elde edilen bu yeni değer, milin timer ile belirlenmiş olan süredeki dönme sayısını verir. Bu değer kullanılarak milin açısal hızına ulaşılır. Bu yöntemle elde edilen hız ortalama hızdır.

T yönteminde ise çıkış sinyalinin periyotunu bulabilmek için mikrodenetleyicinin Compare/Capture/PWM (CCP) özelliği kullanılır. Enkoderin çıkışı mikrodenetleyicinin CCP pinine bağlanır. Enkoderin ürettiği ardışık iki palsin kullanıldığı bu yöntemde birinci

pals yakalandığında timer aktif edilir. Ardışık olan ikinci pals yakalandığında ise timer pasif hale getirilir. Timerın bu değeri ve sabit bir süre için elde edilen timer değeri kullanılarak enkoder sinyalinin periyodu bulunur. Bulunan periyot değeri kullanılarak milin açısal hızı hesaplanır. Bu yöntemle elde edilen hız, anlık hızdır. Düşük hız bölgelerinde kullanışlı olan bu yöntem yüksek frekansta çalışan bir mikrodenetleyici kullanmayı gerektirir.

Bu iki yöntemin birleştirildiği M/T yöntemine ilişkin detaylar Li ve ark. (2005), (Lee 2016b), Waheed ve Cai (2016) ile Xia ve ark. (2016) tarafından yapılan ilgili çalışmalarda mevcuttur. Literatürde ölçüm hatalarını azaltmak için değişken hız bölgelerinde bu iki yöntem arasında geçiş yapan çalışmalara (Negrea ve ark. 2011; Ulu ve Parlak 2018) rastlanmıştır. Bu üç yöntemin simülasyon ve deney sonuçlarına göre kıyaslandığı çalışmaları (Negrea ve ark. 2012b; Ulu ve Parlak 2018) sonuçlarına göre yüksek hızlarda M yöntemi, düşük hızlarda T yöntemi, değişken hız bölgelerinde ise M/T yöntemi daha doğru sonuçlar üretmektedir.

Enkoderler, sayısal veya analog çıkış üretirler. Sayısal çıkışlı olanların çıkışları binary kodlu, gray kodlu veya pals şeklinde olabilir. Analog çıkışlılarda ise çıkış aralığı 0-5V veya 0-15V olabilmektedir. Pals çıkışlı olanlarda M veya T yöntemi doğru sonuçlar vermektedir. Ancak Şekil 4.4'deki gibi testere dişi şeklinde analog çıkış veren bir enkoderde bu yöntemler tek başlarına hassas sonuç veremezler. Özellikle düşük hızlarda büyük hatalara neden olurlar.



Şekil 4.4 5V/360° mutlak enkoder çıkış eğrisi.

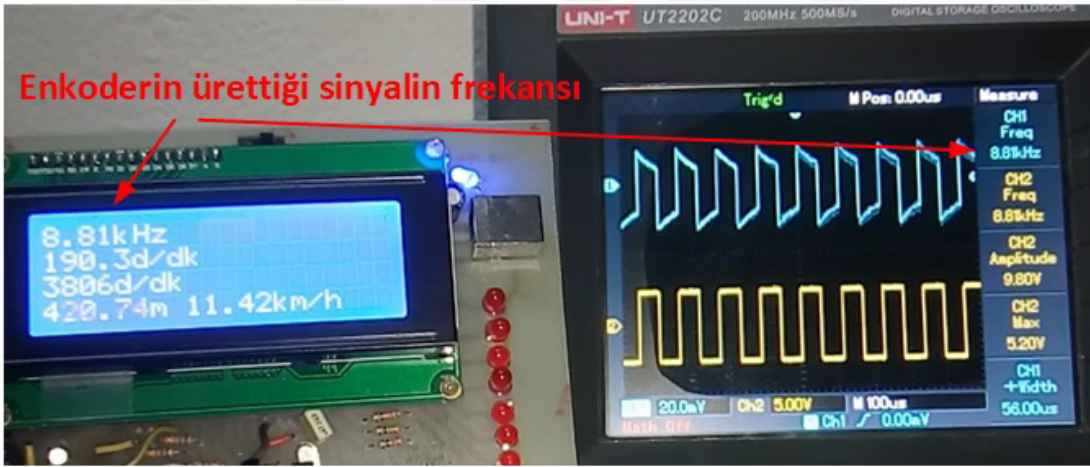
Bu hataların giderilmesine yönelik yapılan çalışmalara ulaşmak için literatür taraması yapılmıştır. Yapılan taramada enkoderler ve ölçüm yöntemlerine yönelik farklı yaklaşımlara rastlanmıştır. Örneğin Negrea ve ark. (2012a), artımsal enkoder kullanılarak yapılan hız ölçümlerindeki hataların azaltılması ve kompanze edilmesine yönelik bir çalışma sunmuştur. Zhu ve Yu (2011), açısal hız ölçümünde kullanılacak enkoderin

fiziksel olarak bağlantısının mümkün olmadığı durumlarda video ile ölçüm tekniğini tanıtmışlardır. Lee ve ark. (2016), bir milin açısal konumunun ölçümünde iki tane mutlak enkoder kullanmışlardır. Ancak analog çıkış veren mutlak enkoderlerde ölçüm hatasının en aza indirildiği bir çalışmaya rastlanamamıştır.

#### 4.2.2 Artımsal enkoderle hız ölçümü

Hız ölçümünde iki farklı enkoder kullanılmıştır. Bunlardan ilki Opkon isimli firma tarafından üretilmiş olan PRI 50R8 model artımsal enkoder olup 1 turda kare dalga şeklinde 1000 pals üretmektedir.

Bu enkoderle yapılan hız ölçümlerinde detayları yukarıda verilen M yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğu LCD ekrandaki veriler ve osilaskop ile teyit edilmiştir. Örnek bir ölçme işleminden alınan görüntü Şekil 4.5’de verilmiştir. Şekil 4.5’deki frekans bilgileri incelendiğinde osilaskoptan okunan frekansla tasarlanan geçici karttan okunan frekansın örtüştüğü görülmektedir.



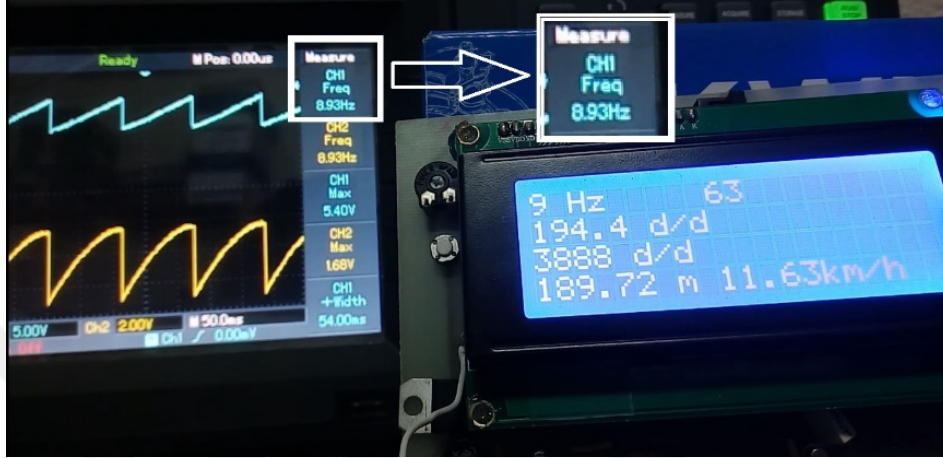
Şekil 4.5 Artımsal enkoderle yapılan hız ölçüm deneylerinden alınan örnek görüntü.

#### 4.2.3 Mutlak enkoderle hız ölçümü

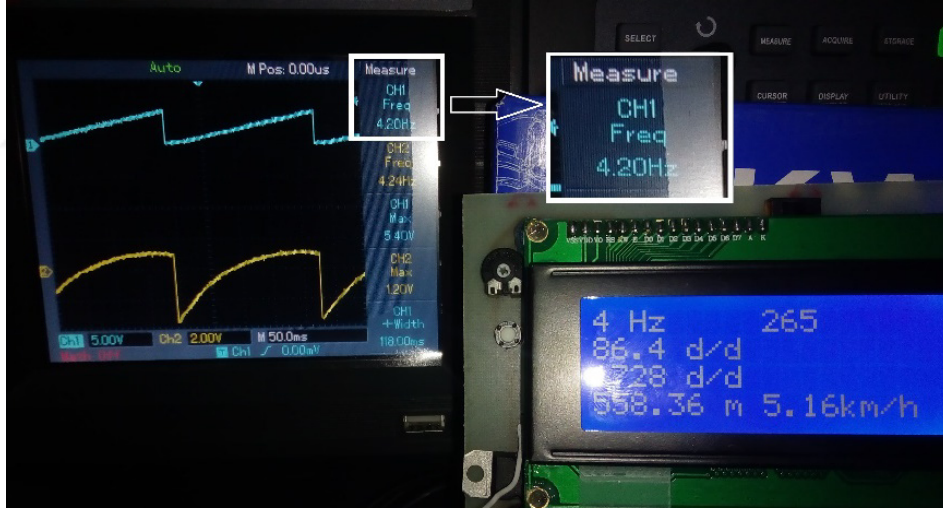
Kullanılan ikinci enkoder ise yine aynı firma tarafından üretilmiş olan MRV50R8ANL5V360 kodlu mutlak enkoder olup, Şekil 4.4’te de gösterildiği gibi bir turda ( $360^\circ$ ’de) 0 V’den 5 V’a kadar artış gösteren analog bir çıkış üretmektedir.

Bu enkoderle yapılan ölçümlerde öncelikle M yöntemi tercih edilmiştir. Ancak bu yöntemle yapılan ölçme işleminde virgülden sonraki hassasiyet sağlanamamıştır. Bu

yöntem kullanılarak yapılmış olan bir ölçüm işleminden alınmış iki adet görüntü Şekil 4.6'da verilmiştir. Tüm deneylerde osilaskopun birinci kanalı doğrudan enkoder çıkışına bağlanmıştır. İkinci kanalı ise mikrodnetleyicinin zarar görmesini engellemek için mikrodnetleyicinin ADC girişine bağlanan 4.7V'lık Zener diyotun katot ucuna bağlanmıştır.



(a)



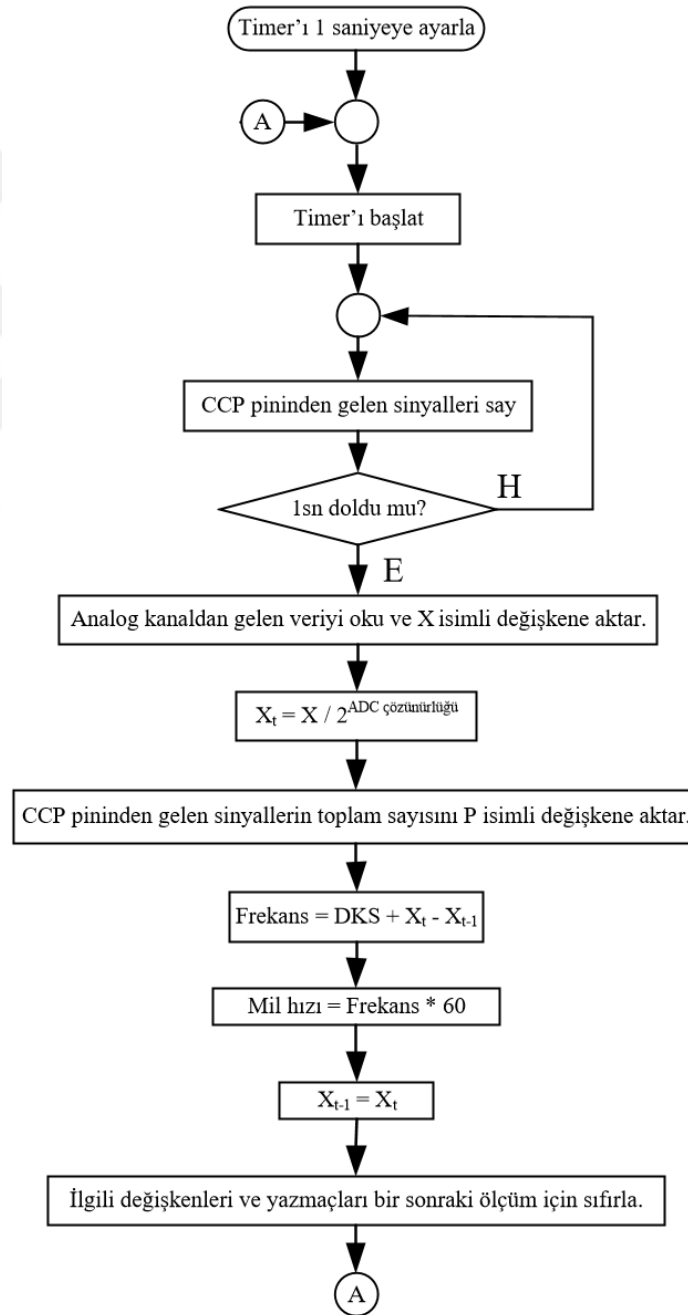
(b)

**Şekil 4.6** Mutlak enkoderde sadece M yöntemi kullanılarak yapılan ölçümlerden alınan örnek görüntüler  
**(a)** Osilaskop 8.93 Hz, kart 9 Hz **(b)** Osilaskop 4.20 Hz, kart 4 Hz.

Şekil 4.6'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde LCD ekrandaki frekans ile osilaskop ekranındaki frekansın örtüşmediği açıkça görülmektedir. Şekil 4.6.a'da % 0.78, Şekil 4.6.b'de % 4,76'lık bir ölçme hatası bulunmaktadır. Dolayısıyla Şekil 4.4'teki gibi bir analog çıkış veren mutlak enkoderlerde sadece M yöntemi kullanılarak doğru bir ölçüm yapmak mümkün değildir.

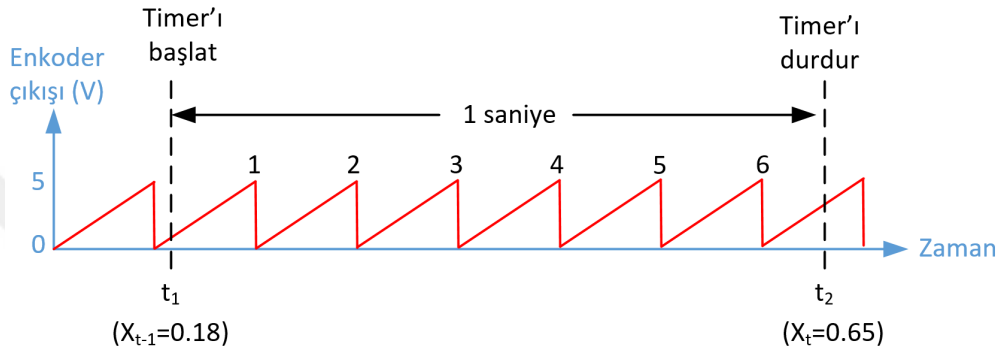


Bu tür enkoderlerle yapılan ölçümlerdeki hatayı minimize etmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde M yöntemine ilave olarak analog değer de dikkate alınmıştır. Bu nedenle mutlak enkoderin çıkışı, kullanılacak mikrodenetleyicinin hem CCP pinine hem de analog-dijital dönüştürücü (analog to digital converter-ADC) pinine bağlanmıştır. Öncelikle 1 saniye boyunca enkoder çıkışındaki pals düşen kenar tetiklemesine göre sayılmıştır. Süre bittikten hemen sonra enkoderin o anki analog çıkış değeri analog kanal aracılığıyla okunmuştur. Ardından bu analog değer işlenerek pals sayısına eklenmiştir. Buna ilişkin akış diyagramı Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7 Önerilen yeni hız ölçüm metodu M+ADC'nin akış şeması.

Şekil 4.4 ve 4.7’den de anlaşılacağı üzere enkoder çıkışına bağlanacak osilaskoptan okunacak frekans bilgisi, enkoderin saniyedeki devir sayısını verecektir. Dolayısıyla enkoderin bağlandığı milin dakikadaki devir sayısını hesaplamak için bu değer 60 ile çarpılmaktadır. Önerilen yöntemin daha iyi anlaşılması için örnek bir hesaplama yapılacaktır. Bu hesaplamada Şekil 4.8’deki sinyal kullanılacaktır. Şekil 4.8’deki  $X_t$  ve  $X_{t-1}$  değerleri 0 ile 1 arasında bir değer almakta olup enkoderin bağlandığı milin açısal konumu hakkında % cinsinden bilgi verirler.



Şekil 4.8 Örnek hesaplamada kullanılacak çıkış sinyali.

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, enkoderin 1 saniye boyunca ürettiği sinyallerdeki toplam düşen kenar sayısı (DKS) 6’dır. Timerin durdurulduğu  $t_2$  noktasındaki  $X_t$  değerinin 0.65 olduğunu kabul edelim. Timerin başlatıldığı  $t_1$  noktasındaki  $X_{t-1}$  değerinin ise 0.18 olduğunu varsayalım. Buna göre enkoderin ürettiği bu sinyalin frekansı ( $F$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

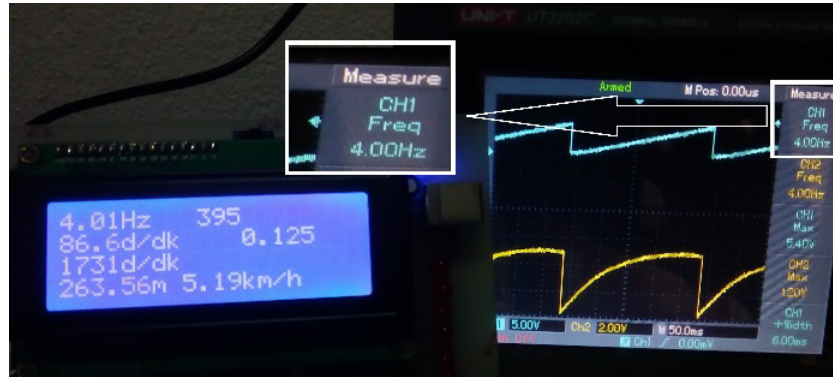
$$F = DKS + X_t - X_{t-1} = 6 + 0,65 - 0,18 = 6,47Hz \quad (4.1)$$

Enkoderin bağlandığı milin devir sayısı ( $N$ ) ise (4.2)’deki gibi hesaplanır.

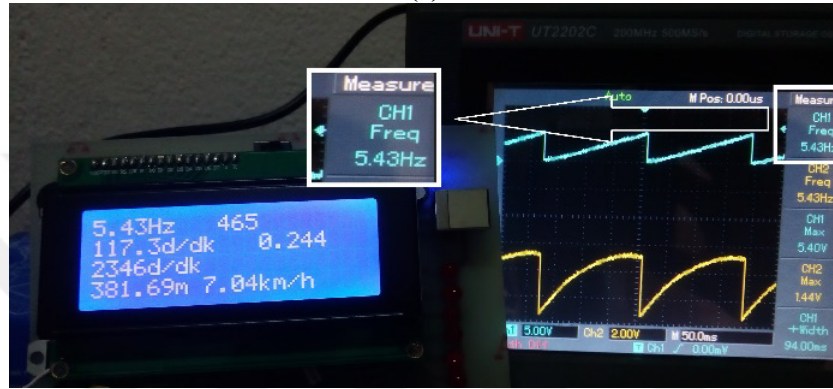
$$N = F \cdot 60 = 6,47 \cdot 60 = 388,2 \text{ d/dk} \quad (4.2)$$

Eğer sadece M yöntemi kullanılarak ölçüm yapılsaydı, sinyalin frekansı 6 Hz, devir sayısı da 360 d/dk olarak bulunacaktı. Dolayısıyla ölçümde % 7,8’lik bir bağıl hata ortaya çıkacaktı.

Önerilen M+ADC yöntemi kullanılarak yapılan bazı deneylerden alınan görüntüler Şekil 4.9’da verilmiştir. Elde edilen tüm deney sonuçları ise Tablo 1’de sunulmuştur.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.9** Önerilen M+ADC yönteminin kullanıldığı ölçümler  
 (a) Osilaskop 4.00 Hz, kart 4.01 Hz (b) Osilaskop ve kart 5.43 Hz (c) Osilaskop ve kart 7.35 Hz  
 (d) Osilaskop ve kart 8.89 Hz.

**Tablo 4.1** Deney sonuçları.

Kullanılan yöntem	Okunan Frekans (Hz)		Milin Gerçek Hızı (d/dk)	Milin Ölçülen Hızı (d/dk)	Mutlak Hata (d/dk)	Bağlı Hata (%)
	Osilaskoptan	Karttan				
M	8,93	9	535,8	540	4,2	0,78
M	8,81	8	528,6	480	48,6	9,19
M	4,2	4	252	240	12,0	4,76
M+ADC	4	4,01	240	240,6	0,6	0,25
M+ADC	5,43	5,43	325,8	325,8	0,0	0,00
M+ADC	6,58	6,59	394,8	395,4	0,6	0,15
M+ADC	7,35	7,35	441	441	0,0	0,00
M+ADC	8,89	8,89	533,4	533,4	0,0	0,00

Tablo 4.1 incelendiğinde sadece M yöntemi kullanılarak yapılan ölçümlerdeki en büyük bağlı hatanın % 9.19 olduğu görülmektedir. Ortalama bağlı hata ise % 4.91 olarak hesaplanmıştır.

Önerilen M+ADC yöntemi kullanılarak yapılan ölçümlerdeki en büyük bağlı hata ise % 0,25 olarak gerçekleşmiştir. Ortalama bağlı hata ise % 0,08 olarak hesaplanmıştır.<sup>1</sup>

#### 4.2.4 Hall sensör ve mıknatıslar kullanılarak yapılan hız ölçümü

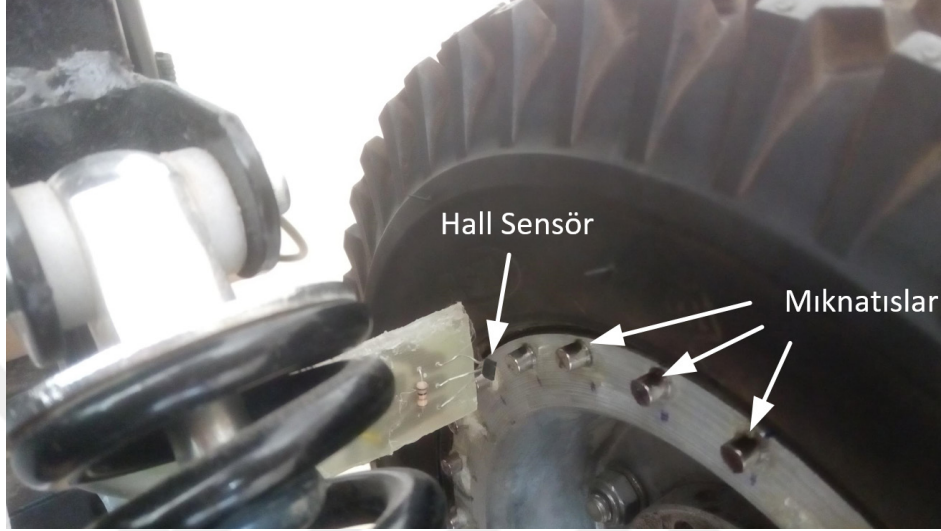
Laboratuvarda yapılacak testlerde aracın ve motorun hız bilgileri, enkoderin tasarlanan test platformuna monte edilmesiyle elde edilecektir. Ancak dış ortam testlerinde böyle bir kullanım söz konusu olmayacaktır. Ölçüm, sadece enkoderin tekerlek miline sabitlenmesiyle sağlanabilir. Bu ise tekerlek milinde ilave değişiklikler gerektirecektir.

Aracın fiziksel yapısında herhangi bir değişiklik yaparak hız ölçümünü gerçekleştirmek yerine Hall sensör ve mıknatıslar kullanarak ölçümün yapılması tercih edilmiştir. Bu amaçla Allegro isimli firma tarafından üretilen ve 3,8-24 V aralığında çalışabilen A1101 serisi Hall sensör kullanılmıştır. Dolayısıyla tasarlanan elektronik kartta köklü bir değişiklik yapmaya gerek kalmadan aynı kart kullanılabilir.

Anahtar olarak çalışan bu sensörlerin çıkışları normalde lojik-1'dir. Ancak mıknatısın doğru kutbu sensöre yaklaştırılırsa çıkışları lojik-0 olur. Hız ölçümündeki hatayı olabildiğince minimum yapmak için mıknatısları tekerleğe sık yerleştirmek gerekir. Fakat mıknatıslar arasındaki mesafenin belli bir değer altına inmesi, sensörün hatalı ya da hiç anahtarlama yapmamasına neden olmaktadır. Yapılan testlerde araç

<sup>1</sup> Bu bölümde tanımlanan yeni hız ölçüm yöntemi makale haline getirilmiş olup, SCI-E kapsamındaki ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEKNIKA isimli uluslararası hakemli dergide 2020 yılının ilk çeyreğinde yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.

üzerindeki tekerlek için en uygun mıknatıs sayısının 24 olduğu görülmüştür. Bu nedenle arka sağ tekerlek yüzeyine 24 adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Sensör ise mıknatısla aynı hizaya geldiğinde aralarındaki mesafe 1cm'nin altında kalacak şekilde tekerleğe en yakın yere yerleştirilmiştir. Yerleştirilen sensör ve mıknatıslar Şekil 4.10'da görülmektedir.



**Şekil 4.10** Hall sensör ve mıknatısların yerleşimi

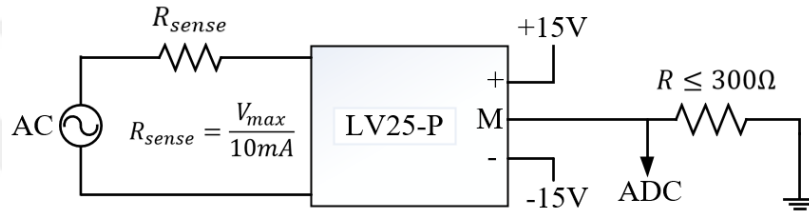
Hall sensör-mıknatıs kombinasyonu ile yapılacak hız ölçümünde kullanılacak yöntem de artımsal enkoderde olduğu gibi M yöntemidir. Dolayısıyla artımsal enkoder ya da Hall sensör kullanılarak yapılacak hız ölçümünde ölçüm algoritması temelde aynı olacaktır. Tek fark; kullanılacak artımsal enkoder bir turda 1000 pals üretirken Hall sensör-mıknatıs kombinasyonunda bu sayının 24 olmasıdır. Dolayısıyla hem mikrodenetleyici hem de arayüz yazılımında buna yönelik küçük revizyonlar yapılmıştır.

### 4.3 Akü Ve Motor Akımlarının Ölçümü

Akım ölçümü için ACS712ELCTR-30A-T tipi akım sensörü seçilmiştir. Bu sensörler çift yönlü olarak 30 A'e kadar sorunsuzca ölçüm yapabilirler. 5 V ile beslenen bu sensörler akımla orantılı olarak 0-5 V aralığında değişen bir analog çıkış verirler. Bu değer pozitif yönlü akımlarda 2,5-5 V, negatif yönlü akımlarda ise 2,5-0 V aralığındadır. Komple bir modül olarak tedarik edilebildiği için bu sensörün çıkışını tüm verilerin okunacağı kartın herhangi bir analog girişine doğrudan bağlamak, ölçüm için yeterli olacaktır. Akü ve motor akımı ölçüleceği için bu sensör modülünden iki adet kullanılacaktır.

#### 4.4 Akü Ve Motor Gerilimlerinin Ölçümü

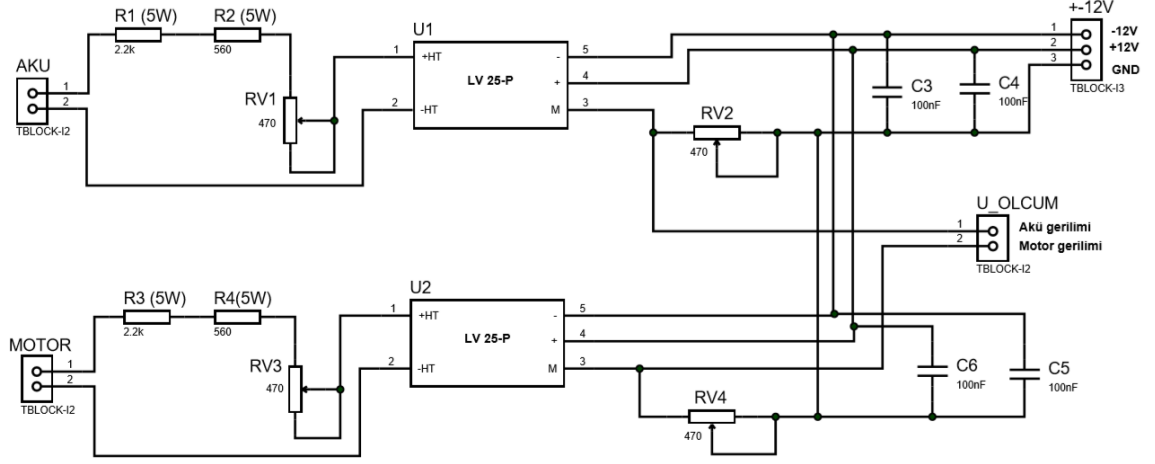
Gerilim ölçümünde hem sıcaklığın etkisini minimize etmek hem de yalıtım sağlamak amacıyla LEM firmasının ürettiği LV25-P tipi gerilim sensörü seçilmiştir. AC ve DC gerilim ölçebilen ve simetrik beslemeye ihtiyaç duyan bu sensör, girişindeki gerilimin büyüklüğüne göre değişen bir çıkış akımı üretir. Bu sensörün düşük gerilim tarafına bağlanan direncin uçlarındaki gerilim, kullanılacak mikrodenetleyicinin herhangi bir analog girişine bağlanarak sensör girişindeki gerilim kolayca ölçülebilir. Bu sensörün tipik bağlantı şeması Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.11 LV25-p gerilim sensörünün tipik bağlantı şeması.

Şekil 4.11’den de anlaşılacağı üzere gerilim sensöründe ölçüm aralığının belirlenmesi ve dirençlerin ona göre seçilmesi gerekir. Bu çalışmada ölçülmesi planlanan gerilim düzeyi PMDC motor ile yapılacak deneylerde hiçbir zaman 30 V’u geçmeyecektir. Ancak PM senkron motor kullanımında 220 V’luk bir inverter gerilimi söz konusudur. Dolayısıyla her iki motor ile yapılacak olan farklı deneyler için 2 farklı gerilim okuma kartı tasarlanması gerekmiştir. Ayrıca gerilim sensörü simetrik beslemeye ihtiyaç duyduğu için gerilim ölçümünde kullanılacak devrelerin ana kart üzerinde değil de ayrı bir kart olarak tasarlanması daha doğru bir tercih olarak görülmüştür. Akü-motor ve akü-inverter gerilimlerin okunması için her kartta bu sensörlerden iki adet kullanılmıştır.

PMDC motorlu deneylerde gerilim ölçmek için tasarlanan ve gerçekleştirilen elektronik kartın açık devre şeması ve nihai durumu Şekil 4.12’de görülmektedir.



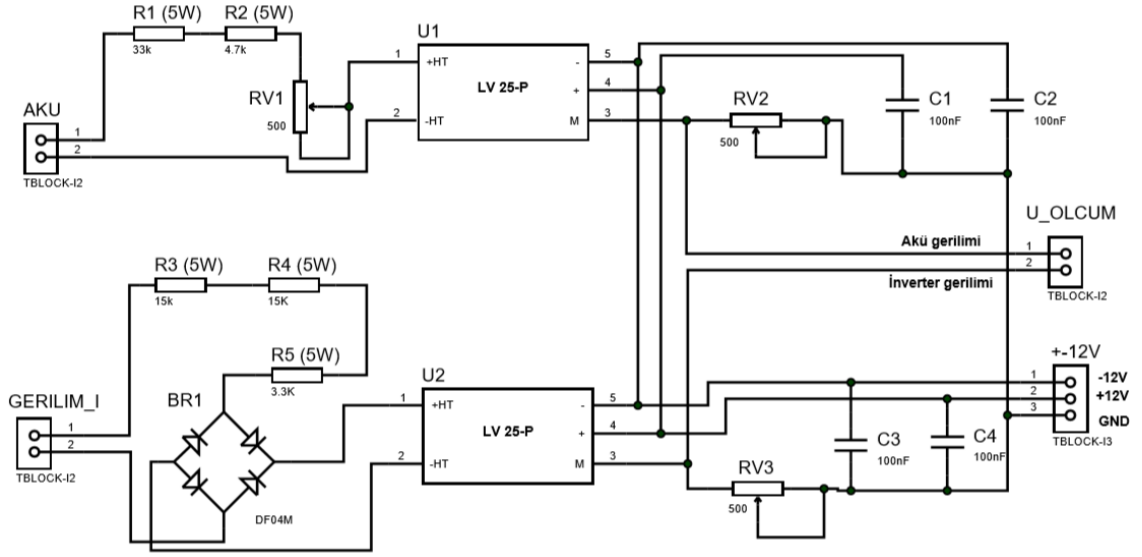
(a)



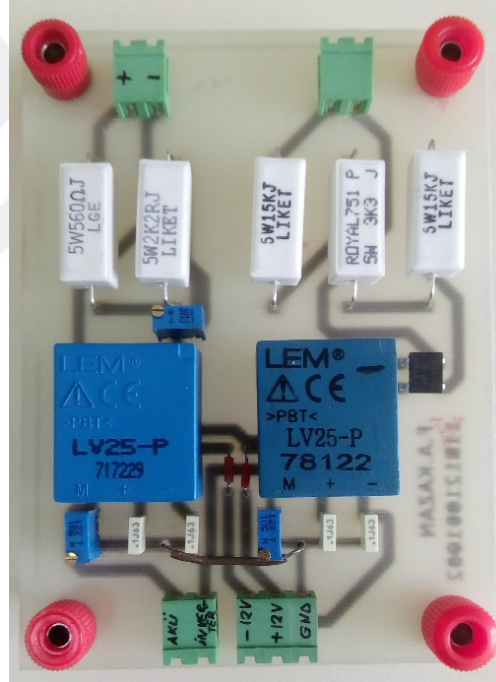
(b)

**Şekil 4.12** PMDC motorlu deneylerde gerilim ölçmek için tasarlanan ve gerçekleştirilen devre kartı  
**(a)** Açık devre şeması **(b)** Kartın nihai hâli.

PM senkron motorlu deneylerde gerilim ölçmek için tasarlanan ve gerçekleştirilen devre kartı ise Şekil 4.13’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.13 PM senkron motorlu deneylerde gerilim ölçmek için tasarlanan ve gerçekleştirilen devre kartı  
(a) Açık devre şeması (b) Kartın nihai hâli.

#### 4.5 Deney Ortamı Ve Motor Yüzey Sıcaklıklarının Ölçümü

Sıcaklık ölçümleri için 2 adet DS18B20 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Bunlardan birisi motorun yüzey sıcaklığını ölçmek için motor yüzeyine temas edecek şekilde



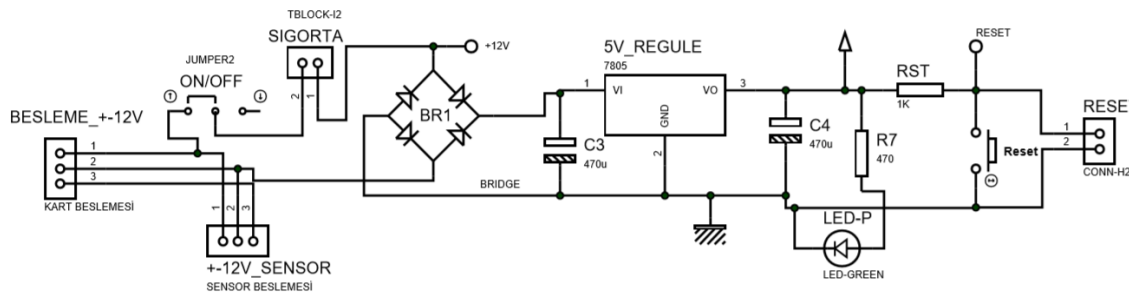
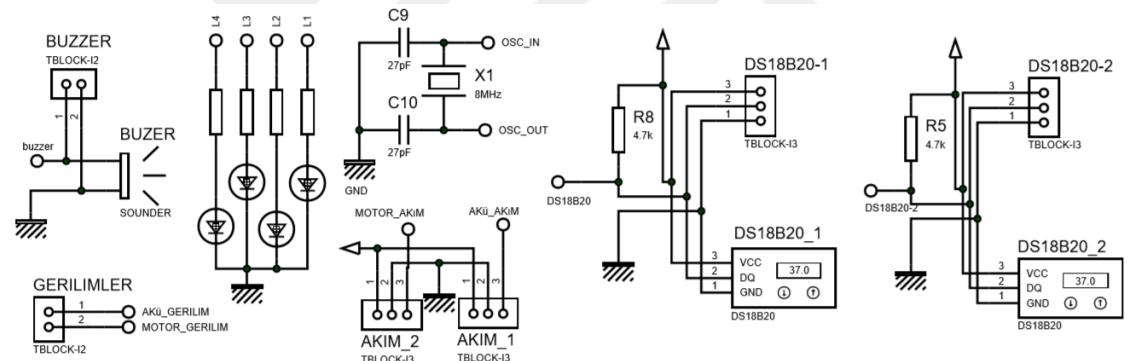
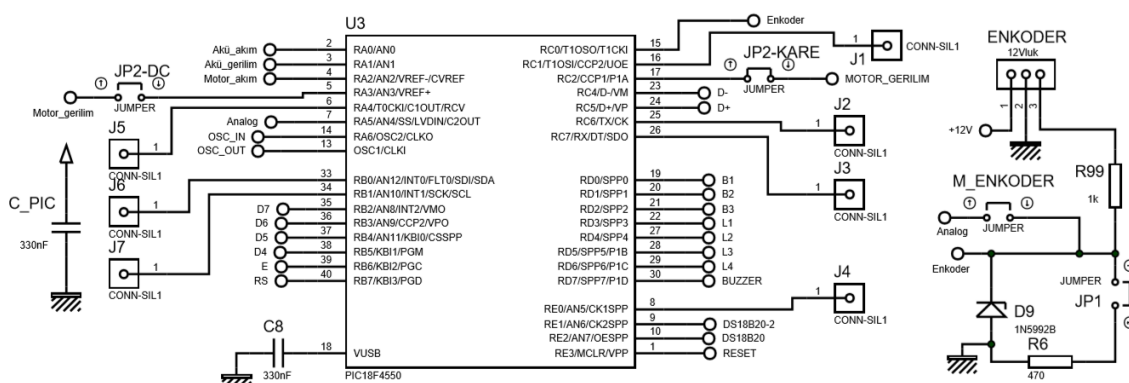
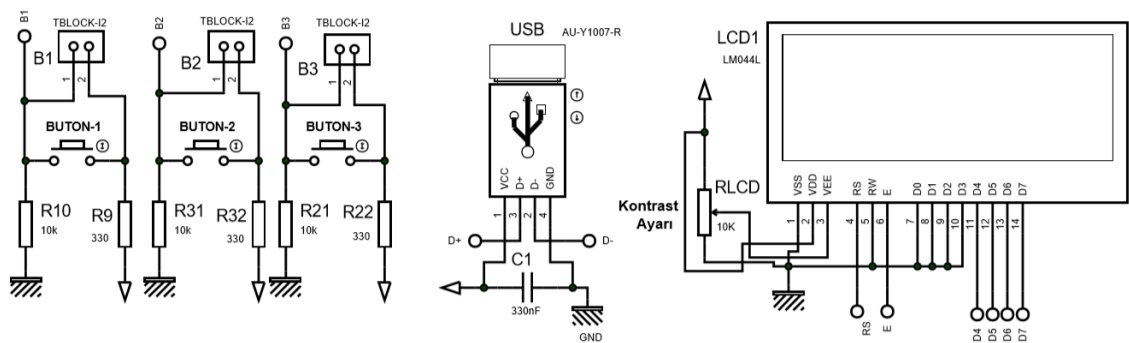
yerleştirilmiştir. Diğeri ise deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığını ölçmek içindir ve herhangi bir yere temas ettirilmemiştir.

#### 4.6 Veri Okuma Kartı

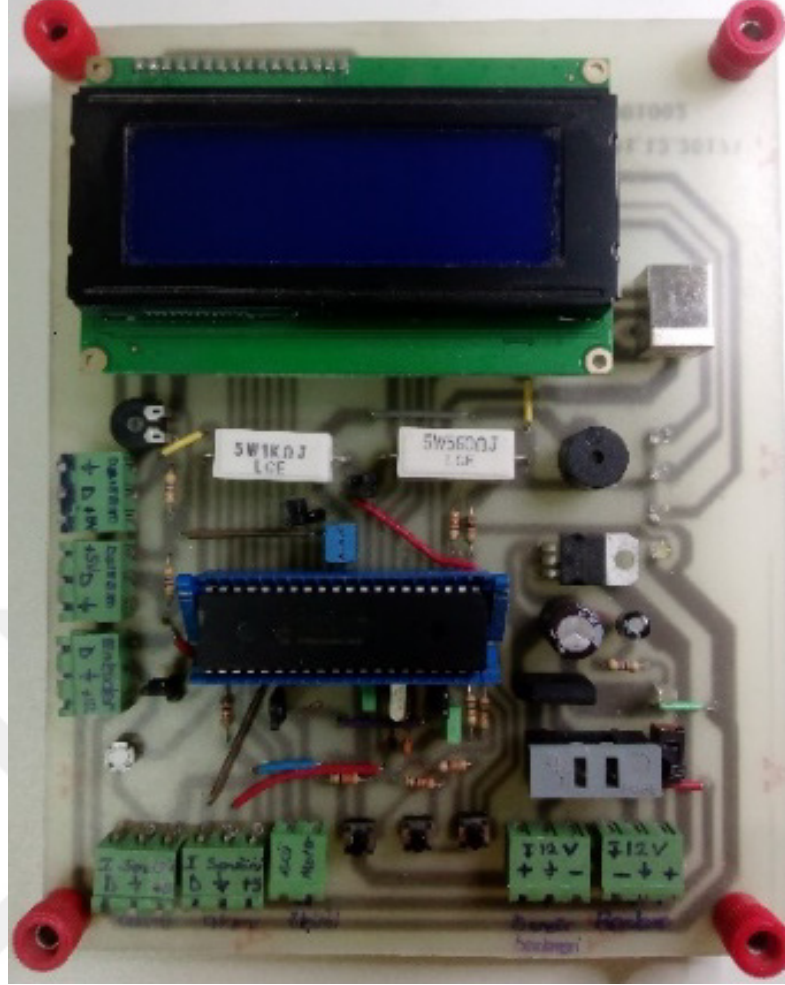
Tezin deneysel çalışma bölümündeki araçta iki farklı motor kullanılacağından testler sırasında farklı sayıda farklı büyüklükler okunacaktır. Dolayısıyla PMDC motorlu ve PM senkron motorlu testler için farklı veri okuma kartlarının tasarlanması gerekmektedir.

Öncelikle PMDC motorlu testlerde kullanılmak üzere veri okuma kartı tasarlanmıştır. Söz konusu kart 2 adet DC gerilim, 2 adet DC akım, 2 adet sıcaklık ve 1 adet hız okunmasını sağlayacak olup verilerin hem LCD ekranda görünmesine hem de gerçek zamanlı olarak USB üzerinden bilgisayara aktarılmasına imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Mikrodenetleyici olarak PIC18F4550 tercih edilmiş olup 48 MHz'de çalıştırılmaktadır. Akımların ve gerilimlerin örnekleme için iki ayrı döngü oluşturulmuştur. Akü ve PMDC motora ait akımlar bir döngüde, gerilimler diğer döngüde 1000'er kez örnekleme yapılmıştır. Gerilimlerin okunduğu döngü, akımların okunduğu döngünün hemen ardından gelmektedir. Sıcaklık ölçümlerinde herhangi bir örnekleme yapılmamış olup akım ve gerilim ölçümlerinin ardından anlık olarak ölçülmüştür. Hız ölçümünde mikrodenetleyicinin Timer kesmesi kullanılmıştır. Bu örnekleme sayısına göre tüm verilerin okunması, değerlendirilmesi ve bunların bilgisayara aktarılması için geçen süre 375 ms'dir.

Söz konusu işlemleri gerçekleştirilmesi için tasarlanan ve gerçekleştirilen elektronik kartın devre şemaları ve nihai durumu Şekil 4.14'de görülmektedir.



(a)

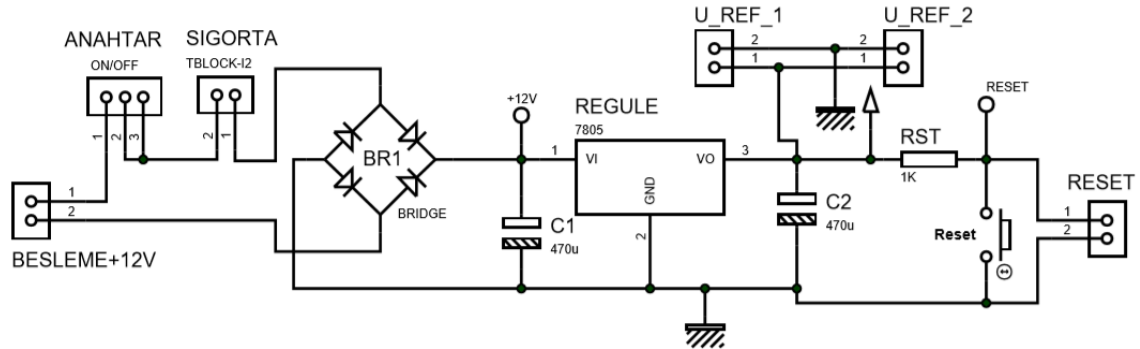
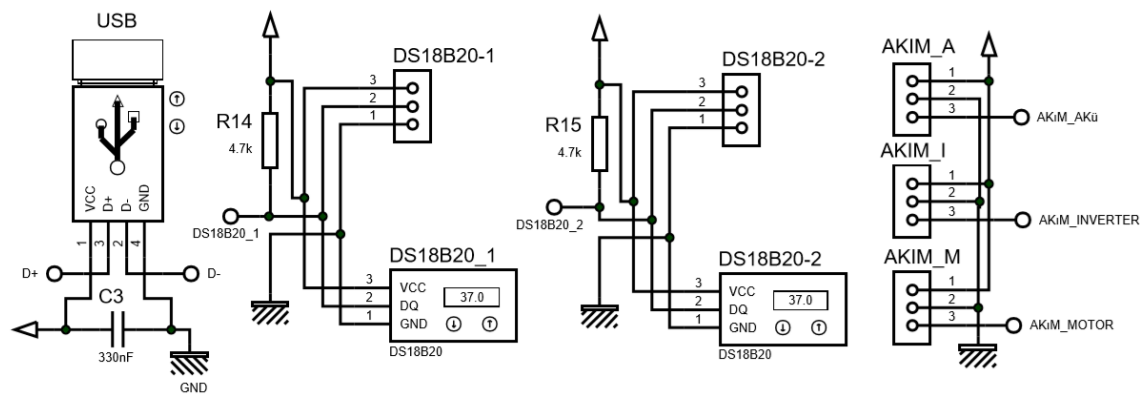
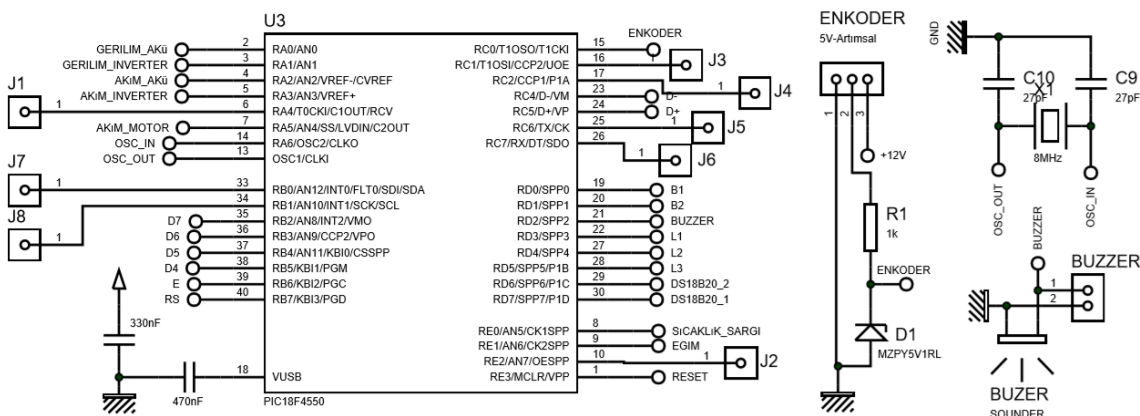
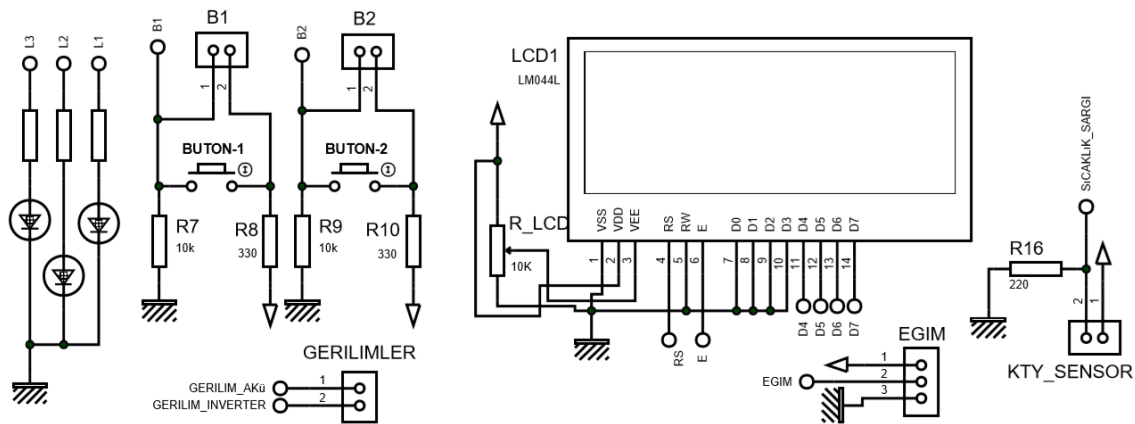


(b)

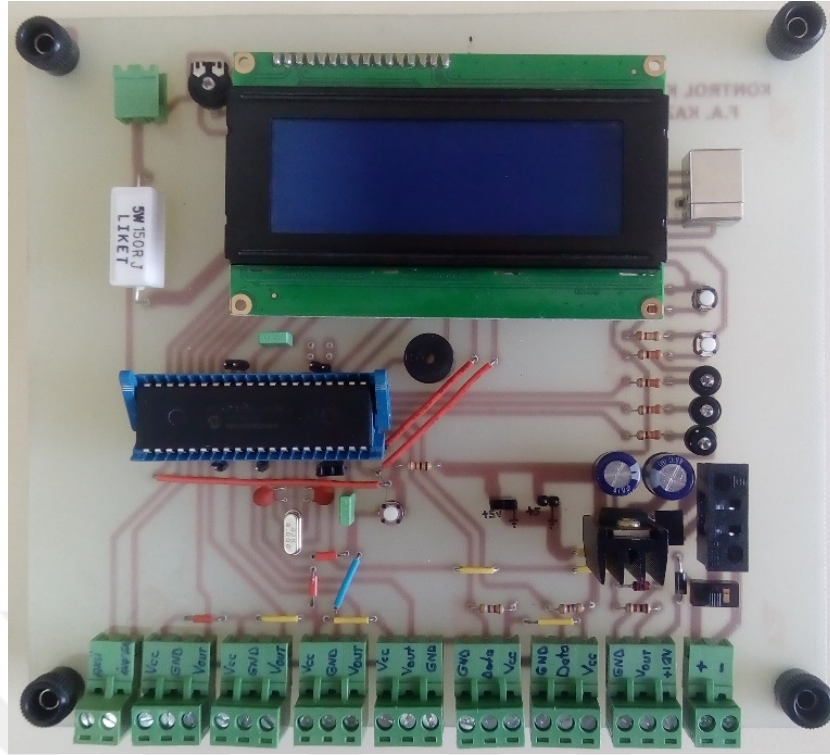
**Şekil 4.14** PMDC motorlu aracın testleri için tasarlanan ve gerçekleştirilen veri okuma kartı.  
(a) Açık devre şeması (b) Kartın nihai hâli.

PM senkron motorlu deneyler için tasarlanan veri okuma kartında AC ve DC olmak üzere 2 adet gerilim bilgisi, 2 tanesi AC olmak üzere 3 adet akım bilgisi okunacaktır. Sıcaklık ölçümleri diğer kartta olduğu gibi bu kartta da yapılacaktır. Hız okuma girişi önceki kartta olduğu gibi bu kartta da bulunmaktadır. Verilerin okunması, LCD ekranda gösterilmesi ve gerçek zamanlı olarak USB üzerinden bilgisayara aktarılması bir önceki kartta olduğu gibi bu kartta da mevcuttur. Mikrodenetleyici olarak yine PIC18F4550 tercih edilmiş olup burada da 48 MHz'de çalıştırılmaktadır.

PM senkron motorlu araç testleri için tasarlanan veri okuma kartının devre şemaları ve nihai durumu Şekil 4.15'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.15 PM senkron motorlu aracın testleri için tasarlanan ve gerçekleştirilen veri okuma kartı.  
(a) Açık devre şeması (b) Kartın nihai hâli.

#### 4.7 Veri Okuma Arayüz Programı

Veri okuma kartının göndereceği verileri almak, bilgisayarda görüntülemek, depolamak ve gerekli olan bazı verilerin eş zamanlı olarak grafiklerini ekranda çizdirmek için Visual C# programında arayüz tasarlanmıştır. Gerçekleştirilecek test sistemi farklı güç, farklı tekerlek çapları ve farklı redüktör oranlarına sahip PMDC ve PM senkron motorlu scooter modellerine uygun olarak tasarlanmıştır.

Yapılan tasarımlarda her iki motor türünde de girilmesi gereken parametrelerin bulunduğu bir arayüz bölümü bulunmaktadır. Bu bölümler Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu arayüzlerde aküleri deney sırasında derin deşarjdan korumak veya akü gerilimi belli bir değere düşüncüye kadarki süreci inceleyebilmek için akü gerilimi ikaz düzeyi belirlenebilmektedir. Akü gerilimi girilen bu değere düştüğünde, operatörün sesli ikaz ile uyarılması sağlanmıştır. Yine motorun aşırı ısınmasını engellemek veya belli bir değere ulaşıncaya kadarki süreci inceleyebilmek için, izin verilen maksimum motor sıcaklığı kısmı eklenmiştir. Ayrıca, kullanıcı ağırlığının aracın ölçülen parametreleri üzerindeki

etkisini incelemek için deney sırasında araç üzerine oturan kişinin ağırlık bilgisinin girilmesine de imkân sağlanmıştır.

GİRİLECEK PARAMETRELER	
Motorun redüktör oranı (1/x):	20
Aracın tekerlek çevresi (cm):	100
Yolcu Ağırlığı (kg):	75
DC motorun tork sabiti:	0.05
Maksimum motor sıcaklığı (C):	55
Akü gerilimi ikaz düzeyi (V):	23

(a)

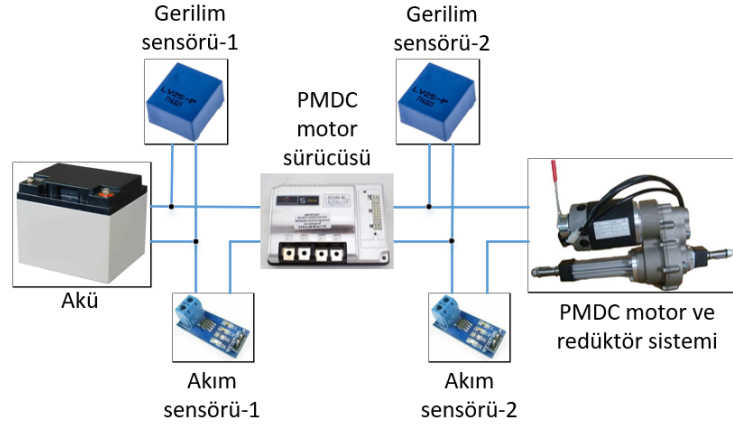
GİRİLECEK PARAMETRELER	
Motorun redüktör oranı (1/x):	20
Aracın tekerlek çevresi (cm):	100
Yolcu Ağırlığı (kg):	92.0
Maksimum motor sıcaklığı (C):	55.0
Akü gerilimi ikaz düzeyi (V):	23.0

(b)

**Şekil 4.16** Tasarlanan arayüzde girilmesi gereken parametrelerin bulunduğu bölümler  
(a) PMDC motorlu araç için (b) PM senkron motorlu araç için.

Motorun torkunu ve bununla ilişkili diğer bazı parametreleri hesaplayabilmek için tork sensörü kullanmak gerekir. Ancak PMDC motorlu klasik engelli araçlarında motor doğrudan redüktöre bağlıdır. Dolayısıyla PMDC motor ile redüktör arasına tork sensörü bağlamak, test/kontrol işlemi için oldukça zahmetli ve pahalı bir işlemdir. Tork sensörü yerine tork sabitini kullanmak daha pratik ve ucuz bir yöntemdir. Bu motorların ürettiği tork endüvi akımı ile tork sabitinin çarpımına eşittir. Dolayısıyla anlık olarak ölçülen motor akımı ile önceden bilinen tork sabitini çarpmak, anma yükünde çalışan bir PMDC motorun üreteceği torku hesaplamak için yeterlidir. Bu nedenle PMDC motorlu araçlar için tasarlanan arayüzde girilecek parametreler arasına araç üzerindeki motorun tork sabiti değeri de eklenmiştir. Ancak bilindiği gibi tork sabiti her koşulda sabit olmayıp sıcaklık ve diğer faktörlerden dolayı olarak etkilenen ve değişebilen bir değerdir. Test edilen araçtaki motora ait bu değer, Ek-1'deki veriler kullanılarak eğri uyurma yöntemiyle elde edilen ve tasarlanan arayüze eklenen bir denklem yardımıyla motor akımına bağlı olarak sürekli güncellenmiştir. Böylece test edilen araçtaki PMDC motorun anma yükünün altında çalışması durumunda sürekli güncellenen bir tork sabiti kullanılarak daha hassas bir ölçüm yapılması sağlanmıştır.

Akım ve gerilim sensörlerinin sistemdeki konumlarının bilinmesi, arayüzlerde “ölçülen ve hesaplanan değerler” bölümünde verilecek bazı parametrelerin hesaplanma yönteminin anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. PMDC motorlu araç için tasarlanan veri okuma kartında akım ve gerilim sensörlerinin bağlantı yerlerine ilişkin verilen açıklayıcı blok şema Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17 PMDC motorlu araç için tasarlanan sistemde akım ve gerilim sensörlerinin yerleri.

Enkoderin ürettiği sinyalin frekans bilgileri; tasarlanan arayüzün Şekil 4.16'da belirtilen bölümünden girilen motorun redüktör oranı, tork sabiti ve tekerlek çevresi değerleri; Şekil 4.17'de gösterilen noktalardan okunan akım ve gerilim değerleri kullanılarak motor devir sayısı, motorun ürettiği tork, motorun mil gücü, motor ve sürücü verimleri, aracın anlık hızı ve araç kullanılmaya başlandığı andan itibaren alınan toplam yol bilgileri tasarlanan arayüzde test işlemi süresince anlık olarak hesaplatılmaktadır. Motorun dakikadaki devir sayısı diğer parametrelerin hesaplanmasında anahtar rol oynadığı için ilk önce bu büyüklük hesaplanmalıdır. Ancak motorun devir sayısını hesaplayabilmek için önce tekerlek devir sayısının hesaplanması gerekir. Buna göre tekerleğin dakikadaki devir sayısı:

$$N_w = \frac{p_u \cdot 60 \cdot C_s}{1000 \cdot C_w} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'teki  $N_w$  tekerlek devir sayısını,  $p_u$  enkoderin 1 saniyede ürettiği toplam pals sayısını,  $C_s$  cm cinsinden enkoderin bağlandığı silindirin çevresini,  $C_w$  cm cinsinden tekerlek çevresini ifade etmektedir. Paydadaki 1000 sayısı ise kullanılan enkoderin 1 turda ürettiği pals sayısıdır. Redüktör oranı ( $p_g$ ) dikkate alındığında motorun dakikadaki devir sayısı ( $N_m$ ):

$$N_m = N_w \cdot p_g \quad (4.4)$$

Kullanılan enkoderin 1 turda 1000 pals ürettiği hatırlanacak olursa, enkoderin bir saniye boyunca üreteceği toplam palsin 1000'de 1'i, enkoderin bağlandığı silindirin saniyedeki tur sayısına ( $N_s$ ) eşit olacaktır. Dolayısıyla aracın aldığı güncel toplam yolu

( $X_t$ ) bulabilmek için öncelikle 1 saniyede aldığı yol ( $X_s$ ) hesaplanmalıdır. Buna göre aracın metre cinsinden 1 saniyede aldığı yol (4.5)'deki gibi hesaplanır.

$$X_s = \frac{N_s \cdot C_s}{100} \quad (4.5)$$

O ana kadar alınan toplam yola ( $X_{t-1}$ ) bir saniyede alınan yol değeri eklenerek güncel toplam yol bilgisi elde edilir. Buna göre her saniye güncellenen toplam yol (4.6)'deki gibi hesaplanır.

$$X_t = X_{t-1} + X_s \quad (4.6)$$

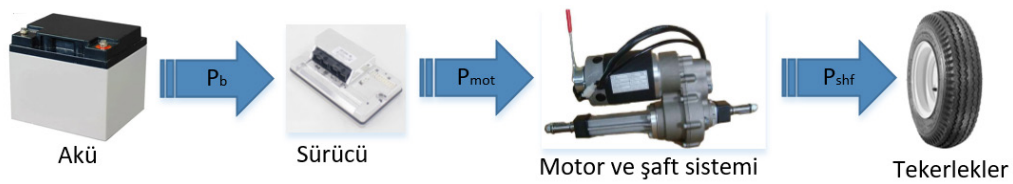
Bu durumda aracın km/h cinsinden anlık hızı:

$$V = X_s \cdot 3,6 \quad (4.7)$$

PMDC motorlu engelli araçlarında motorun ürettiği torku ( $T_m$ ) hesaplamak için tork sabiti ( $K_t$ ) ve motor akımı ( $I_a$ ) yeterlidir. Buna göre motorun ürettiği tork:

$$T_m = K_t \cdot I_a \quad (4.8)$$

PMDC motorlu engelli araçta motor ve sürücü dışındaki elektrikli donanımların (far, korna, sağa/sola dönüş sinyalleri vb.) kullanılmadığı durum için güç akış diyagramı Şekil 4.18'de verilmiştir.



**Şekil 4.18** PMDC motor ve sürücü dışındaki elektrikli ekipmanların kullanılmadığı durumdaki güç akış diyagramı.

Güç akış diyagramından da anlaşılacağı üzere, yüzde cinsinden motor verimini ( $\eta_{mot}$ ) ve sürücü verimini ( $\eta_d$ ) hesaplayabilmek için öncelikle aküden çekilen güç ( $P_b$ ), motorun çektiği güç ( $P_{mot}$ ), sürücünün harcadığı güç ( $P_d$ ) ve motorun mil gücü ( $P_{shf}$ ) hesaplanmalıdır. Redüktördeki sürtünmeden kaynaklı güç kaybı ihmal edilerek yapılan bu hesaplamalar denklem (4.9)-(4.12)'de verilmiştir.

$$P_b = I_b \cdot V_b \quad (4.9)$$



$$P_{mot} = I_{mot} \cdot V_{mot} \quad (4.10)$$

$$P_d = P_b - P_{mot} \quad (4.11)$$

$$P_{shf} = T_m \cdot N_m \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.12)$$

Denklemlerdeki  $I_b$  akü akımını,  $V_b$  akü uç gerilimini,  $V_{mot}$  ise motor uç gerilimini ifade etmektedir. Buna göre yüzde cinsinden motor ve sürücü verimleri sırasıyla (4.13) ve (4.14)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta_{mot} = 100 \cdot \frac{P_{shf}}{P_{mot}} \quad (4.13)$$

$$\eta_d = 100 \cdot \frac{P_{mot}}{P_b} \quad (4.14)$$

Ölçülen ve hesaplanan tüm bu veriler hem anlık olarak arayüzdeki ilgili bölüme yazdırılmakta, hem de daha sonra incelenebilmesine imkân vermek için arayüzde oluşturulan bir tabloya kaydedilmektedir. Bu tablodaki tüm veriler istenildiği takdirde otomatik olarak Excel'e aktarılabilir. Ölçülen ve hesaplanan tüm değerler, bir sonraki veriler gelinceye kadar arayüzde gösterilmektedir. PMDC motorlu sistemde örnek bir test sırasında arayüzün bu kısmından alınan ekran görüntüsü Şekil 4.19'da verilmiştir.

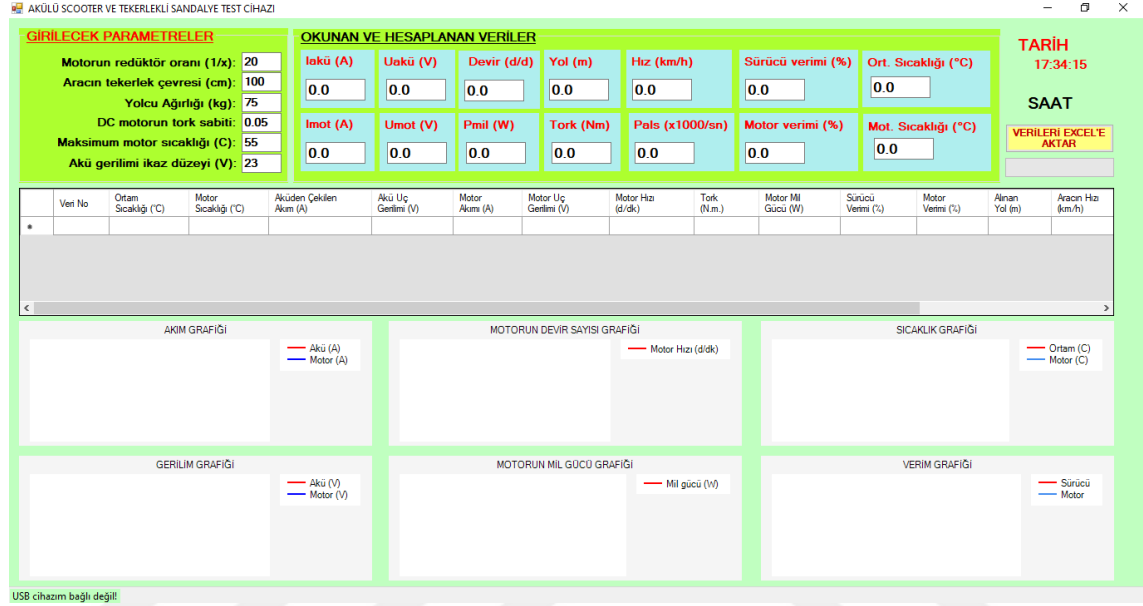
OKUNAN VE HESAPLANAN VERİLER						
lakü (A)	Uakü (V)	Devir (d/d)	Yol (m)	Hız (km/h)	Sürücü verimi (%)	Ort. Sıcaklığı (°C)
10,62	24,52	3974,4	3835	11,92	91,4	22,87
Imot (A)	Umot (V)	Pmil (W)	Tork (Nm)	Pals (x1000/sn)	Motor verimi (%)	Mot. Sıcaklığı (°C)
9,88	24,09	18,23	0,04	9,20	7,7	36,93

Şekil 4.19 PMDC motorlu sistemde ölçülen ve hesaplanan tüm değerlerin bir sonraki veriler gelinceye kadar arayüzde gösterildiği bölüm.

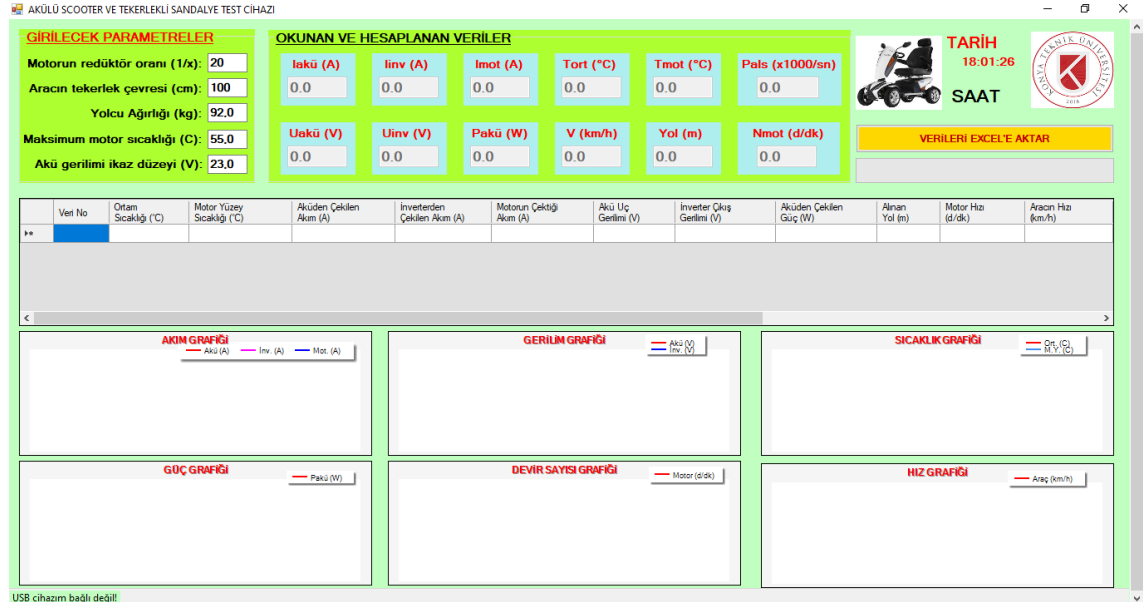
Aynı büyüklüğün deney boyunca değişimini daha net görebilmek ve inceleyebilmek için grafik yöntemine de başvurulmuştur. PMDC motorlu araçta ölçülen ve hesaplanan toplam 14 büyüklüğün 10 tanesi kendi aralarında gruplandırılarak 6 adet grafikte toplanmıştır. Eş zamanlı olarak çizdirilen bu grafiklerde veriler y ekseninde, veri numarası ise x ekseninde bulunmaktadır. Testler sonunda elde edilen veri alma sıklığı bilgisi kullanılarak iki veri numarası arasındaki zaman farkı saniye cinsinden elde

edilebilmektedir. Dolayısıyla bu grafikler, istenildiği takdirde verilerin zamana göre değişim grafikleri olarak da tekrar çizdirilebilecektir.

PMDC motorlu ve PM senkron motorlu araç için tasarlanan arayüz programının veri okuma kartına bağlanmadan önceki ekran görüntüleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Arayüzdeki grafikler, veri okuma kartları bilgisayara bağlandıktan sonra çizdirilmeye başlandığından, Şekil 4.20’de herhangi bir grafik görülmemektedir.



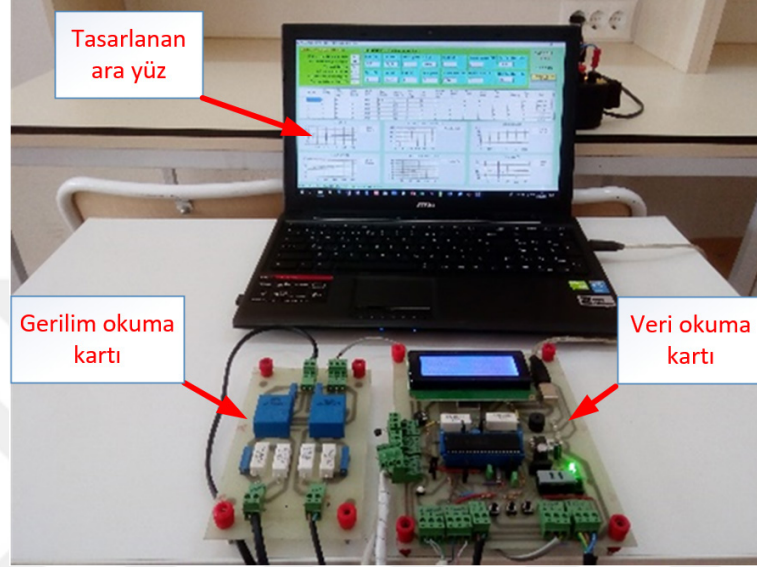
(a)



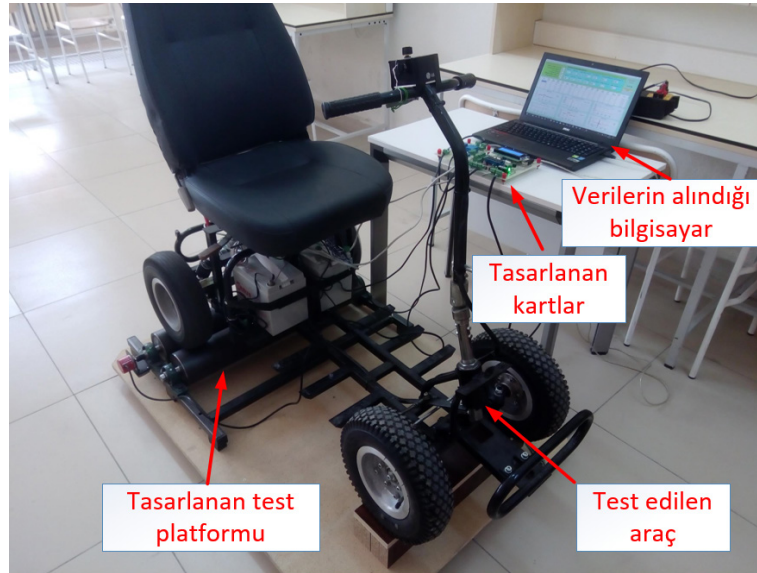
(b)

Şekil 4.20 Tasarlanan arayüzlerin veri okuma kartına bağlanmadan önceki ekran görüntüleri  
(a) PMDC motorlu araç için (b) PM senkron motorlu araç için.

PMDC motorlu araçla yapılan örnek bir test işlemi sırasında çekilmiş resimler Şekil 4.21’de görülmektedir. Test sonunda verilerin Excel’e aktarılması sırasında alınan ekran görüntüsü ise Şekil 4.22’de verilmiştir. Şekil 4.22’deki ekran görüntüsü incelendiğinde alınan verilerden elde edilen grafiklerin anlık olarak çizdirildiği rahatlıkla gözlenmektedir.<sup>2</sup>



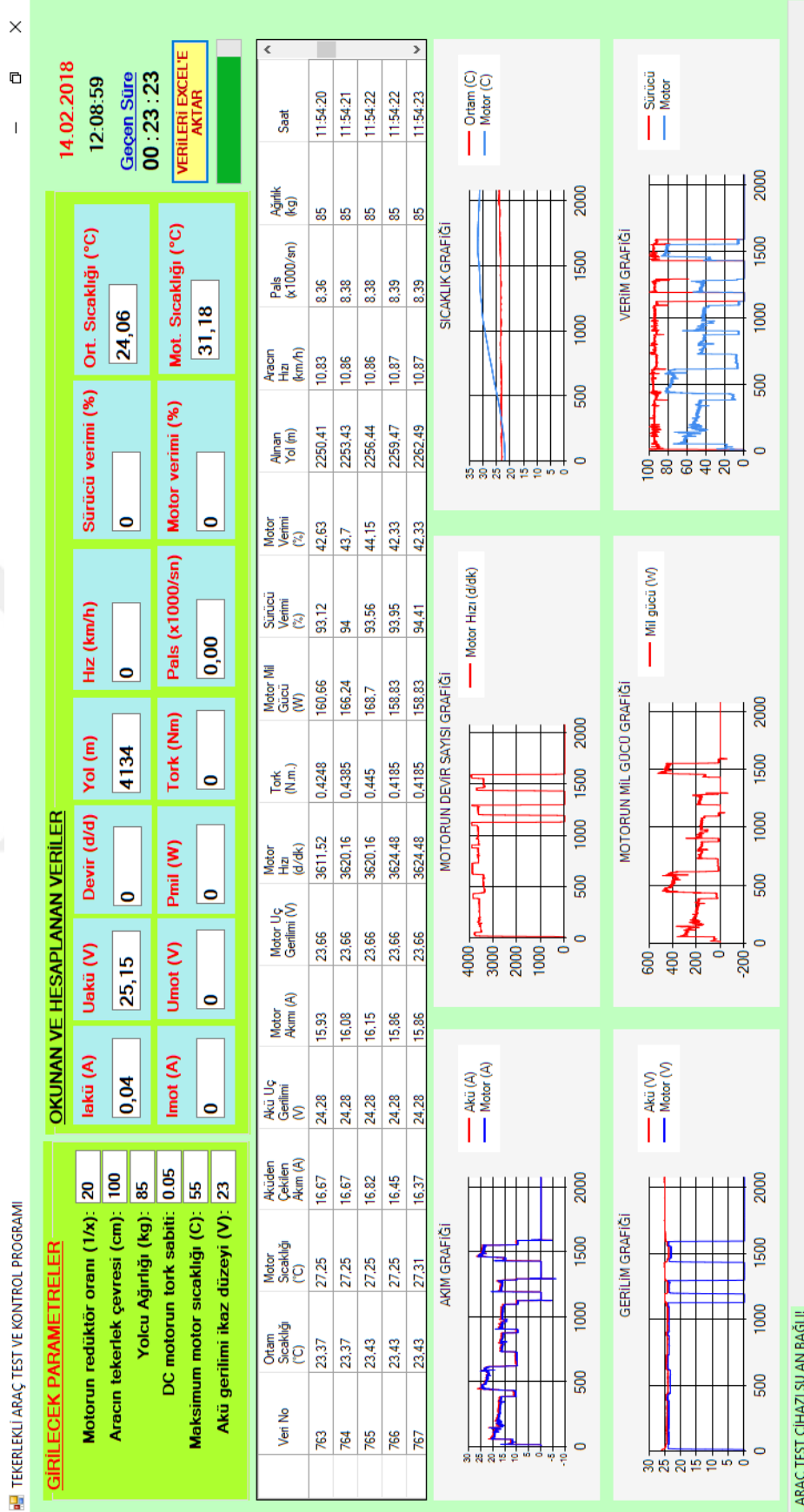
(a)



(b)

**Şekil 4.21** Tasarlanan sistemin PMDC motorlu engelli aracını test ederken çekilmiş resimleri.

<sup>2</sup> Bu bölümde tanıtılan test sistemi makale haline getirilmiş olup, SCI-E kapsamındaki Measurement and Control isimli uluslararası hakemli dergide yayınlanmıştır.

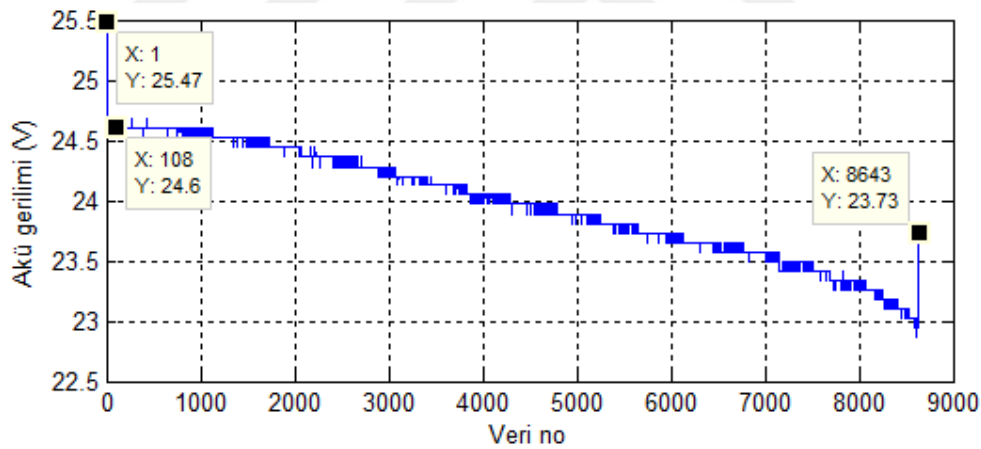


Şekil 4.22 PMDC motorlu araçla yapılan örnek bir test işlemi sonunda verilerin Excel'e aktarılması sırasında alınan ekran görüntüsü.

## 5. TASARLANAN ARIZA TESPİT VE TEST SİSTEMİ KULLANILARAK YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

PMDC ve PM senkron motorlu araç üzerindeki testler hem laboratuvarında hem de dış ortamda yapılmıştır. Ancak bu testlerden alınan verilerin incelenmesine geçmeden önce tasarlanan test sisteminden alınan verilerin doğruluğu ortaya konulacaktır.

Akülü engelli aracının tek şarjla ne kadar yol kat ettiğine dair yapılacak testlerde akü gerilimi için bir alt sınır değeri belirlenmelidir. Araçtaki sınır değeri belirlemek için yapılan ön testlerde, akü şarj düzeyini kırmızıyla gösteren ve akünün derin deşarja maruz kalmaması için şarj edilmesi gerektiğini ifade eden ikaz lambasının yandığı gerilim (23 V) değeri baz alınmıştır. Dolayısıyla yapılacak tüm testlerde testin sonlandırılma gerilimi 23V olarak belirlenmiştir. Tüm mesafe testleri aküler tam şarj edildikten sonra başlatılmış, akü gerilimi 23V'un altına indiğinde de sonlandırılmıştır. Bu durum, Şekil 5.1'deki tam şarjlı bir akü grubuna ait gerilimin test boyunca değişimi incelendiğinde görülecektir.



Şekil 5.1 PMDC motorlu araçla laboratuvarında yapılan bir teste akü geriliminin değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,551s).

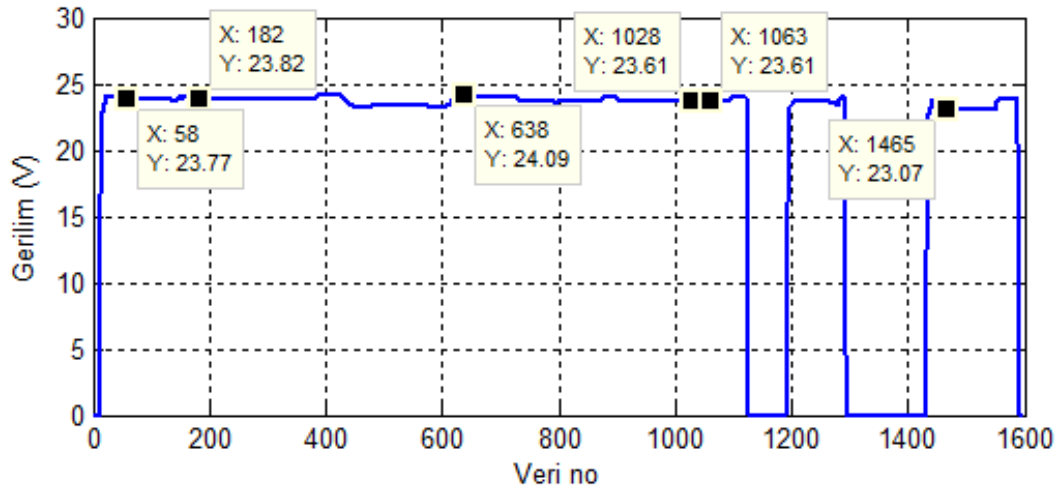
Teste başlamadan önce 25,47 V olan gerilim (1. veri), test başladıktan sonra 24,6 V'a düşmüştür (108. Veri). Test boyunca düzenli bir şekilde azalan akü gerilimi 23 V'un altına indiğinde test sonlandırılmıştır. Bu noktadan sonra akü gerilimi tekrar yükselerek 23,73 V düzeyine çıkmıştır (8643. veri).

### 5.1 Tasarlanan Test Sisteminden Elde Edilen Verilerin Doğrulanması

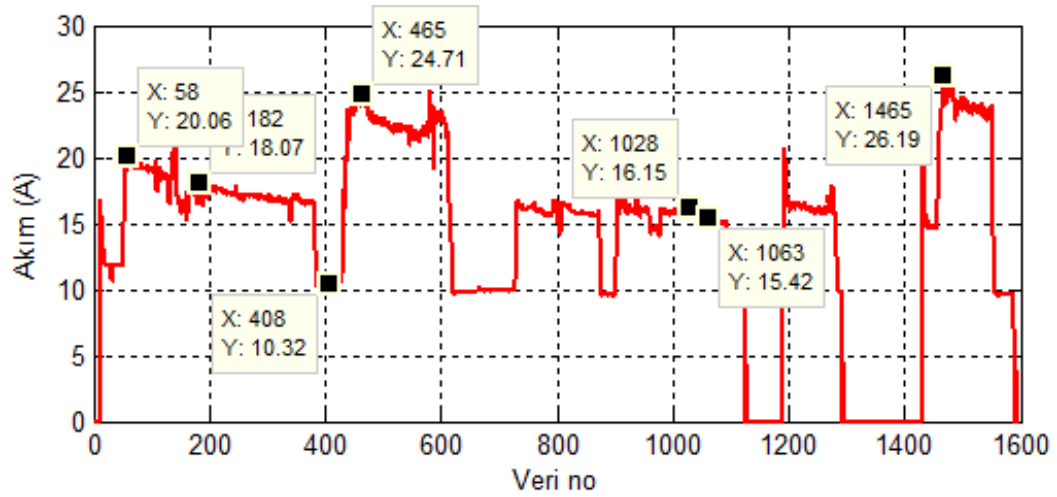
Tasarlanan test platformu kullanılarak motor hızlarının doğru bir şekilde ölçüldüğü bir önceki bölümde verilmiştir. Ancak araçtaki motora ait mil gücü ve verim gibi diğer veriler henüz doğrulanmamıştır. Bu doğrulamayı yapmak için tasarlanan sistemden alınan sonuçlar ile araç üzerindeki PMDC motoru üreten firmanın Ek-1’de verilen gerçek test verileri kıyaslanacaktır.

Bu kıyaslamada motorun çektiği akıma göre ürettiği mil gücünü ve buna bağlı olarak motorun verimini dikkate almak, tasarlanan sistemin ne derece doğru olduğunu ortaya koymak için yeterlidir. Motorun farklı akımlar çekmesi sağlanarak kıyaslamının olabildiğinde geniş bir yelpazedeki akım değerleriyle yapılmasını sağlamak için deney sırasında araç üzerine farklı ağırlıklar konulmuş ve motorun yüklenmesi sağlanmıştır.

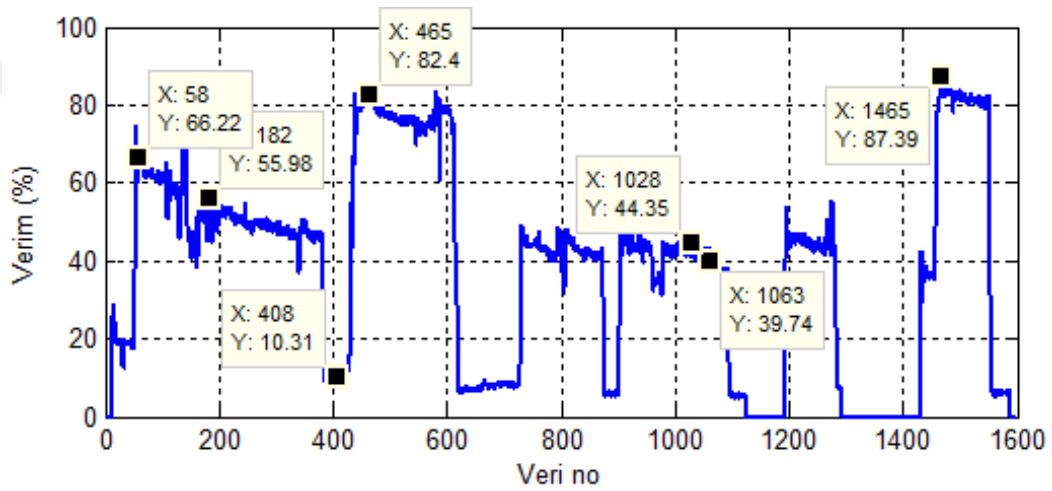
Bu şekilde yapılan bir testten elde edilen motora ait akım, gerilim, verim ve mil gücü grafikleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Data cursor yardımıyla grafiklerde işaretlenen noktalarda X alınan veri numarasını, Y de ilgili grafikteki büyüklüğün değerini ifade etmektedir.



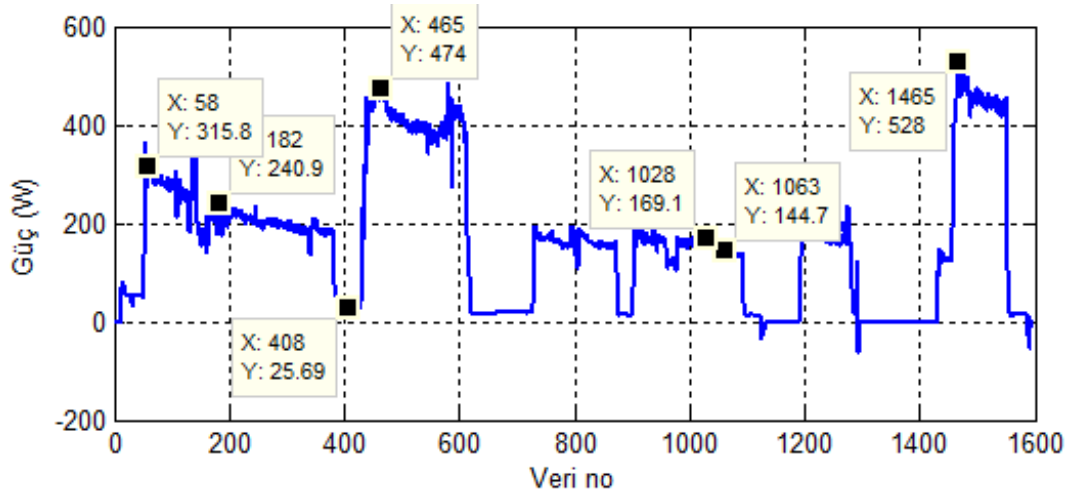
(a)



(b)



(c)



(d)

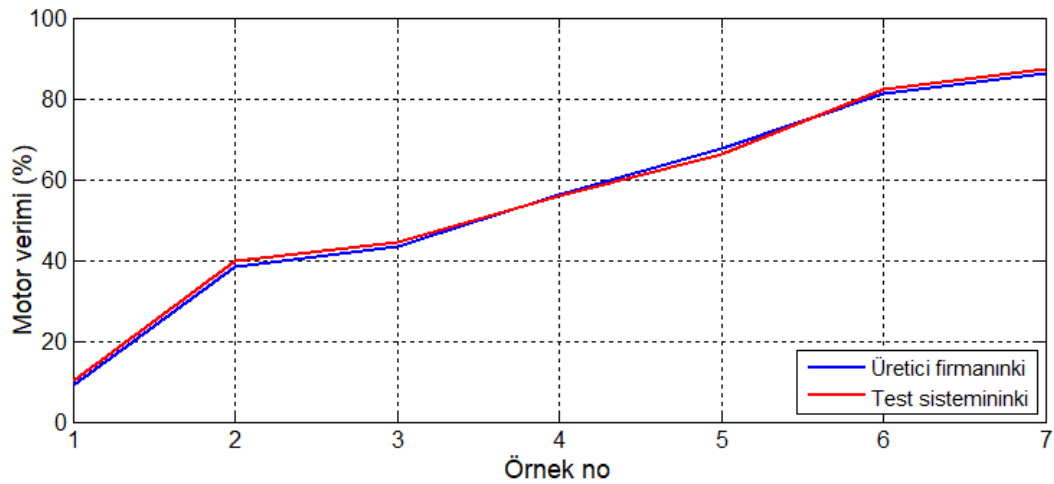
Şekil 5.2 Test sisteminin doğrulanması için yapılan deneyden elde edilen grafikler  
(a) Motor gerilimi, (b) Motor akım, (c) Verim, (d) Mil gücü.

Data cursor yardımıyla grafiklerde işaretlenen noktalar, motoru üreten firmanın test verileriyle birlikte Tablo 5.1’de toplanmıştır. Bu noktalar, üretici firma tarafından yapılan teste ait verilerdeki (Ek-1’deki) akım değerlerine mümkün olan en yakın değerler olacak şekilde seçilmiştir. Tasarlanan sistemden elde edilen akım değerleri ile buna en yakın üretici değerleri tabloda aynı satırda sunulmuştur. Böylece daha kolay bir kıyaslama imkânı sağlanmıştır.

**Tablo 5.1** PMDC motor verimlerinin karşılaştırılması

Örnek no	Üretici firmanın testi (EK-1)			Tasarlanan sistemle yapılan test (Şekil 5.2)				Mutlak verim hatası (%)	
	Sıra no	Motor gerilimi (V)	Motor akımı (A)	Motor verimi (%)	Veri no	Motor gerilimi (V)	Motor akımı (A)		Motor verimi (%)
1	9	24,13	10,29	9,21	408	24,15	10,32	10,31	1,1
2	17	24,11	15,48	38,54	1063	23,61	15,42	39,74	1,2
3	18	24,11	16,11	43,50	1028	23,61	16,15	44,35	0,85
4	21	24,11	18,03	56,26	182	23,82	18,07	55,98	0,28
5	24	24,10	20,10	67,61	58	23,77	20,06	66,22	1,39
6	31	24,08	24,86	81,39	465	23,28	24,71	82,40	1,01
7	33	24,08	26,21	86,38	1465	23,07	26,19	87,39	1,01

Tablo 5.1 incelendiğinde en büyük ve en küçük mutlak verim hatalarının sırasıyla % 1,39 ve % 0,28 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Dolayısıyla ortalama mutlak hata % 0,98’dir. Test sisteminden elde edilen verim değerlerinin üretici firma verilerine çok yakın seyrettiği Şekil 5.3’de verilen verim grafiklerinden de gözlenebilir.



**Şekil 5.3** Akülü engelli araçındaki PMDC motorun verim grafikleri



Test sisteminden elde edilen verim değerleriyle üretici firma verileri arasındaki ortalama % 0,98'lik mutlak hatanın nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Öncelikle karşılaştırmadaki temel çıkış noktası olan akımlar birebir eşit değildir.
2. Üretici firmanın test verilerinde akımdaki artışa rağmen motorun beslendiği gerilimde sadece 0,05 V'luk bir değişim olduğu görülmektedir. Dolayısıyla motorun sabit bir güç kaynağından beslendiği anlaşılmaktadır. Ancak test sisteminde motoru besleyen aküde, akımdaki artışa bağlı olarak akü uç geriliminin daha fazla düşmesi, motora uygulanan gerilimin de daha fazla düşmesine yol açmıştır. Bu durum 10,32 A'lik motor akımında 24,15 V olan motor geriliminin 26,19 A'lik motor akımı durumunda 23,07 V'a düşmesinden de anlaşılmaktadır. Dolayısıyla motorların beslenme gerilimleri de birebir eşit değildir.
3. Üretici firmaların yaptığı testlerde motorun ürettiği tork, tork sensörüyle ölçülmektedir. Ancak tork sensörünün maliyeti çok yüksek olduğundan ve tasarlanan test sistemine dâhil edilmesi mekanik açıdan çok mümkün olmadığından tasarlanan sistemde kullanılmamıştır. Bunun yerine motorun tork sabiti kullanılmıştır. Bilindiği gibi tork sabiti her koşulda sabit olmayıp sıcaklık ve diğer faktörlerden dolayı olarak etkilenen ve değişebilen bir değerdir. Test edilen araçtaki motora ait bu değer, her ne kadar Ek-1'deki veriler kullanılarak eğri uydurma yöntemiyle elde edilen ve tasarlanan arayüze eklenen bir denklem yardımıyla motor akımına bağlı olarak sürekli güncellenmiş olsa da bu yöntemle elde edilen tork değerinin tork sensöründen alınan değerle birebir aynı olması mümkün değildir.

Tüm bu değerlendirmeler dikkate alındığında, test sisteminden elde edilen verilerin kabul edilebilir bir hata payına sahip olduğu görülmektedir.

## 5.2 PMDC Motorlu Akülü Scooter İle Yapılan Test Çalışmaları

PMDC motorlu araçla hem laboratuvarında hem de dış ortamda toplam 25 adet test yapılmış olup 270 km yol kat edilmiştir. Burada öncelikle laboratuvarında yapılan testler sunulacaktır.

### 5.2.1 Laboratuvarda yapılan test çalışmaları

Aracın menzil testini dış ortamda hiç durmadan, aynı yol koşullarında ve aynı sıcaklıklarda yapmak biraz zordur. Yolun asfalt ya da toprak olması, yol eğimi, hava sıcaklığı ve havanın rüzgârlı olup olmaması gibi çevresel faktörler aracın menziline etkiler. Bu nedenle aracın menzil testleri neredeyse sabit sıcaklıktaki stabil bir ortamda, tasarlanan test platformu kullanılarak ve araç son hız kademesindeyken yapılmıştır. Yapılan testler sırasında alınmış bir görüntü Şekil 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.4 PMDC motorlu aracın koltuğu boşken yapılan bir test sırasında çekilmiş resim.

Önce araç koltuğu boşken aracın düz yoldaki ( $0^\circ$ ’lik eğimdeki) davranışı ve özellikle toplamda ne kadar mesafe kat edeceği araştırılmıştır. Bu doğrultuda yapılan testlerden elde edilen toplam mesafe ( $X_t$ ), aküden çekilen toplam enerji ( $W$ ) ve aracın 1 km yol kat etmesi için aküden çekmesi gereken enerji bilgileri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

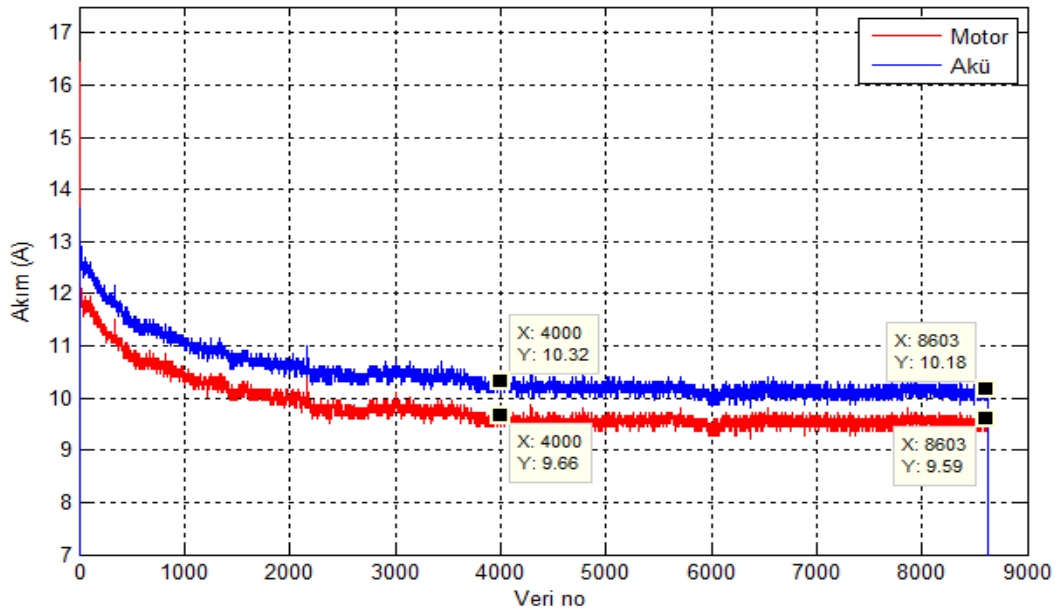
**Tablo 5.2** PMDC motorlu aracın laboratuvar testinde boş koltukla tükettiği toplam enerji ve kat ettiği toplam mesafe bilgileri.

Test no	$W$ (Wh)	$X_t$ (km)	$W/X_t$ (Wh/km)
1	348,78	15,17	22,99
2	380,01	17,22	22,07
3	358,88	16,92	21,21
4	361,84	16,52	21,90
5	338,75	15,64	21,66
6	341,86	15,76	21,69

Tablo 5.2'deki veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılabacaktır:

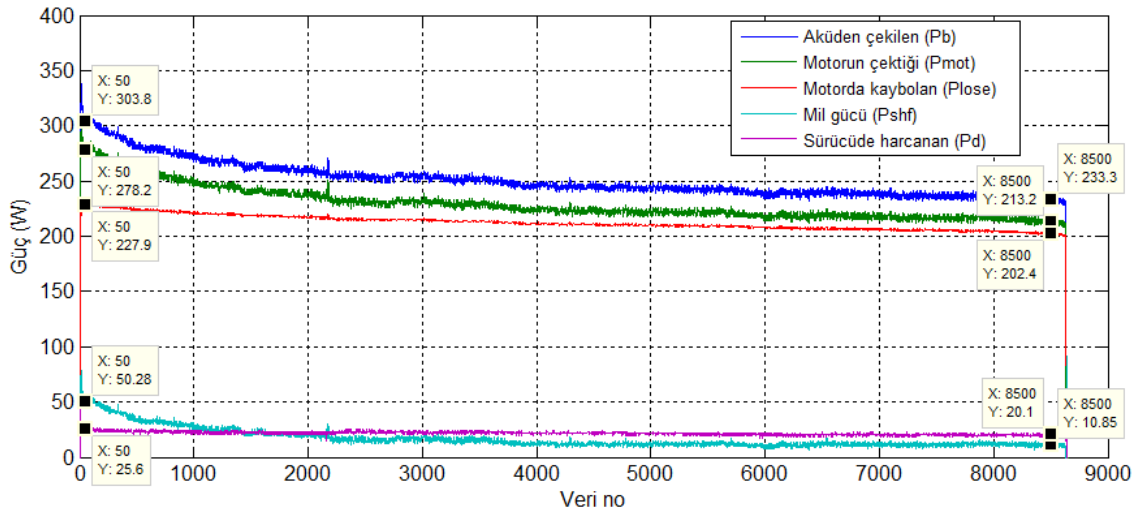
- PMDC motorlu aracın 1 km yol alabilmesi için aküden çekmesi gereken ortalama enerji 21,92 Wh'dir.
- Tam şarjla kat ettiği ortalama mesafe 16,20 km'dir.
- Tam şarjla kat edilen en uzun ve en kısa toplam mesafelerde, ortalamaya göre yaklaşık  $\pm 1$  km'lik bir farklılık bulunmaktadır.

Testler sırasında akü ve motor akımlarının zamanla azaldığı görülmüştür. Tablo 5.2'deki 15,64 km'lik yolun kat edildiği teste ait akü ve motor akımlarının test boyunca değişimleri buna örnek olarak Şekil 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde başlangıçta 12,5A civarlarında olan akü akımının testin sonunda 10 A düzeylerine düştüğü, fakat akü ve motor akımları arasındaki yaklaşık 0,6-0,7 A'lik farkın korunduğu görülmektedir.



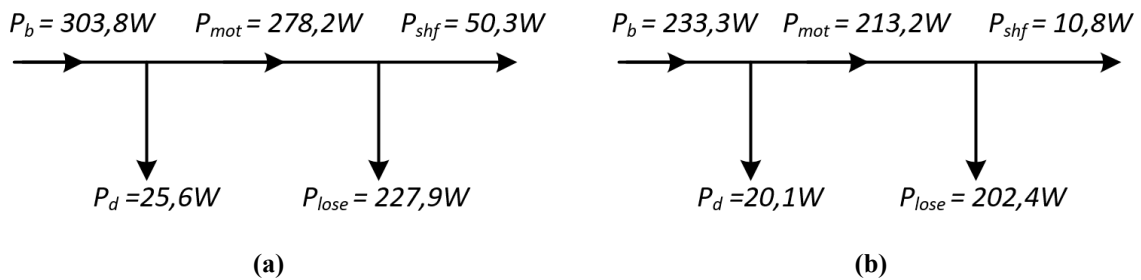
Şekil 5.5 PMDC motorlu aracın 15,64 km yol kat ettiği teste akü ve motor akımlarının test boyunca değişimleri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,551 s).

Araç koltuğu boşken  $0^\circ$ 'lik eğimde yapılan teste aküden çekilen ( $P_b$ ), sürücüde harcanan ( $P_d$ ), motorun çektiği ( $P_{mot}$ ), motorda kaybolan ( $P_{lose}$ ) ve motor miline aktarılan ( $P_{shf}$ ) güçlerin test boyunca değişimleri Şekil 5.6'daki gibi olmuştur.



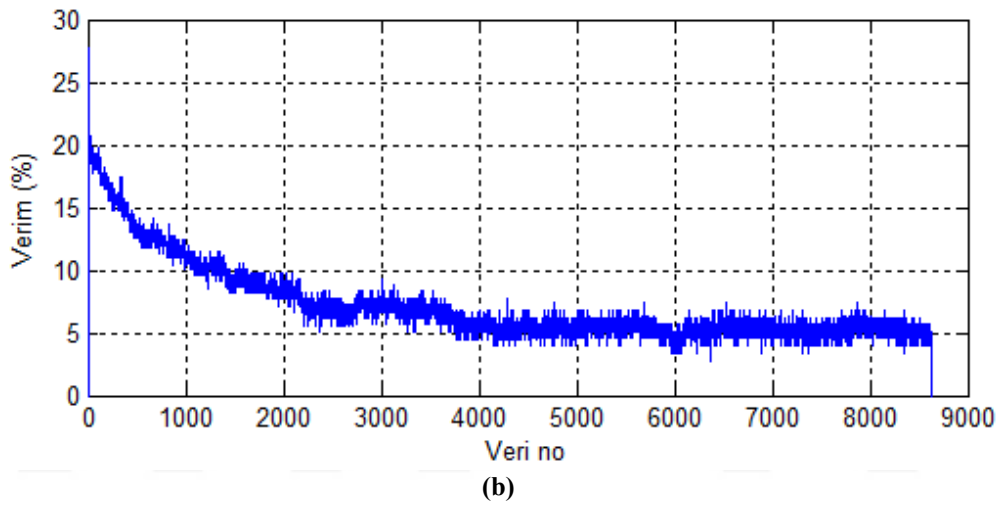
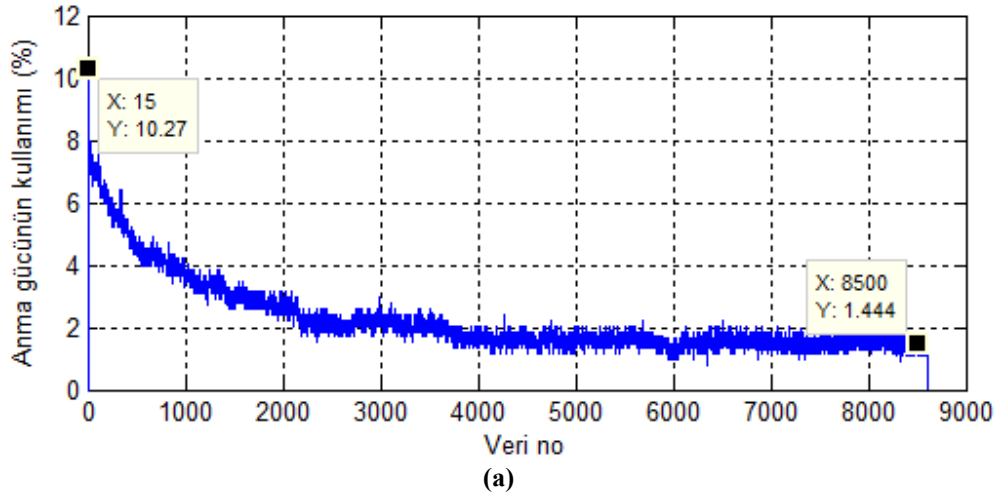
Şekil 5.6 PMDC motorlu aracın 15,64 km yol kat ettiği testte güçlerin test boyunca değişimleri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,551 s).

Şekil 5.6 incelendiğinde 750 W'lık PMDC motorlu aracın boş koltukla 0°'lik eğimde yol alırken başlangıçta aküden 303,8 W güç çektiği görülmektedir (50. veri). Aküden çekilen bu gücün 25,6 W'ı sürücü tarafından harcanmış, kalan 278,2 W'ı motora aktarılmıştır. Motorun çektiği bu gücün sadece 50,28 W'ı motor miline aktarılmış, 227,9 W'ı motorda harcanmıştır (Şekil 5.7.a). Testin sonlarında (8500. veri) aküden çekilen 233,3 W'lık gücün sadece 10,8 W'ı motor miline aktarılmıştır. Geri kalan gücün 20,1 W'ı sürücüde, 202,4 W'ı motorda kaybolmuştur (Şekil 5.7.b). Bu test boyunca aküden çekilen gücün ortalama anlık değeri 252,25 W olarak gerçekleşmiştir.



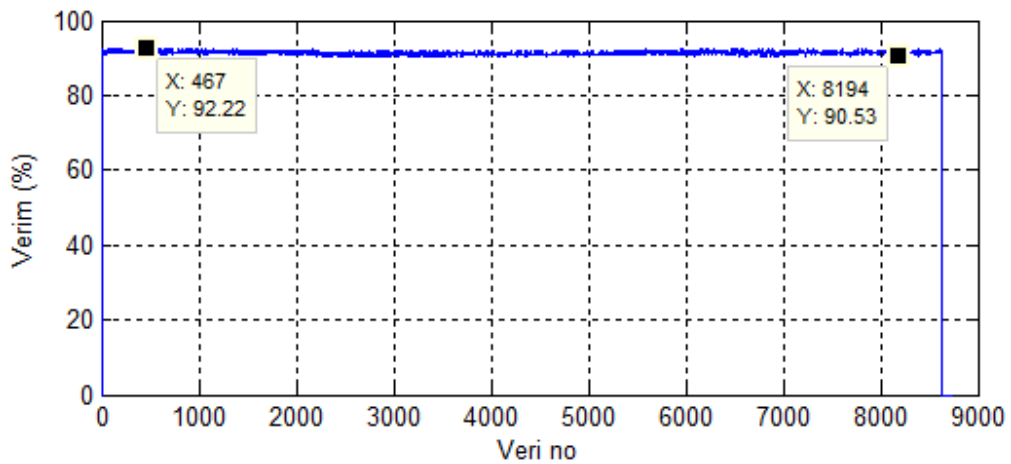
Şekil 5.7 PMDC motorlu aracın 15,64 km yol kat ettiği testte güçlerin belirli anlardaki dağılımı (a) Testin 50. verisi anındaki güç dağılımı (b) Testin 8500. verisi anındaki güç dağılımı.

Görüldüğü gibi PMDC motor anma gücünün çok çok altında çalışmaktadır. Bu durum, motor anma gücünün % cinsinden kullanımını gösteren Şekil 5.8.a ve motor veriminin değişimini gösteren Şekil 5.8.b'de daha net gözlenebilir. Yapılan bu testte ortalama anma gücü kullanımı % 2,25, ortalama verim de % 7,16 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.8 PMDC motorlu aracın 15,64 km yol kat ettiği teste ilişkin grafikler (a) Motor anma gücünün % cinsinden kullanımı, (b) Motor veriminin değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,551 s).

PMDC motor sürücüsünün verim grafiği ise Şekil 5.9'da verilmiş olup sürücünün ortalama verimi % 91,34 olarak gerçekleştirmiştir.



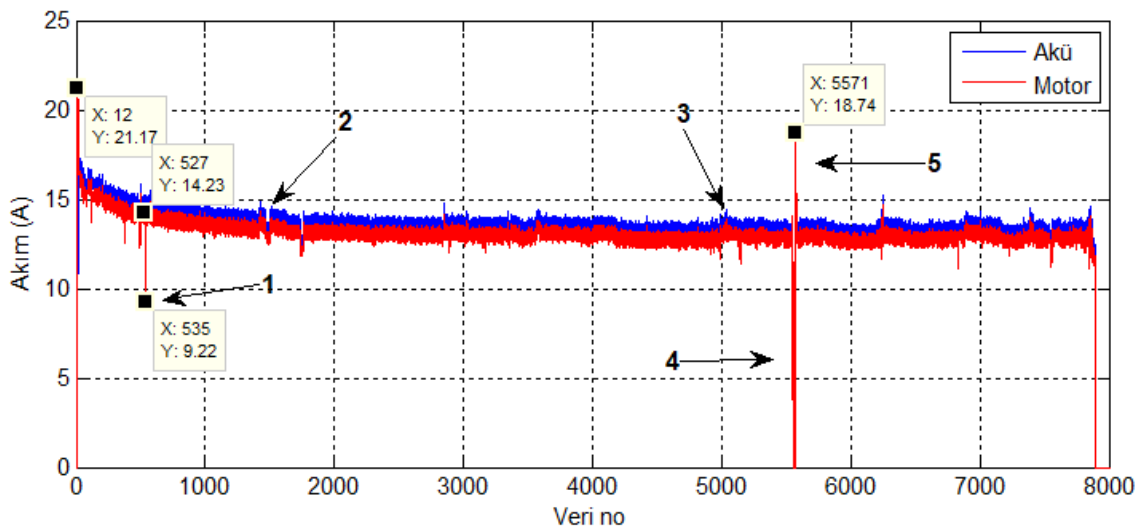
Şekil 5.9 PMDC motorlu aracın 15,64 km yol kat ettiği teste sürücü veriminin değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,551 s).

Aracın  $0^\circ$ 'lik eğimdeki davranışı ve özellikle toplamda ne kadar mesafe kat edeceği araç koltuğu doluyken de araştırılmıştır. Bu doğrultuda yapılan testte araca 95 kg'lık bir kullanıcı oturtulmuştur (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 PMDC motorlu aracın koltuğu doluyken yapılan bir test sırasında çekilmiş resim.

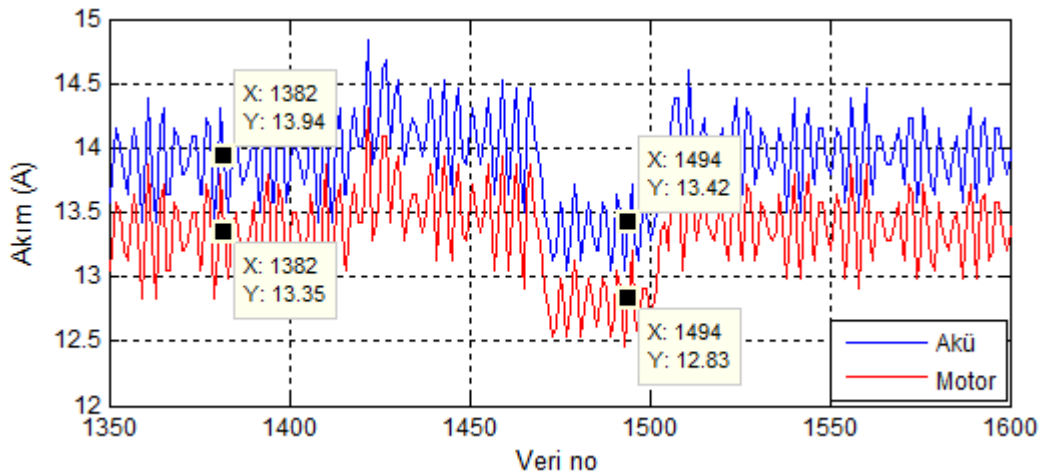
$0^\circ$ 'lik yol eğiminde ilgili ağırlıktaki kullanıcıyı taşıyan araç toplam 9,05 km yol kat etmiştir. Buna karşılık aküden toplam 264,38 Wh'lik enerji çekmiştir. Dolayısıyla aracın 1 km yol alabilmesi için aküden çektiği ortalama enerji 29,21 Wh olarak gerçekleşmiştir. Bu teste ilişkin akü ve motor akımlarının değişimleri Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11 Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte akü ve motor akımlarının test boyunca değişimleri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

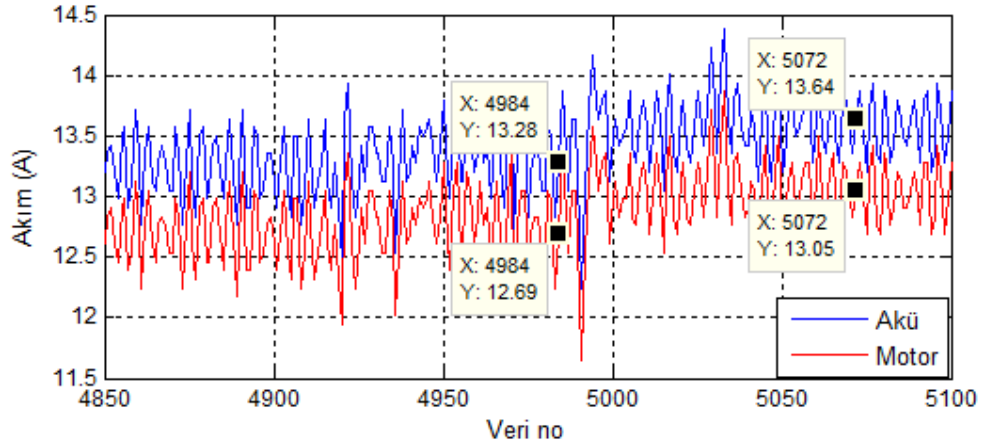
Yükün akımlar üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için deneyin 530. verisi civarında kullanıcı araçtan anlık olarak inmiş, ardından tekrar binmiştir. Öncesinde 14 A düzeylerinde olan motor akımı 9 A düzeylerine düşmüştür (1 numaralı ok ile gösterilen bölüm). Kullanıcının araca tekrar binmesiyle birlikte akımlar önceki değerlerine geri yükselmiştir.

Bu test yapılırken kullanıcının araç üzerindeki farklı davranışlarının akımlara yansması da araştırılmıştır. Örneğin 2 numaralı ok ile gösterilen bölgede kullanıcı aracın önüne doğru eğilmiş ve bir müddet pozisyonunu korumuştur. Ağırlık merkezinin öne doğru kaydığı bu süre zarfında akımlarda 0,7 A civarında bir düşüş gözlenmiştir. Kullanıcının tekrar dik pozisyona dönmesiyle birlikte akımlar önceki değerlerine tekrar yükselmiştir. Şekil 5.11’de 2 numaralı okla gösterilen bölümdeki akım değişimlerinin daha net incelenmesi için bu bölüm büyütülmüş ve Şekil 5.12’de verilmiştir.



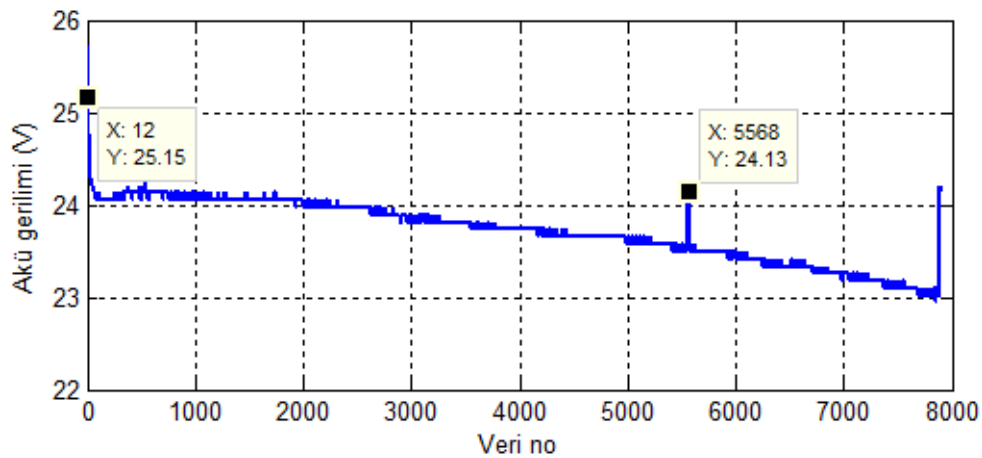
**Şekil 5.12** Araç 95 kg’lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte kullanıcının öne doğru eğilmesi durumunda akü ve motor akımlarında meydana azalma (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

Şekil 5.11’de 3 numaralı ok ile gösterilen bölgede ise kullanıcı geriye doğru yaslanmış ve bir süre pozisyonunu korumuştur. Bu durumda öncekine kıyasla 0,4 A daha fazla akım çekilmeye başlanmıştır. 3 numaralı ok ile gösterilen bu bölümün büyütülmüş hâli ise Şekil 5.13’de verilmiştir.



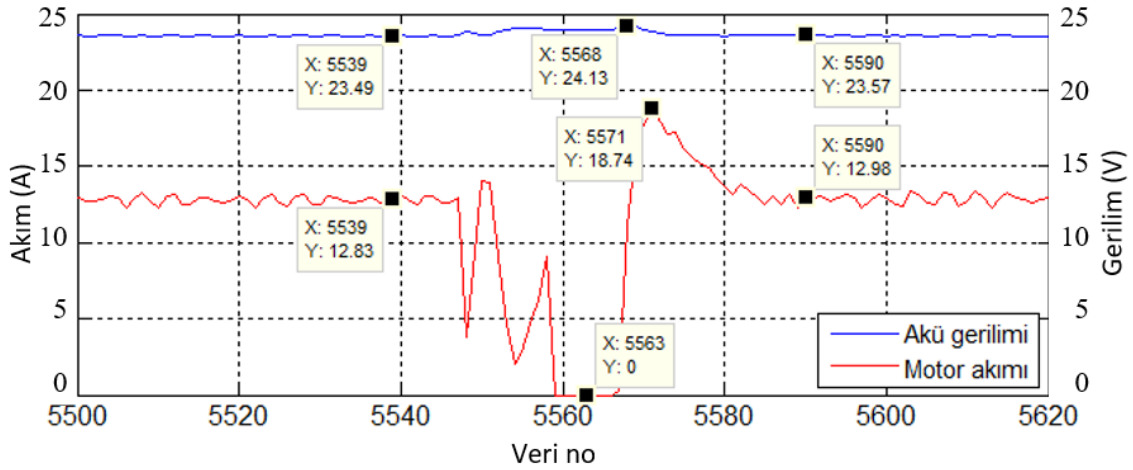
**Şekil 5.13** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan teste kullanıcının geri yaslanması durumunda akü ve motor akımlarında meydana gelen yükselme (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

Bu test sırasında akü hem tam doluyken hem de kısmen boşalmışken aynı yük durumunda motorun çektiği akımın durumu da incelenmiştir. Bu amaçla deneyin 5550. verisi civarında (Şekil 5.11'de 4 numaralı okla gösterilen bölümde) araç durdurulmuş ve akü geriliminin yükselmesi beklenmiştir. Akü gerilimindeki bu değişim Şekil 5.14'de verilmiştir. Akü gerilimi yükselip kararlı hale geldikten sonra (24,13 V) motor tekrar enerjilenmiş ve araç hareket ettirilmiştir. Akü gerilimi 25,15 V'ken motorun çektiği kalkınma akımı 21,17 A olmuştur (Şekil 5.11'de 12.veri). Ancak akü gerilimi 24,13 V'a indiğinde bu değer 18,74 A'e düşmüştür (Şekil 5.11'de 5571.veri). Dolayısıyla akü gerilimindeki % 4'lük (1 V'luk) düşme, motorun çektiği kalkınma akımında % 11,48'lik (2,43 A'lik) bir azalmaya neden olmuştur. Aracın dur-kalk yaptığı bu deney bölümünde akü gerilimi ve motor akımının değişimleri Şekil 5.15'de detaylı olarak verilmiştir.



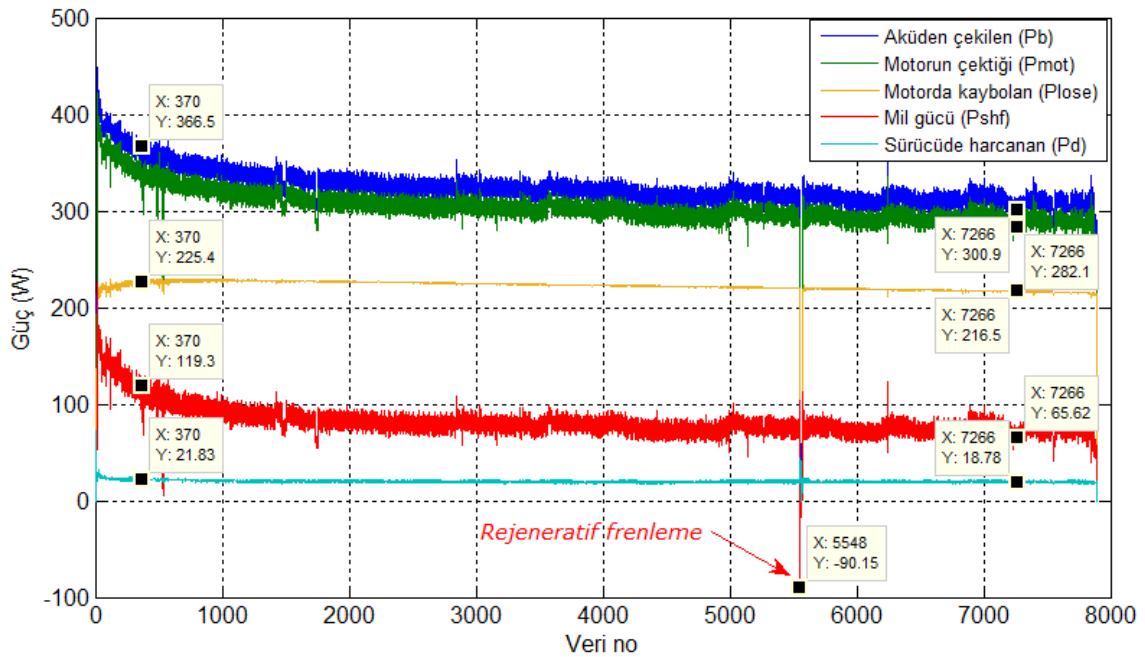
**Şekil 5.14** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan teste akü geriliminin deney boyunca değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).





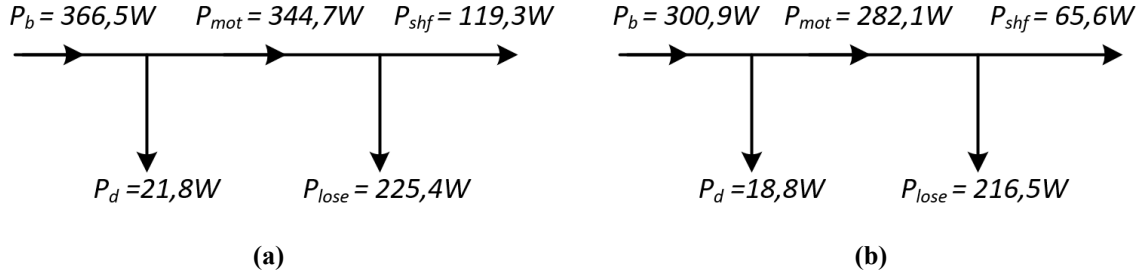
**Şekil 5.15** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan test sırasında aracın belli bir süre durdurulduktan sonra tekrar çalıştırılması durumunda akü gerilimindeki ve motor akımındaki değişime (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından  $0^\circ$ 'lik bir eğimde kullanıldığında  $P_b$ ,  $P_d$ ,  $P_{mot}$ ,  $P_{lose}$  ve  $P_{shf}$  güçlerinin test boyunca değişimleri Şekil 5.16'daki gibi olmuştur. Şekil 5.16'da 5548. veri sırasında gözlenen -90,15 W'lık mil gücü, aracın durdurulması sırasında (rejeneratif frenleme esnasında) motorun ürettiği güç olup aküye aktarılmıştır.



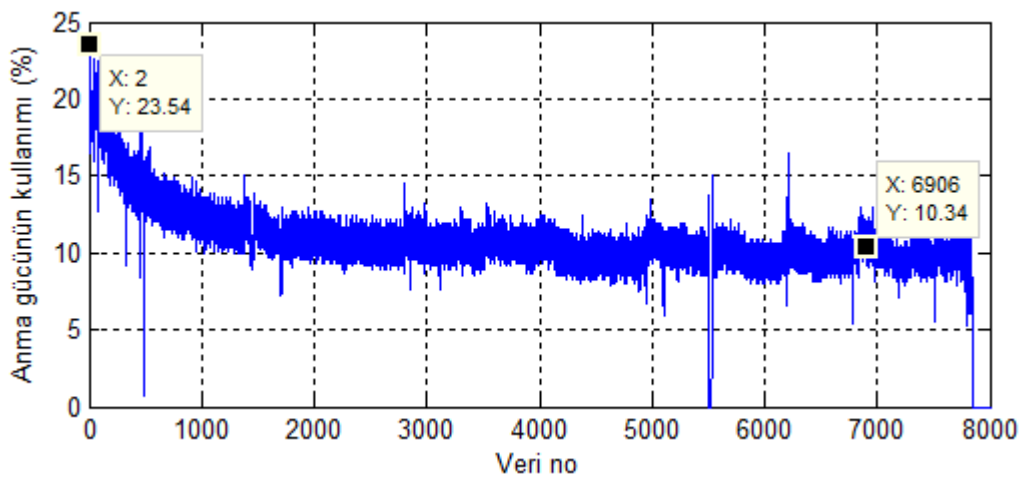
**Şekil 5.16** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte motor mil gücü, aküden çekilen güç ve kayıp gücün test boyunca değişimleri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

Yine Şekil 5.16 incelendiğinde testin başlarında (370. veri) aküden çekilen 366,5 W'lık gücün 119,3 W'nın motor miline aktarıldığı görülmektedir. Geriye kalan gücün 21,8 W'ı sürücüde, 225,4 W'ı motorda kaybolmuştur (Şekil 5.17.a).

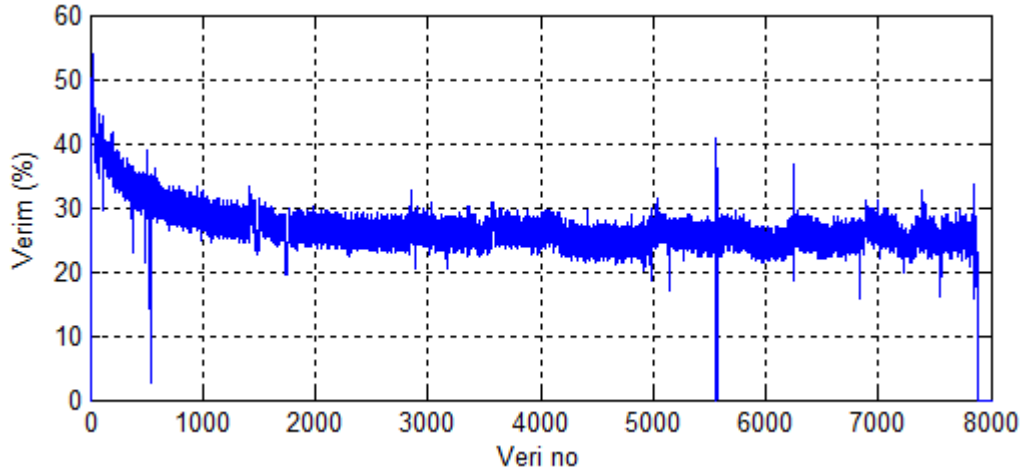


**Şekil 5.17** PMDC motorlu araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte güçlerin belirli anlardaki dağılımı (a) Testin 300. verisi anındaki güç dağılımı (b) Testin 7266. verisi anındaki güç dağılımı.

Testin sonlarında (7266. veri) aküden çekilen 300,9 W'lık gücün sadece 65,6 W'ı motor miline aktarılmıştır. Geri kalan gücün 18,8 W'ı sürücüde, 216,5 W'ı motorda kaybolmuştur (Şekil 5.17.b). Görüldüğü gibi 95 kg'lık bir yükü yol alan araç boş koltuklu teste kıyasla bu defa daha çok mil gücü üretmiştir. Ancak buna rağmen PMDC motor hâlâ anma gücünün çok altında çalışmaktadır. Bu durum, motor anma gücünün % cinsinden kullanımını gösteren Şekil 5.18 ve motor veriminin değişimi gösteren Şekil 5.19'da daha net gözlenebilir. Bu deney sırasında aküden çekilen ortalama anlık güç 323,22 W'tır.

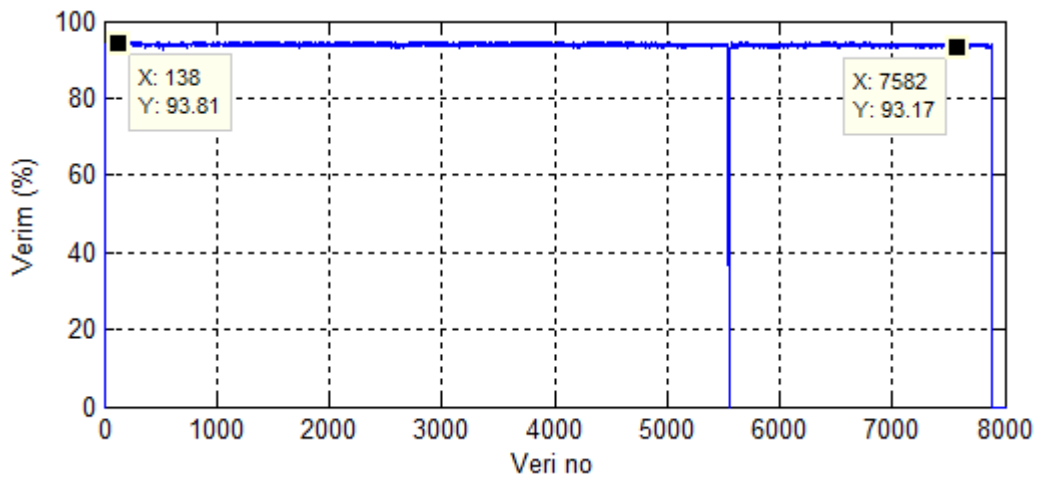


**Şekil 5.18** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte motor anma gücünün % cinsinden kullanımı (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).



**Şekil 5.19** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte motor veriminin değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

Yapılan bu testte ortalama verim % 26,68, ortalama anma gücü kullanımı da % 10,88 olarak gerçekleşmiştir. Aracın 95 kg'lık bir kullanıcı tarafından kullanılması, motor veriminde % 19,52 anma gücü kullanımında da % 8,63'lük bir artış sağlamıştır. *Dolayısıyla bu tür araçlara takılacak motorların güçleri belirlenirken kullanıcı ağırlıklarını dikkate almak, motorların daha verimli bölgede çalışmalarını sağlayacaktır. Bu da sistem verimini artıracaktır. Çünkü motorlar anma gücüne ne kadar yaklaşırsa, onları süren sürücülerin verimi de artacaktır.* Bu durum Şekil 5.20'de verilen sürücü verimi grafiğinde de görülmektedir. Araç koltuğu boşken yapılan testte ortalama sürücü verimi % 91,34 olarak gerçekleşmişken, bu testte % 93,71 olmuştur. Dolayısıyla sürücü veriminde % 2,37'lik bir artış söz konusudur.



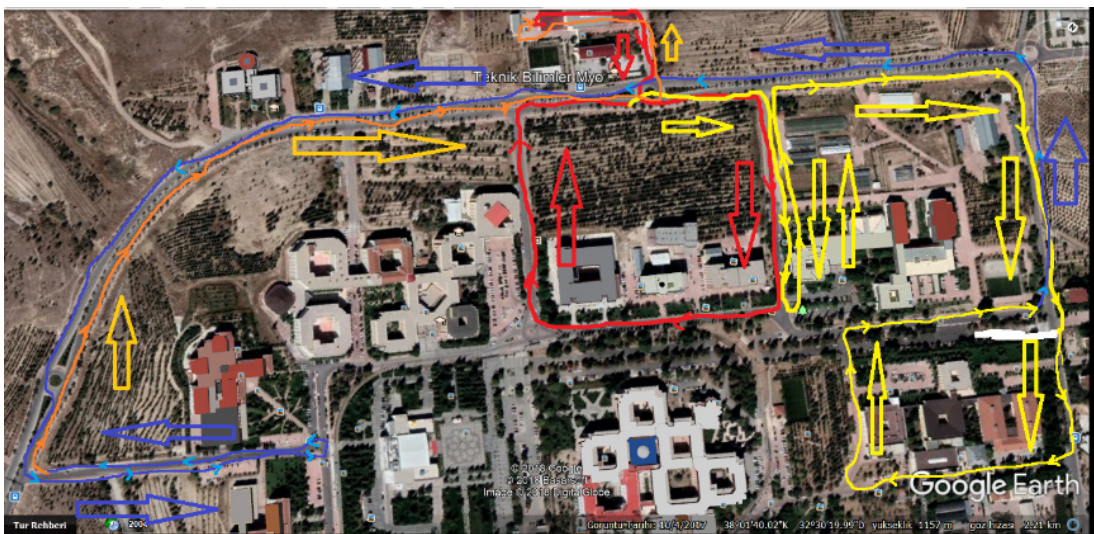
**Şekil 5.20** Araç 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılırken yapılan testte sürücü veriminin değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,373 s).

### 5.2.2 Dış ortamda yapılan test çalışmaları

Tasarlanan test platformu üzerindeki menzil testlerinin ardından aracın gerçek yol şartlarındaki davranışının incelenmesine geçilmiştir. Dış ortam testlerinde aracın tek şarjla ne kadar yol kat ettiğinden ziyade aracın gerçek yol şartlarındaki davranışlarını izlemenin daha doğru olacağı düşünülmüştür. Çünkü daha önce de ifade edildiği gibi yolun asfalt ya da toprak olması, yol eğimi, hava sıcaklığı ve havanın rüzgârlı olup olmaması gibi çevresel faktörler aracın menzilinı etkilemektedir.

Bilindiği gibi her kütle için bir ağırlık merkezi vardır. Bu, araçlar için de geçerlidir. Eğer araç artan eğimli yollarda ilerliyorsa, ağırlık merkezi de buna bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla aracın hareket kaynağı daha fazla güç üretmek için daha fazla enerji tüketir. Örneğin fosil yakıtlı bir araç rampa çıkmaya başladığında anlık yakıt tüketimi düz yoldakine kıyasla artmaya başlar. Artış miktarı çıkılan rampanın eğimine göre değişmektedir. Aynı etki akülü engelli araçları için de söz konusu olacaktır. Akülü engelli araçlarındaki bu etkiyi görebilmek için  $\pm 30^\circ$ 'lik sınırlar içinde  $0,0025^\circ$ 'lik hassasiyetle eğimdeki değişimleri ölçebilen ve analog çıkış verebilen SCA61T-FAHH1G eğim sensörü kullanılmaya karar verilmiştir. Kartta ve arayüzde yapılan küçük eklemeler sayesinde bu ilave donanım sisteme dâhil edilmiş ve dış ortam testlerine geçilmiştir.

PMDC motorlu aracın dış ortam testleri Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesi içerisinde yapılmış olup testler kapsamında toplamda 32,58 km yol kat edilmiştir. Yapılan testlere ait güzergâhlardan bazıları Şekil 5.21'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

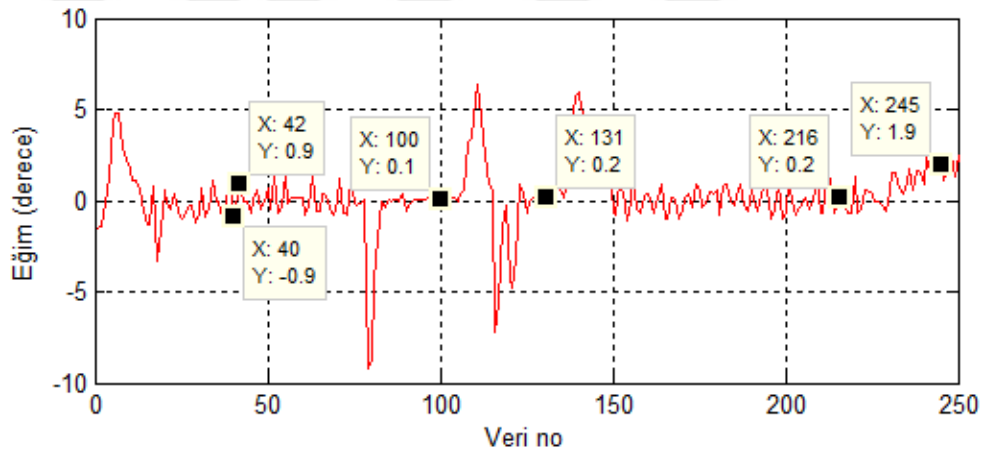
**Şekil 5.21** PMDC motorlu araçla Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesi içerisinde yapılmış olan testlerden bazılarına ait güzergâhlar.

Eğimin araç üzerindeki etkisini araştırmak için farklı eğimlere sahip yollarda testler yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesindeki Hamdullah Suphi Tanrıöver Caddesinde (Teknoloji Fakültesi önündeki caddede) test yapılmıştır. İlgili test güzergâhına ait detaylar Şekil 5.22’de görülmekte olup aracın hareket yönü A noktasından B noktasına doğrudur.

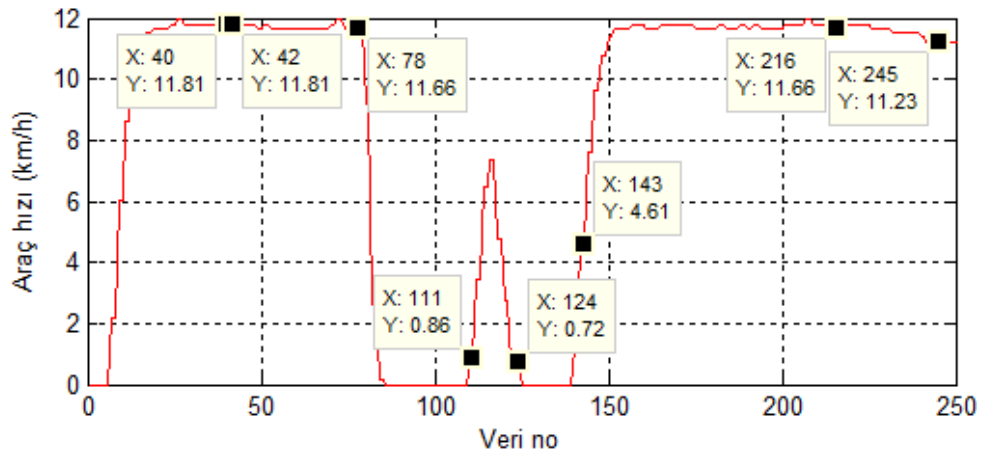


Şekil 5.22 Hamdullah Suphi Tanrıöver Caddesine ait detaylar.

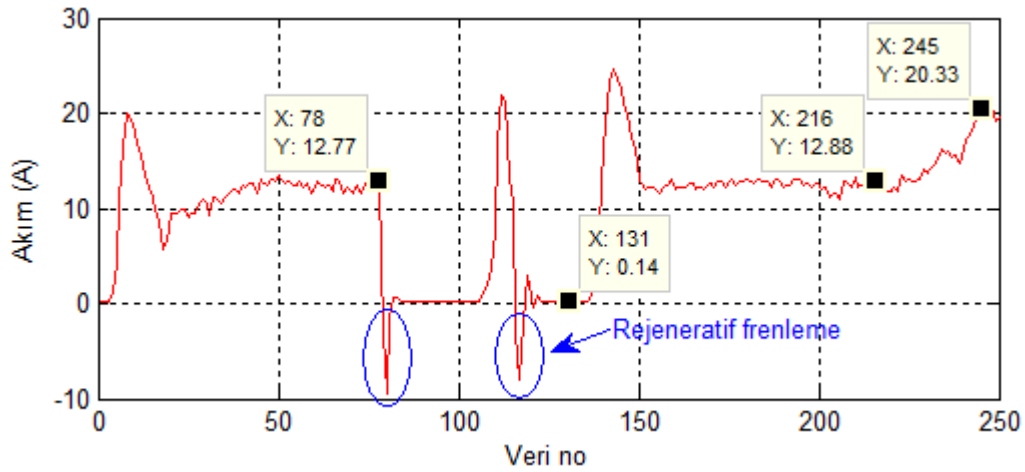
Bu güzergâhtaki yol eğimi, araç hızı, aküden çekilen akım, aküden çekilen güç ve akü uç geriliminin test boyunca değişimleri Şekil 5.23’de verilmiştir.



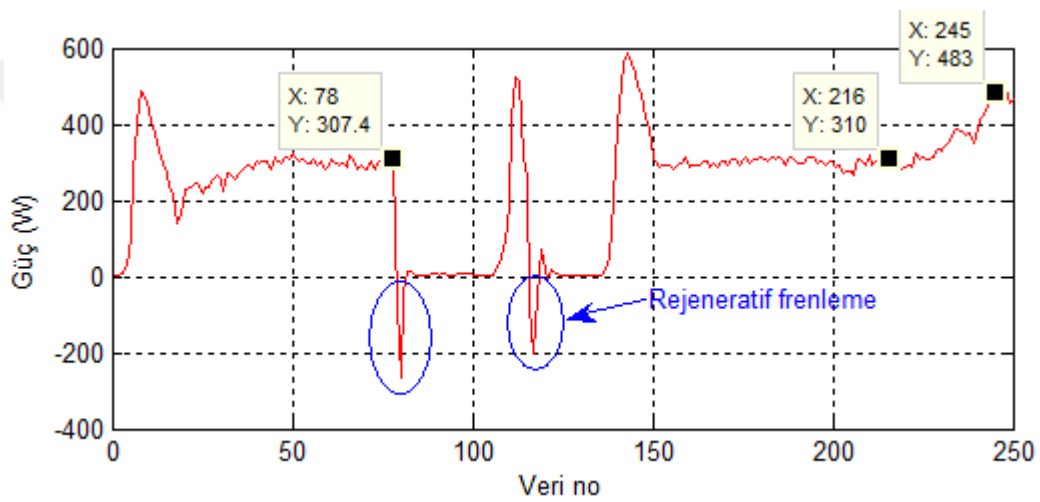
(a)



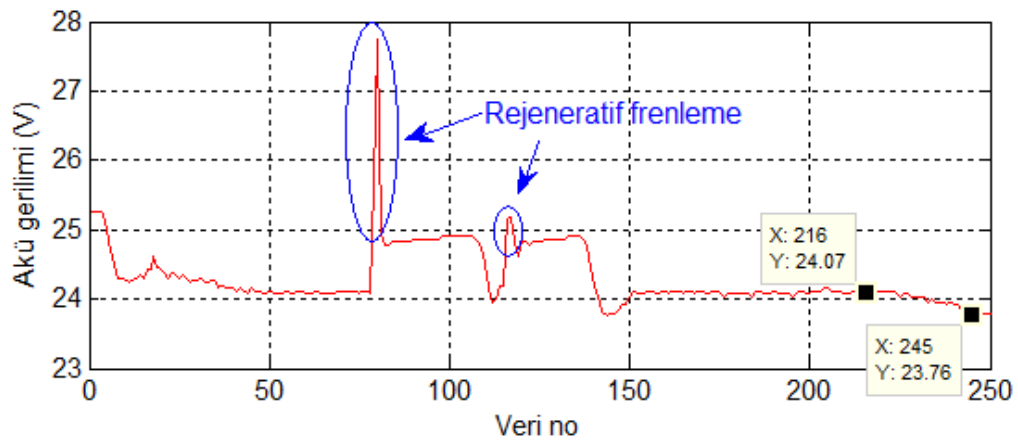
(b)



(c)



(d)



(e)

**Şekil 5.23** Hamdullah Suphi Tanrıöver caddesinde yapılan teste ilişkin grafikler  
**(a)** Yol eğimi, **(b)** Araç hızı, **(c)** Aküden çekilen akım, **(d)** Aküden çekilen güç, **(e)** Akü uç gerilimi.  
 (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,4748 s).

Analog çıkış veren eğim sensörü, aracın ivmeli ve titreşimli hareketi nedeniyle salınımlı sonuçlar üretmektedir. Şekil 5.23'deki eğim ve aracın hız grafikleri birlikte incelendiğinde hızlanma ve yavaşlama sırasında eğim sensörünün normalin çok çok üstünde ve altında bir sonuç ürettiği, hızın sabit seyrettiği bölümlerde ise sadece aracın titreşiminden kaynaklanan ancak ivmeli harekettekine kıyasla oldukça düşük olan salınımlı bir çıkış ürettiği görülmektedir.

Örneğin hız grafiğindeki 40. ve 42.verilere bakıldığında hızın sabit (11,81 km/h) olduğu görülmektedir. Eğim grafiğinde de aynı numaralı verilere bakıldığında eğiminin sırasıyla  $-0,9^{\circ}$  ve  $0,9^{\circ}$  olduğu, dolayısıyla tepeden tepeye  $1,8^{\circ}$ 'lik bir farkın olduğu görülmektedir. Bu durum, şayet araç ivmeli hareket yapmazsa sadece aracın titreşiminden kaynaklanan ve normal değere göre yaklaşık  $\pm 0,9^{\circ}$ 'lik hatanın olduğunu göstermektedir. Ancak sensörün titreşim yapması önlenebilirse o zaman salınımsız, kesin sonuç alınmaktadır. Bu durum, aracın hareketsiz olduğu 100. ve 131. veri civarı incelendiğinde rahatlıkla görülebilir. Eğim grafiğindeki 100. ve 131. verilere dikkat edildiğinde eğimlerin sırasıyla  $0,1^{\circ}$  ve  $0,2^{\circ}$  olduğu görülmektedir.

Şekil 5.23.a'daki eğim grafiğinde ortalama  $0,2^{\circ}$  civarında seyreden yol eğiminin 216. veriden sonra artmaya başladığı ve deneyin sonlarında ortalama  $1,9^{\circ}$ 'ye ulaştığı görülmektedir. Eğimdeki bu  $1,7^{\circ}$ 'lik artışın araç hızı, aküden çekilen akım, aküden çekilen güç ve akü uç gerilimi grafiklerine yansımaları ayrı ayrı incelenecek olursa:

- $0,2^{\circ}$ 'lik yol eğiminde 11,66 km/h olan araç hızı,  $1,9^{\circ}$ 'lik eğime ulaşıldığında 11,23 km/h'a düşmüştür. Yani araç hızı % 3,69 azalmıştır.
- $0,2^{\circ}$ 'lik yol eğiminde 12,88 A olan akü akımı,  $1,9^{\circ}$ 'lik eğime ulaşıldığında 20,33 A'e çıkmıştır. Yani aküden çekilen akımda % 57,8'lik bir artış olmuştur.
- $0,2^{\circ}$ 'lik yol eğiminde aküden 310 W güç çekilirken,  $1,9^{\circ}$ 'lik eğime ulaşıldığında bu değer 483 W'a yükselmiştir. Dolayısıyla aküden çekilen güçte % 55,8'lik artış söz konudur.
- $0,2^{\circ}$ 'lik yol eğiminde akü uç gerilimi 24,07 V iken  $1,9^{\circ}$ 'lik eğime ulaşıldığında bu değer 23,76 V'a düşmüştür. Yani akü geriliminde % 1,29'luk bir azalma olmuştur.

Gittikçe artan bir eğime sahip yolda test yapmak, eğimin araç parametreleri üzerindeki etkisini daha net görmeyi sağlayacaktır. Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesindeki Ali Fuat Cebesoy Caddesinde (Hukuk Fakültesi

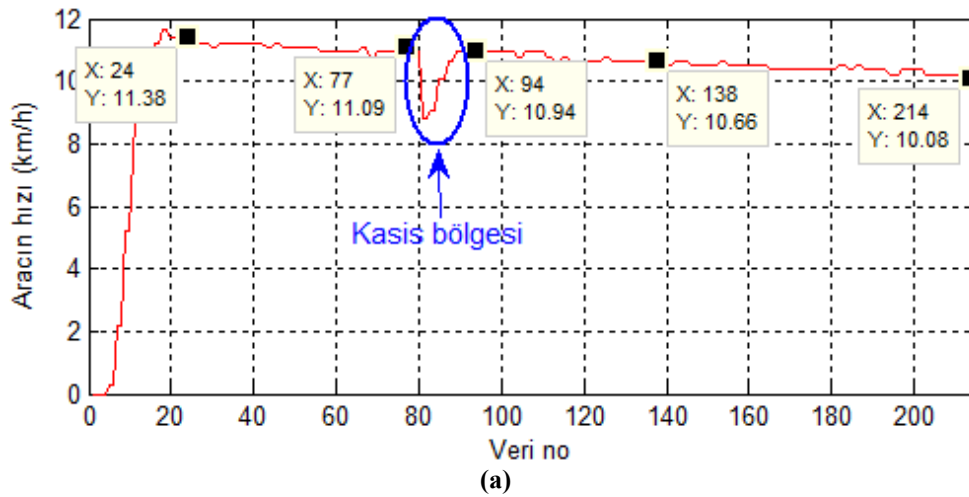


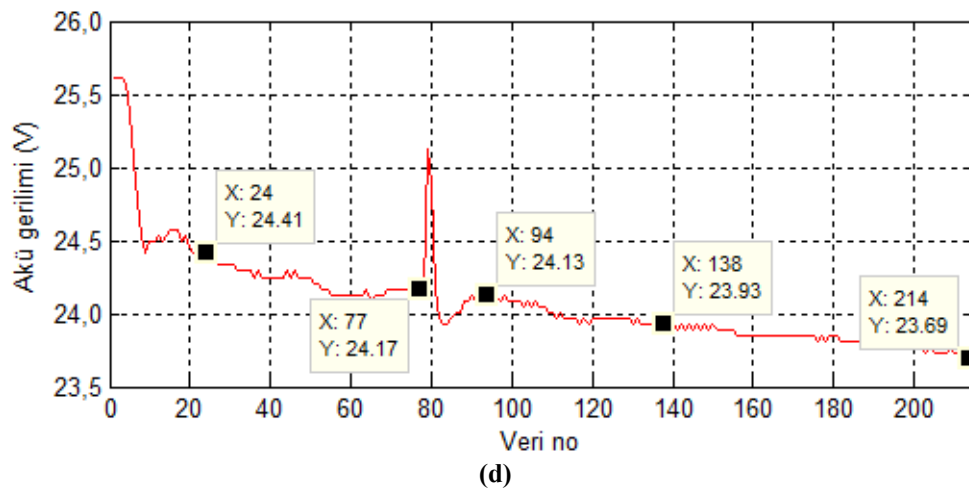
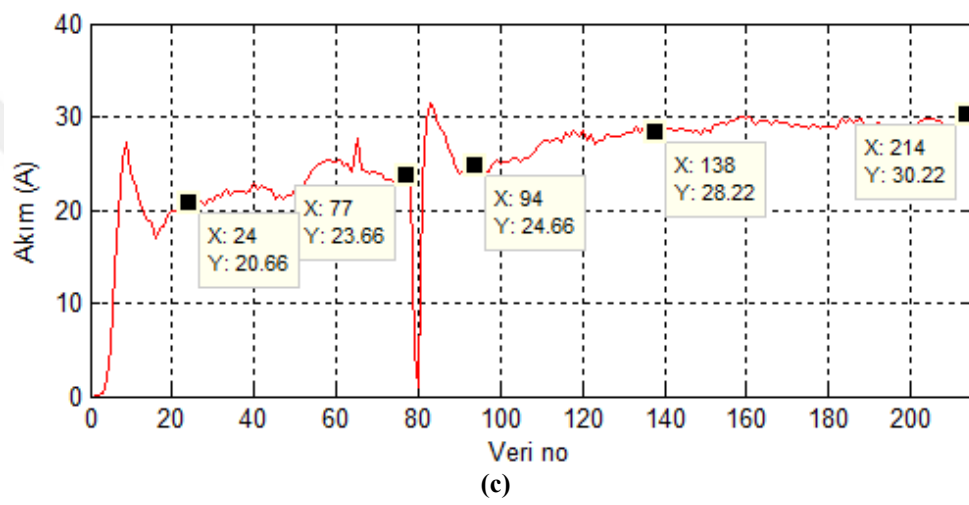
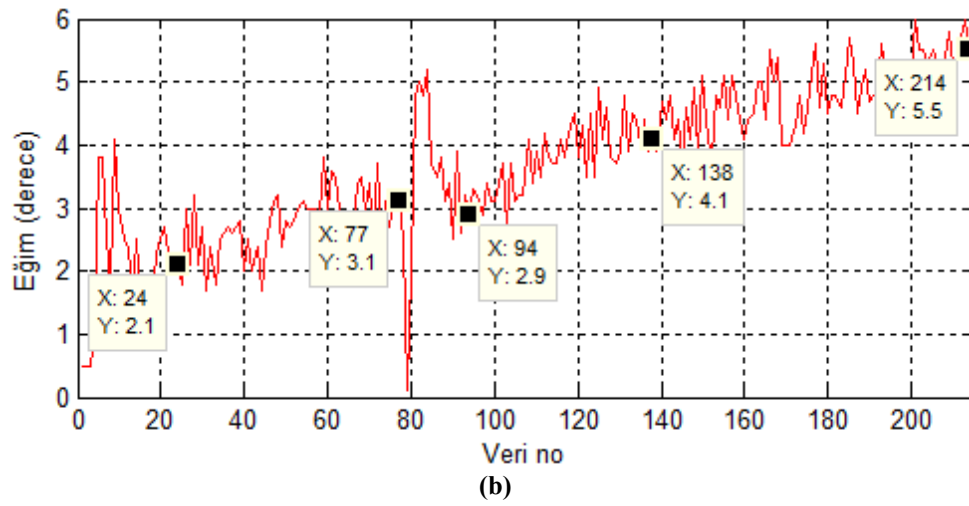
önündeki caddede) test yapılmıştır. Söz konusu caddeye ait detaylar Şekil 5.24'de görülmekte olup aracın hareket yönü A noktasından B noktasına doğrudur.

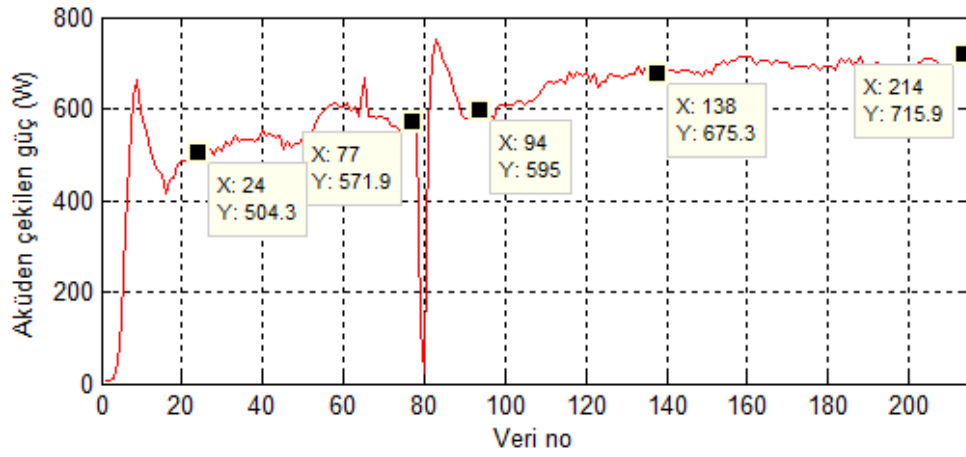


Şekil 5.24 Ali Fuat Cebesoy Caddesine ait detaylar.

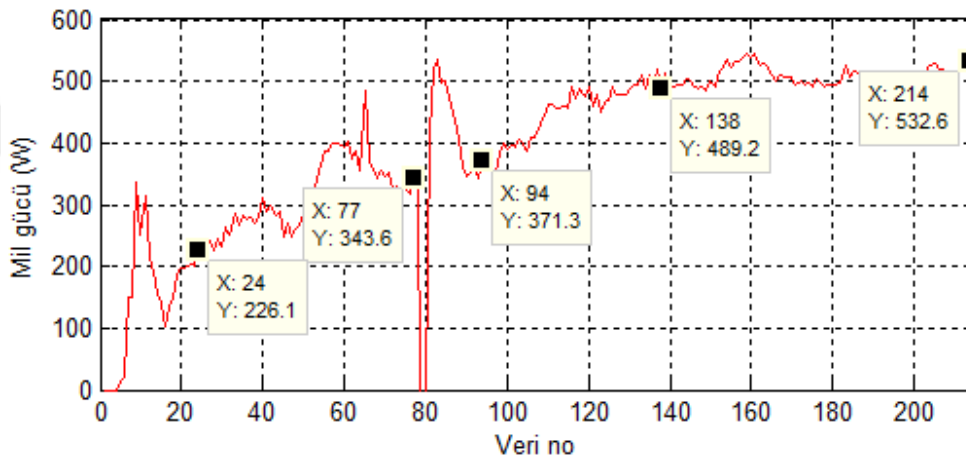
Yaklaşık 300 m'lik bu güzergâha ait araç hızı, yol eğimi, aküden çekilen akım, akü uç gerilimi, aküden çekilen güç ve mil gücü grafikleri Şekil 5.25'de verilmiştir. Bu testte aracın hızlanma ve yavaşlama gibi geçici rejimleri dikkate alınmayıp karalı rejimdeki davranışları incelenecektir. Bu nedenle grafiklerde aracın hızlanma bölgesi olan 24.veriye kadarki bölüm dikkate alınmayacaktır. Aynı şekilde, yola yerleştirilen kasis nedeniyle aracın yavaşlayıp tekrar hızlandığı bölge de inceleme dışında tutulacaktır.







(e)



(f)

Şekil 5.25 Ali Fuat Cebesoy caddesinde yapılan teste ilişkin grafikler

(a) Araç hızı, (b) Yol eğimi, (c) Aküden çekilen akım, (d) Akü uç gerilimi, (e) Aküden çekilen güç, (f) Mil gücü (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,4711 s).

Grafikteki verilerin daha anlaşılır olmasını sağlamak ve grafikleri daha doğru yorumlayabilmek için grafikler üzerinde işaretlenen noktalar ve ilgili değerleri Tablo 5.3'de toplanmıştır.

**Tablo 5.3** Şekil 5.25'deki grafiklerde data cursor yardımıyla işaretlenen noktalar ve değerleri.

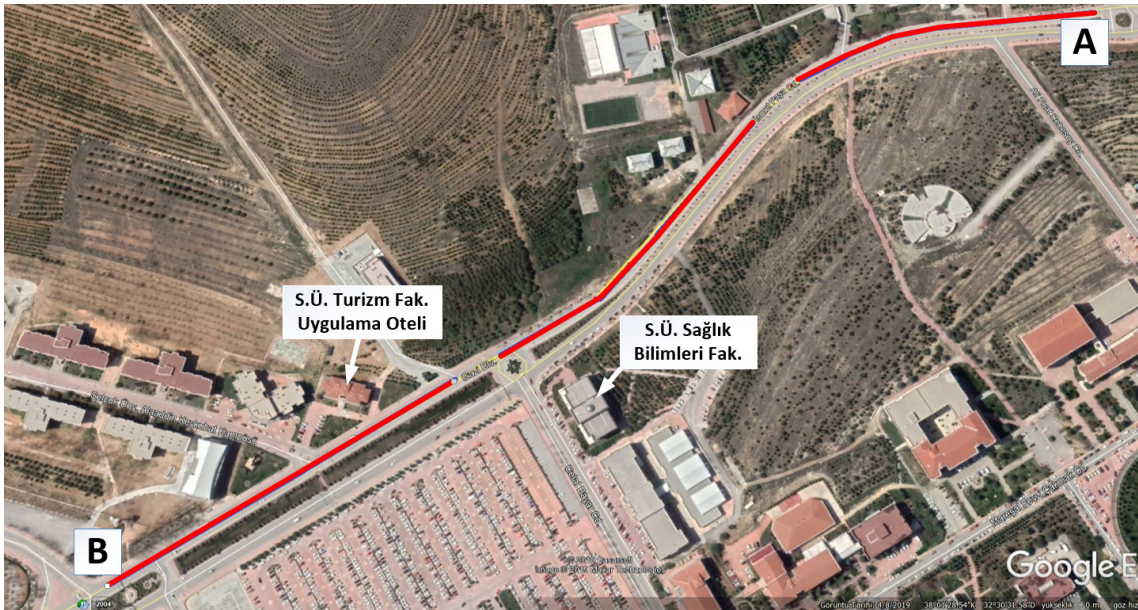
Veri no	Eğim (°)	Akü akımı (A)	Akü gerilimi (V)	Araç hızı (km/h)	Aküden çekilen güç (W)	Mil gücü (W)
24	2,1	20,66	24,41	11,38	504,3	226,1
77	3,1	23,66	24,17	11,09	571,9	343,6
94	2,9	24,66	24,13	10,94	595,0	371,3
138	4,1	28,22	23,93	10,66	675,3	489,2
214	5,5	30,22	23,69	10,08	715,9	532,6

Hatırlanacağı üzere bir önceki testte  $0,2^\circ$ 'lik yol eğiminde 12,88 A olan akü akımı,  $1,9^\circ$ 'lik yol eğimine ulaşıldığında 20,33 A'e yükselmişti. Bu testte de  $2,1^\circ$ 'lik yol eğiminde akü akımının 20,66 A olarak ölçülmüş olması, sistemin kararlı çalıştığını göstermektedir.

Tablo 5.3'deki veriler ayrı ayrı değerlendirilecek olursa:

- Eğimin % 161,9 artarak  $2,1^\circ$ 'den  $5,5^\circ$ 'ye çıkması, akü akımının 20,66 A'den 30,22 A'e çıkmasına neden olmuştur. Bu da akımda % 46,27'lik bir artış demektir. Bir önceki testte  $0,2^\circ$ 'lik yol eğiminde 12,88 A olan akü akımı baz alındığında ise eğimdeki  $5,3^\circ$ 'lik artış akımda % 134,63'lük bir artışa yol açmıştır.
- Eğimin  $2,1^\circ$ 'den  $5,5^\circ$ 'ye çıkması, artan güç tüketimi nedeniyle gerilimde 0,72 V'luk azalmaya neden olmuştur. Bu da % 2,95'lik bir azalma demektir.
- Eğimin  $2,1^\circ$ 'den  $5,5^\circ$ 'ye çıkması araç hızında % 11,42'lik bir azalmaya neden olmuştur.
- Araç  $5,5^\circ$ 'lik eğime ulaştığında bile mil gücünün 532,6 W'ta kaldığı görülmektedir. Hatırlanacağı üzere, kullanılan PMDC motorun anma gücü 750 W'tır.
- Aküden çekilen güç ve mil gücü birlikte değerlendirildiğinde,  $2,1^\circ$ 'lik eğimde % 44,83 olan sistem verimi  $5,5^\circ$ 'lik eğimde % 74,40'a çıkmıştır. Bu durum, aracın kullanılacağı bölgeye göre motor güçlerinin belirlenerek sistem veriminde artış sağlamayı zorunlu kılmaktadır.

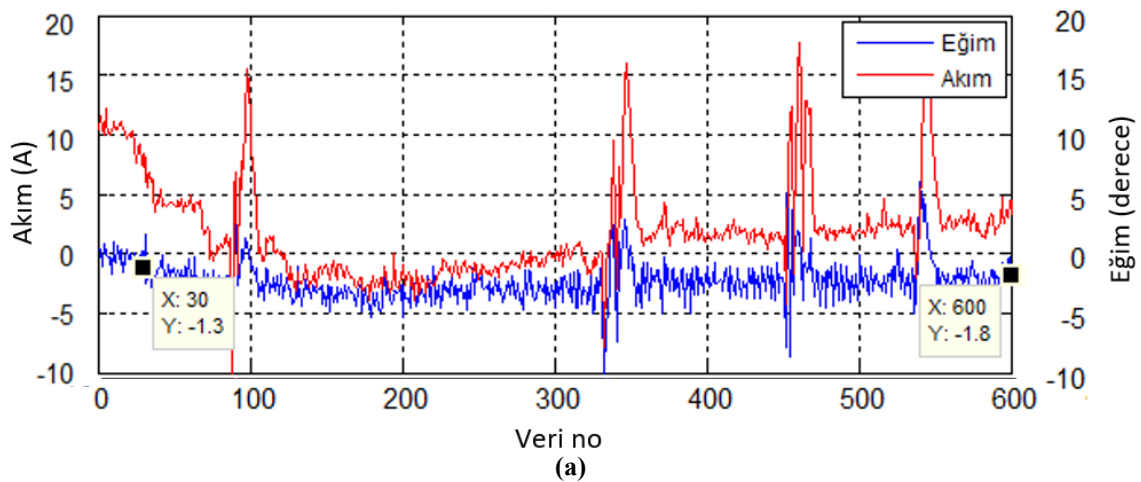
Aracın yavaşlama nedeniyle rejeneratif frenleme yaptığı, yani akım yönünün motordan aküye doğru olduğu Şekil 5.23.c'de görülmüştü. Aynı durumun negatif yol eğiminin tüm değerlerinde gerçekleşeceği öngörülebilir. Ancak testler sırasında bunun böyle olmadığı fark edilmiştir. Bunu detaylı olarak araştırmak için yaklaşık 900m boyunca negatif eğime sahip olan Şekil 5.26'daki güzergâh seçilmiştir. Bu güzergâh, Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesindeki İsmet Paşa Caddesinden başlayıp Gazi Bulvarında sonlanmaktadır. Aracın hareket yönü A noktasından B noktasına doğrudur.

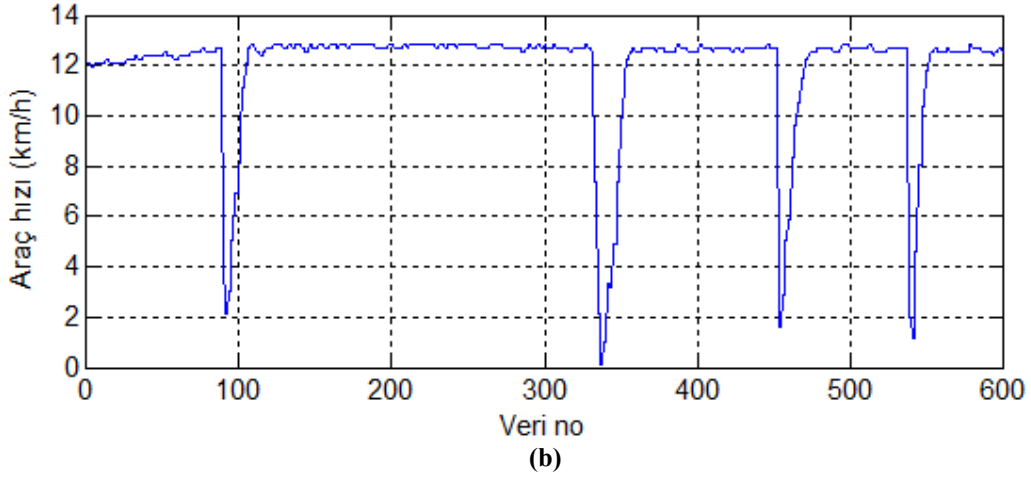


Şekil 5.26 Rejeneratif frenlemenin araştırıldığı güzergâh.

Söz konusu güzergâhta yapılan testte yol eğiminin, aküden çekilen akımın ve araç hızının test boyunca değişimleri Şekil 5.27’de verilmiştir. Akımın yol eğimine bağlı değişimini daha net görebilmek için akım ve eğim aynı grafikte (Şekil 5.27.a’da) verilmiştir.

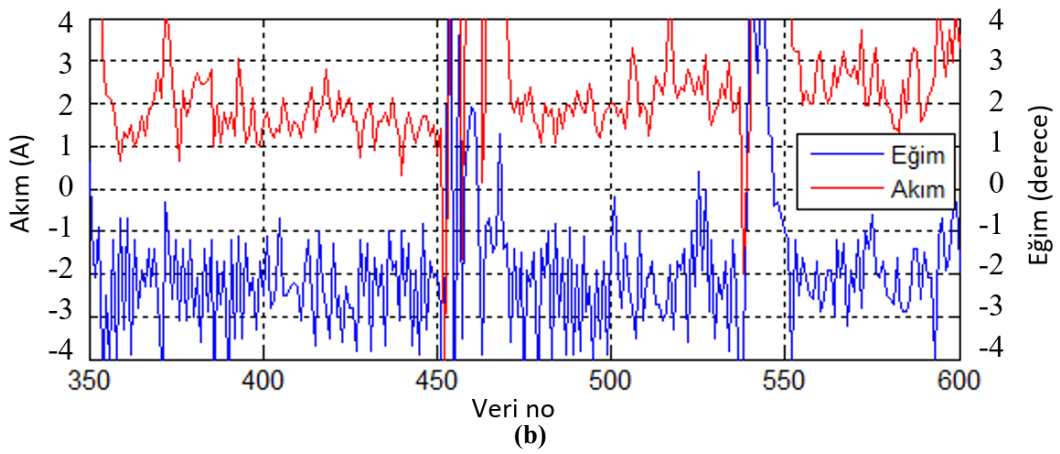
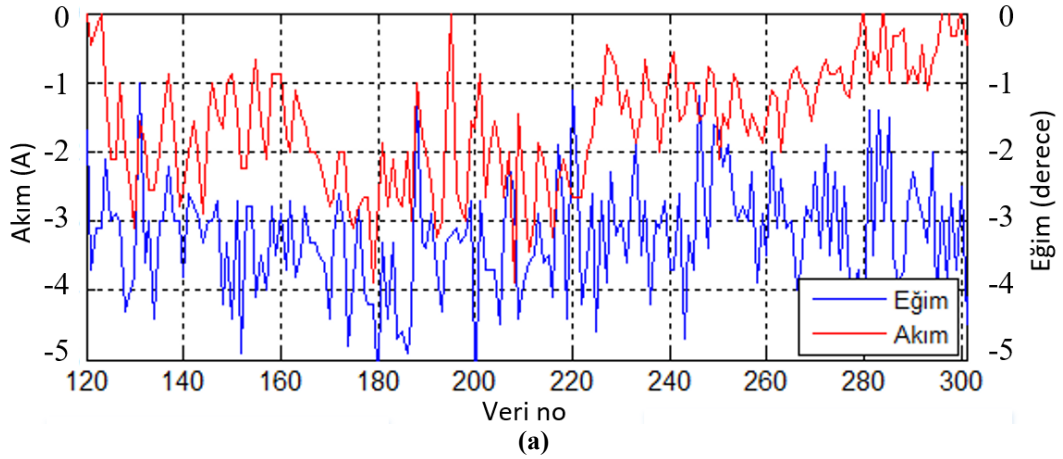
Eğim grafiği incelendiğinde 30.veriden itibaren eğimin kararlı bir şekilde negatif değer almaya başladığı görülmektedir. Negatif eğim, yoldaki hız kesici kasisler nedeniyle araç hızının düşürülüp tekrar yükseltilmesinden kaynaklanan geçici rejim dışında 600. veriye kadar düzenli bir şekilde devam etmektedir. Bu geçici rejimin kaynağı olan araç hızındaki azalma ve yükselme, Şekil 5.27.b’deki hız grafiği incelendiğinde görülecektir.





Şekil 5.27 Rejeneratif frenleme testine ait grafikler (a) Eğim ve akım grafiği, (b) Araç hızı grafiği (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,4859 s).

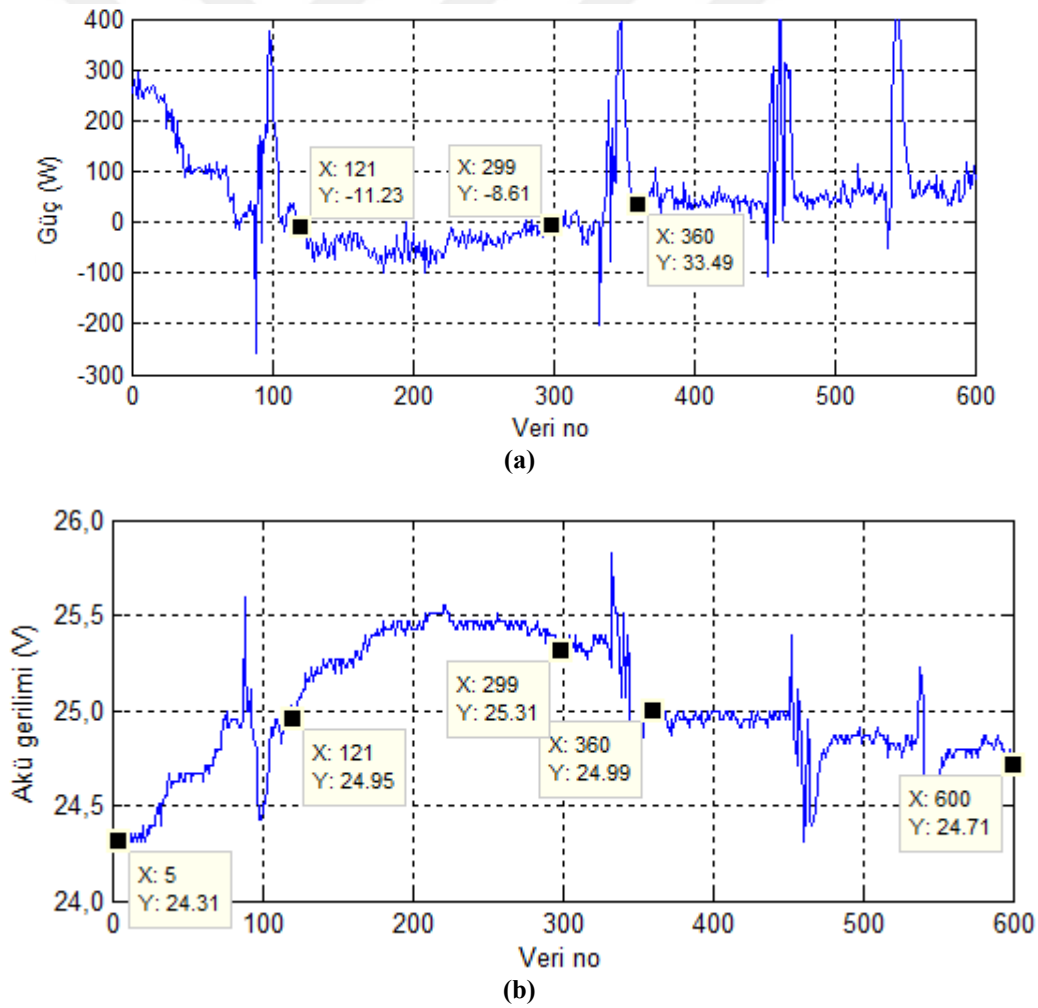
Eğimin değerine bağlı olarak rejeneratif frenlemenin başladığı akım değerini daha net görebilmek için eğim-akım grafiğinin 120-300. veriler arası ile 350-600. veriler arası büyütülmüş ve Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.28 Rejeneratif frenlemeye ait eğim-akım grafiklerinde belirli bölgelerin büyütülmüş halleri (a) 120.-300. veriler arası (b) 350.-600. veriler arası (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,4859 s).

Ortalama eğimin  $-3^\circ$ 'den daha küçük olduğu bölgelerde akü akımının belirgin bir şekilde negatif değer aldığı, yani akünün şarj olduğu görülmektedir (Şekil 5.28.a). Eğimin  $-2^\circ$  ve daha büyük olduğu bölgelerde ise akü akımının pozitif değer aldığı, yani akünün deşarj olduğu görülmektedir (Şekil 5.28.b). Ancak bu bölgede aküden çekilen akım değeri düz yoldakine kıyasla oldukça küçük olup ortalama 1,5 A ile 2,5 A arasında değişmektedir. Bu da aracın elektromanyetik fren sistemini devre dışı bırakmak için çekilen akımdır.

Rejeneratif frenleme testi süresince negatif yol eğiminden etkilenen ana eleman hiç kuşkusuz akü olmuştur. Dolayısıyla aküden çekilen gücün ve akü uç geriliminin test boyunca değişimini incelemek, negatif eğimin etkisini farklı bir açıdan görmemizi sağlayacaktır. Bu amaçla çizdirilen aküden çekilen güç ve akü uç gerilimi grafikleri Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29 Rejeneratif frenleme testine ait grafikler

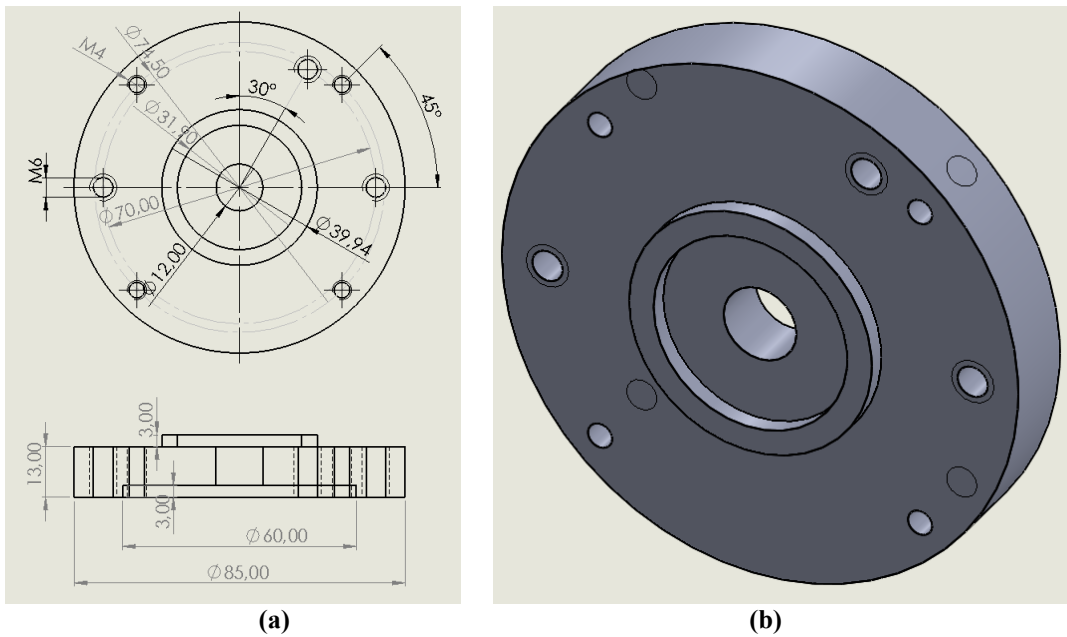
(a) Aküden çekilen güç, (b) Akü uç gerilimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,4859 s).

Şekil 5.29.a'daki aküden çekilen güç grafiği incelendiğinde, 121-299. veriler arasında güç akışının kesintisiz olarak motordan aküye doğru olduğu, yani negatif yol eğimi nedeniyle akünün sürekli şarj olduğu görülmektedir. 299. veriden sonra ise geçici rejimler dışında eğim sürekli negatif olmasına rağmen aküden güç çekilmeye başlandığı göze çarpmaktadır.

Şekil 5.29.b'deki akü gerilimi grafiği incelendiğinde ise, akünün kesintisiz olarak şarj olduğu 121-299. veriler arasında akü uç geriliminin 0,36 V artarak 24,95 V'tan 25,31 V'a yükseldiği görülmektedir. Kasisten geçiş bölgesi dikkate alınmayıp 360. veriden sonrası incelendiğinde ise, aküden çekilen gücün kademeli olarak artmasına bağlı olarak akü uç geriliminin de kademeli olarak azaldığı göze çarpmaktadır. Tüm test dikkate alındığında ise başlangıçta 24,31 V olan akü geriliminin test sonunda 24,71 V'a yükseldiği görülmektedir.

### 5.3 PM Senkron Motorlu Akülü Scooter İle Yapılan Test Çalışmaları

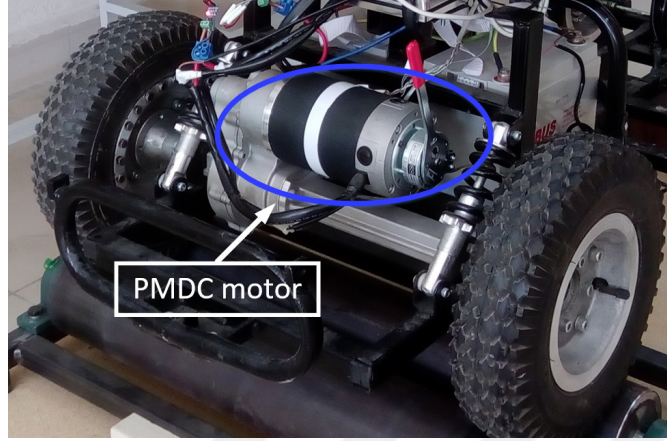
PM senkron motorlu araçla deneylerin yapılabilmesi için öncelikle akülü scooter üzerinde bulunan PMDC motorun yerine PM senkron motorun takılması gerekir. Ancak araç üzerindeki redüktörün PMDC motora göre yapılmış olması, PM senkron motorun doğrudan redüktöre takılmasını olanaksız kılmıştır. Bunu sağlayabilmek için Şekil 5.30'da görülmekte olan flanş tasarlanmış ve CNC tezgâhında işlenmiştir.



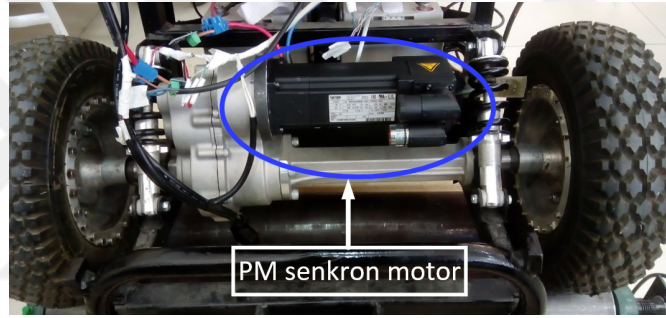
Şekil 5.30 PM senkron motorun redüktöre monte edilebilmesi için tasarlanmış olan flanş  
(a) Teknik resim (b) Katı model



Üretilen bu parça sayesinde PM senkron motorun redüktöre montajı sağlanmış ve araç deneylere hazır hale getirilmiştir. Aracın PMDC ve PM senkron motorlu hâli Şekil 5.31’de görülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 5.31** Aracın, PM senkron motorun montajından önceki ve sonraki hâli  
(a) PMDC motorlu (b) PM senkron motorlu

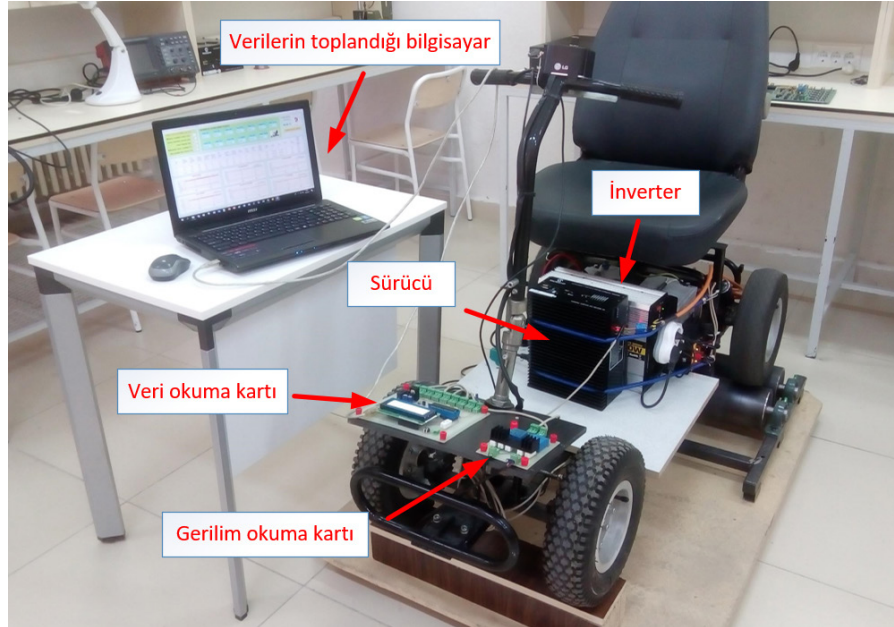
Araca takılan ve detaylı özellikleri Ek-2’de verilen MCS06I41L kodlu 640 W, 4050 d/dk anma değerlerine sahip PM senkron motorun sürülmesinde Microchip tarafından üretilen ve denetleyici olarak 33E ve 33F serisi dsPIC kullanılabilen dsPICDEM™MCHV-2 geliştirme kartı kullanılmıştır. Bu kart, dsPIC kullanılarak çok çeşitli motor kontrol uygulamalarının hızlı bir şekilde yapılmasına ve geliştirilmesine imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Sensörlü veya sensörsüz kullanımda yaklaşık 2 kVA’lık BLDC, PM senkron motor ve asenkron motorların kontrol edilebildiği bu donanımın programı kullanıcı tarafından MPLAB X IDE’de yazılmakta ve ilgili geliştirme kartına yüklenmektedir. Bu sayede motorların çalışma karakteristikleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Sürücünün ihtiyaç duyduğu 220 V’luk AC gerilim, 24 V<sub>DC</sub>’yi 220 V<sub>AC</sub>’ye dönüştüren 1,5 kW’lık bir inverter kullanılarak elde edilmiştir.

Araca takılan PM senkron motorda hız geri beslemesi olarak resolver bulunmaktadır. Ancak ticari anlamda motor maliyetini düşürmek için motordaki bu resolver dikkate alınmamış ve sensörsüz kontrol tercih edilmiştir. Bu araçlarda güvenlik amaçlı hız sınırlaması bulunduğundan motorun anma hızı üzerinde çalışmasına gerek yoktur. Bu nedenle alan zayıflatma yerine alan yönlendirmeli kontrol yöntemi tercih edilmiştir.<sup>3</sup> Kontrol yöntemine herhangi bir yenilik getirilmediğinden yazılıma dair detaylar burada sunulmamıştır.

Yazılımın gerçekleştirilmesi ve araçtaki yapısal değişikliğin ardından deneysel çalışmalara geçilmiştir. PM senkron motorlu araçla hem laboratuvarında hem de dış ortamda toplam 41 adet test yapılmış olup 545 km yol kat edilmiştir.

### 5.3.1 Laboratuvarında yapılan test çalışmaları

PMDC motorlu araçta olduğu gibi PM senkron motorlu araçla da öncelikle aracın boş koltukla düz yoldaki ( $0^\circ$ 'lik eğimdeki) davranışı ve toplamda ne kadar mesafe kat edeceği araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan testler sırasında alınan bir görüntü Şekil 5.32'de verilmiştir. Testlerden elde edilen toplam mesafe ve aküden çekilen enerji bilgileri ise Tablo 5.4'de sunulmuştur.



Şekil 5.32 PM senkron motorlu aracın koltuğu boşken yapılan bir test sırasında çekilmiş resim.

<sup>3</sup> Tezin bu bölümünde sunulan çalışma, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19) isimli uluslararası sempozyumda sözlü olarak sunulmuştur.

**Tablo 5.4** PM senkron motorlu aracın laboratuvar testinde boş koltukla tükettiği toplam enerji ve kat ettiği toplam mesafe bilgileri.

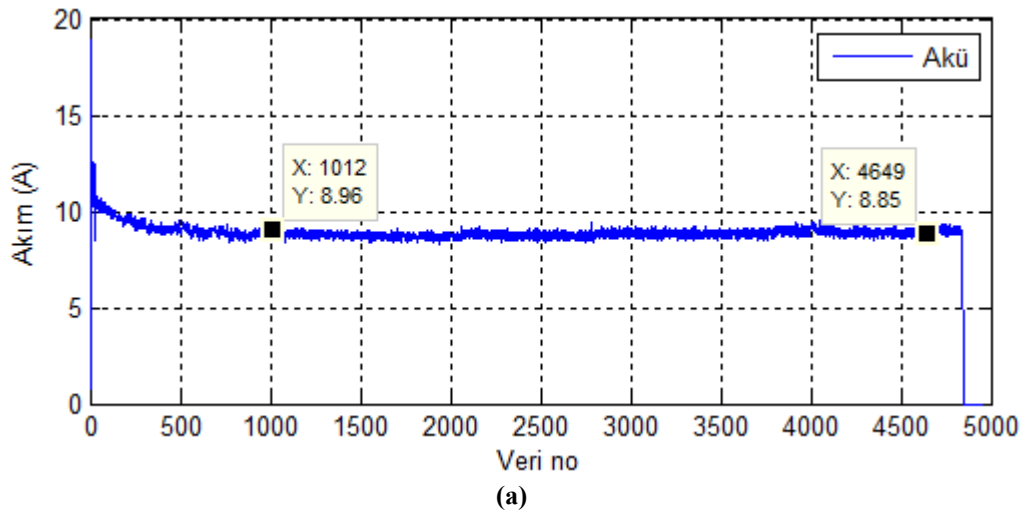
Test no	$W$ (Wh)	$X_t$ (km)	$W/X_t$ (Wh/km)
1	318,19	20,21	15,74
2	337,95	21,32	15,85
3	351,38	22,25	15,79
Ort.	335,84	21,26	15,79

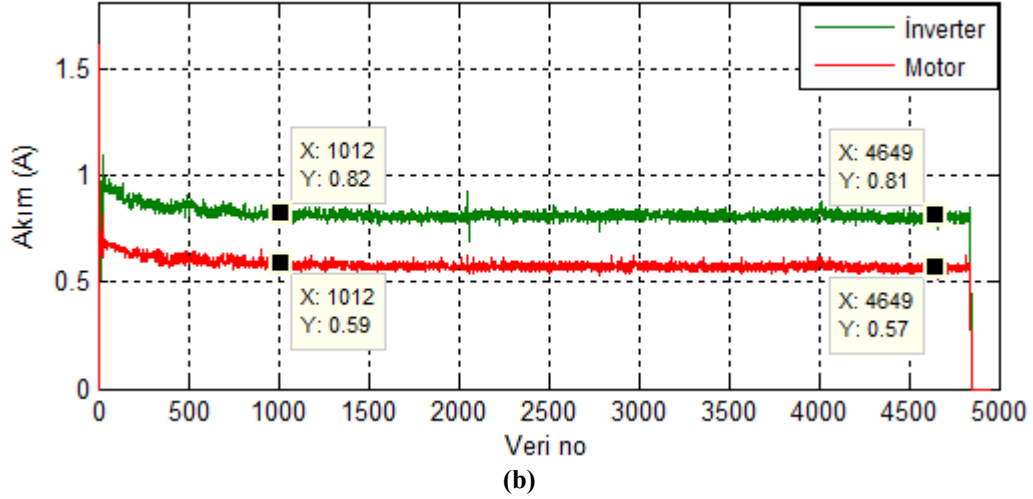
Tablo 5.4'deki veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılabacaktır:

- PM senkron motorlu aracın boş koltukla 1 km yol alabilmesi için aküden çekmesi gereken ortalama enerji 15,79 Wh'dir.
- Tam şarjla kat ettiği ortalama mesafe 21,26 km'dir.

PM senkron motorlu aracın PMDC motorlu araçla kıyaslanabilmesi için sadece aküden çekilen akımların incelenmesi gerekir. Çünkü her iki motorun çalışma gerilimlerinin türleri ve değerleri farklı olduğundan çektikleri akım değerleri ve türleri de farklıdır.

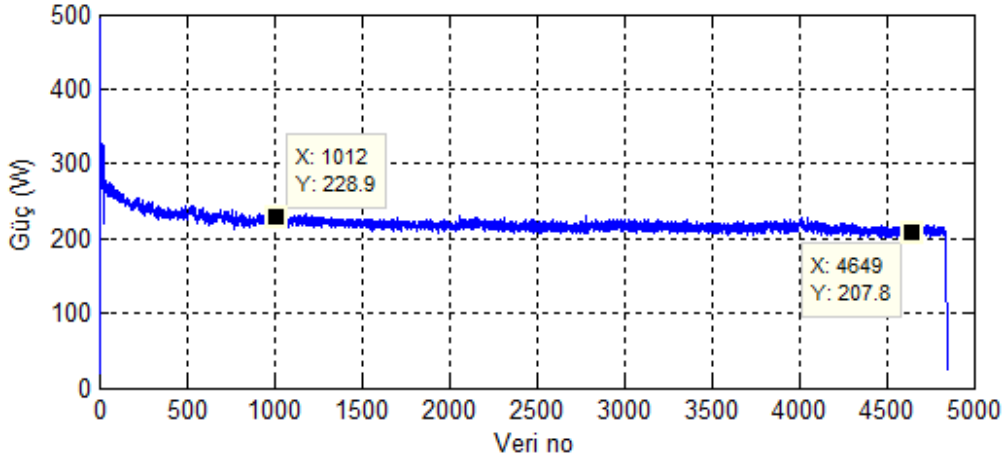
PMDC motorlu testlerde olduğu gibi PM senkron motorlu testlerde de test sırasında aküden çekilen akımın zamanla azaldığı görülmüştür. PM senkron motorlu araçla 22,25 km yol kat edilen teste ilişkin akım grafikleri Şekil 5.33'de verilmiştir. Fakat inverter akımıyla motorun bir faz akımının etkin değer grafikleri de bilgi amaçlı olarak sunulmuştur. İnverter ve motor akımının değerleri akü akımına kıyasla oldukça küçük olduğundan değişimlerinin daha iyi incelenebilmesi için akü akımı grafiği Şekil 5.33.a'da, inverter ve motor akımı grafikleri ise Şekil 5.33.b'de verilmiştir.





**Şekil 5.33** PM senkron motorlu aracın boş koltukla 22,25 km yol kat ettiği test boyunca akımların değişimleri (a) Aküden çekilen akım, (b) İncevter akımı ile motorun bir faz akımının etkin değeri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,021 s).

Yukarıda da bahsedildiği gibi iki sistemin kıyaslanmasındaki referans nokta, aküden çekilen enerjidir. Bu nedenle PM senkron motorlu aracın çektiği güç ile sistemdeki kayıp güç değerleri hesaplanmayıp sadece aküden çekilen güç verileri toplanmıştır. Aküden çekilen gücün ilgili test boyunca değişimi Şekil 5.34’de verilmiştir. Bu test sırasında aküden çekilen gücün ortalama değeri 223,06 W olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 5.34** PM senkron motorlu aracın boş koltukla 22,25 km yol kat ettiği testte aküden çekilen gücün deney boyunca değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,021 s).

Boş koltukla yapılan testlerin ardından kullanıcı testlere geçilmiştir. PM senkron motorlu aracın kullanıcı testinde koltuğa oturan kişi, PMDC motorlu testtekiyle aynı olduğundan araç üzerindeki yük de aynı olup 95 kg’dır. Yapılan testler sırasında alınan bir görüntü Şekil 5.35’de verilmiştir. Testlerden elde edilen kat edilen toplam mesafe ( $X_i$ ),

aküden çekilen toplam enerji ( $W$ ) ve aracın 1km yol kat etmesi için aküden çekmesi gereken enerji bilgileri Tablo 5.5’de sunulmuştur.



**Şekil 5.35** PM senkron motorlu araç 95 kg’lık bir kullanıcıyı taşıırken yapılan bir test sırasında çekilmiş resim.

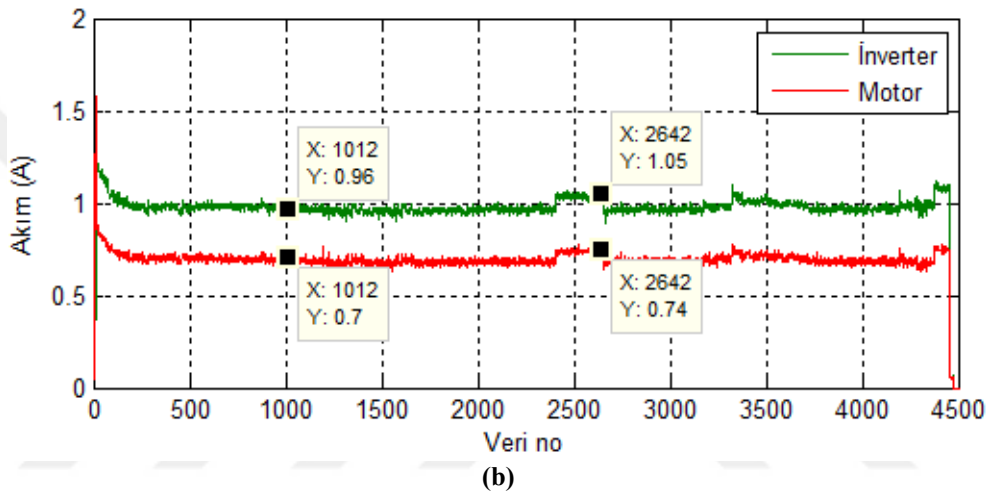
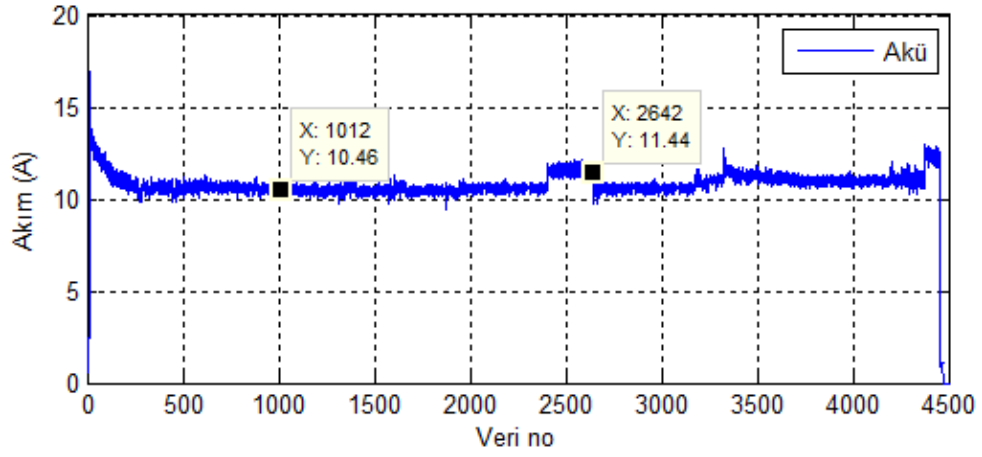
**Tablo 5.5** PM senkron motorlu aracın laboratuvar testinde 95 kg’lık kullanıcıyla tükettiği toplam enerji ve kat ettiği toplam mesafe bilgileri.

Test no	$W$ (Wh)	$X_t$ (km)	$W/X_t$ (Wh/km)
1	337,64	16,76	20,15
2	348,44	17,05	20,44
3	334,31	17,36	19,26
Ort.	340,13	17,06	19,95

Tablo 5.5’deki veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılabacaktır:

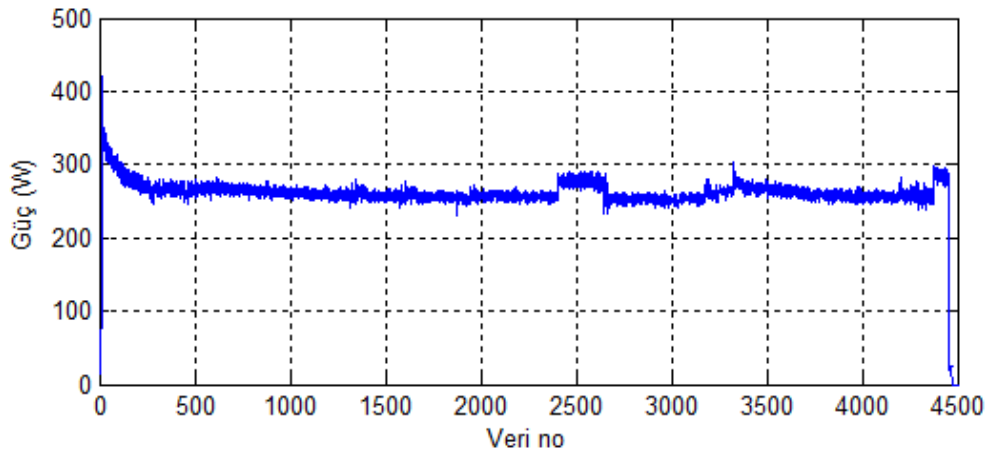
- PM senkron motorlu aracın 95 kg’lık kullanıcıyla 1 km yol alabilmesi için aküden çekmesi gereken ortalama enerji 19,95 Wh’dir.
- Tam şarjla kat ettiği ortalama mesafe 17,06 km’dir.

Aracın 17,36 km yol kat ettiği test boyunca akü, inverter ve motor akımlarının değişimi Şekil 5.36’da verilmiştir. Şekil 5.36.a incelendiğinde 2500. veri civarlarında akü akımında yaklaşık 1 A’lık keskin bir yükseliş olduğu görülmektedir. Bu durum, kullanıcının araç koltuğunu biraz geriye doğru yatırıp yaslanmasından kaynaklanmıştır.



**Şekil 5.36** PM senkron motorlu aracın 95 kg'lık kullanıcıyla 17,36 km yol kat ettiği test boyunca akımların değişimleri **(a)** Aküden çekilen akım, **(b)** İnverter akımı ile motorun bir faz akımının etkin değeri (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,021 s).

Aküden çekilen gücün ilgili test boyunca değişimi Şekil 5.37'de verilmiştir. Bu test sırasında aküden çekilen gücün ortalama değeri 261,71 W olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 5.37** PM senkron motorlu aracın 17,36 km yol kat ettiği deneyde aküden çekilen gücün test boyunca değişimi (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,021 s).

### 5.3.2 Dış ortamda yapılan test çalışmaları

PM senkron motorlu aracın laboratuvardaki menzil testlerinin ardından dış ortam testlerine geçilmiştir. Bu araçla yapılan testlerde PMDC motorludan farklı olarak kullanıcı ağırlığı ve yol eğiminin enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda farklı eğimlere sahip olan Şekil 5.38'deki güzergâh seçilmiştir. Testler A noktasından başlayıp B noktasında sonlanmıştır.



Şekil 5.38 PM senkron motorlu araçla Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesinde yapılan testin güzergâhı.

Laboratuvar testlerinde olduğu gibi PM senkron motorlu araçla yapılan dış ortam testlerinde de araç sabit hızda ve hiç durmadan test edilmiştir. Ancak laboratuvar testlerinde anma hızında çalıştırılan PM senkron motor, dış ortam testlerinde 1000 d/dk'da çalıştırılmıştır. Bunun nedeni, yüksek hız nedeniyle yaşanacak zorunlu durkalkların neden olduğu aşırı güç tüketimlerinin sonuçlar üzerindeki negatif etkisini önleyerek tüm kullanıcıların aynı koşullarda aracı kullanmasını sağlamaktır. Bu sayede daha doğru bir kıyaslama yapmak mümkün olacaktır.

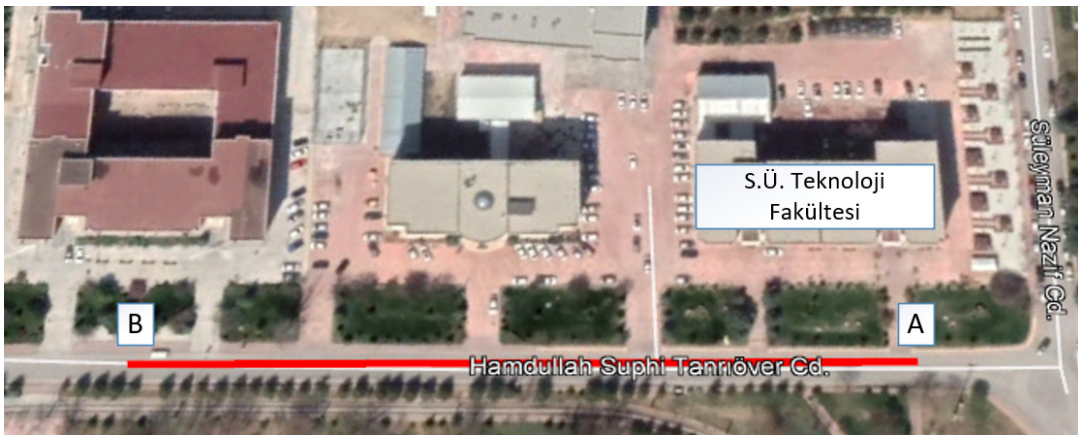
Elde edilecek kıyaslama sonuçlarının daha doğru olmasını sağlamak için her test işleminden önce aküler tam olarak şarj edilmiş ve testlere öyle başlanmıştır. Şekil 5.38'de

verilen güzergâhta araç öncelikle boş koltukla test edilmiştir. Daha sonra araç, aynı güzergâhta sırasıyla 35 kg, 50 kg, 70 kg ve 95 kg'lık kullanıcılar tarafından kullanılırken test edilmiştir. 70 kg'lık kullanıcı tarafından yapılan test sırasında alınmış bir görüntü Şekil 5.39'da verilmiştir.



Şekil 5.39 70kg'lık kullanıcıyı taşıyan PM senkron motorlu aracın test edilmesi sırasında alınmış bir görüntü.

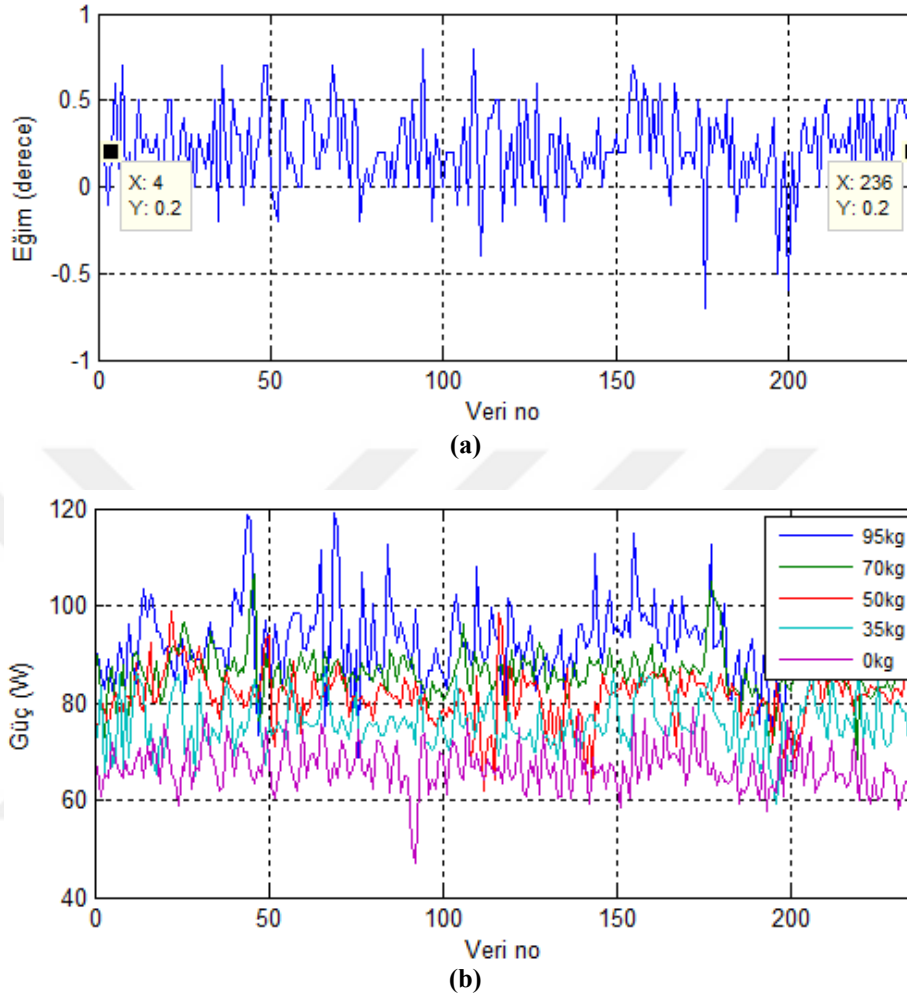
Ağırlıkların ve eğimin etkisini inceleyebilmek için öncelikle eğimin sıfıra çok yakın olduğu bölgedeki veriler kıyaslanacaktır. Hatırlanacağı üzere daha önce PMDC motorla Hamdullah Suphi Tanrıöver Caddesinde yapılan testte bu caddenin belli bir bölgesindeki eğimin  $0,2^\circ$  civarında olduğu tespit edilmişti (Şekil 5.23.a). Bu nedenle aynı caddede eğimin sabit ve sıfıra yakın olduğu 187 m'lik bu bölümdeki veriler dikkate alınacaktır. 187 m'lik bu güzergâh Şekil 5.40'da görülmektedir.



Şekil 5.40 Ortalama eğimin  $0,2^\circ$  olduğu 187 m'lik test güzergâhı.

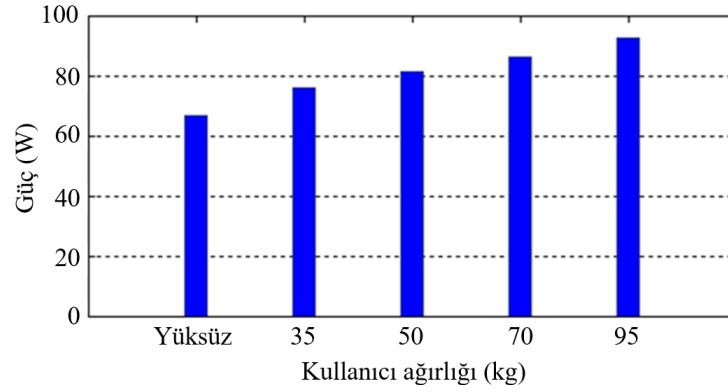


İlgili test güzergâhına ait yol eğiminin ve bu güzergâh boyunca aküden çekilen güçlerin değişimleri Şekil 5.41’de verilmiştir.



Şekil 5.41 Hamdullah Suphi Tanrıöver Caddesinde farklı kullanıcı ağırlıklarıyla yapılan testlere ilişkin grafikler (a) Yol eğimi, (b) Aküden çekilen güç (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,017 s).

Şekil 5.41.b’deki güç grafikleri incelendiğinde artan yolcu ağırlığına paralel olarak aküden çekilen güç değerlerinin arttığı net bir şekilde görülmektedir. 187m’lik bu parkur boyunca boş koltukla yapılan testte aküden çekilen anlık gücün ortalama değeri 66.68 W olarak gerçekleşmiştir. 35 kg, 50 kg, 70 kg ve 95 kg’lık kullanıcı ağırlıklarında aküden çekilen anlık güçlerin ortalama değerleri ise sırasıyla 75.72 W, 81.34 W, 86.21 W ve 92.53 W olarak gerçekleşmiştir. Kullanıcı ağırlığı ile ortalama anlık güç tüketimi arasındaki bu ilişki Şekil 5.42’deki grafikte de görülebilir.



Şekil 5.42 0,21°'lik yol eğiminde aküden çekilen ortalama anlık gücün kullanıcı ağırlığına göre değişimi.

Söz konusu güzergaha ait toplam mesafe ( $X_t$ ), kullanıcı ağırlıkları ( $m$ ), aküden çekilen toplam enerji ( $W$ ) ve aracın 1 km yol kat etmesi için aküden çekmesi gereken enerji ( $W/X_t$ ) bilgileri Tablo 5.6'da özetlenmiştir.

Tablo 5.6 0,21° eğimli yolda farklı kullanıcı ağırlıklı PM senkron motorlu aracın enerji tüketim bilgisi

$m$ (kg)	$W$ (Wh)	$X_t$ (km)	$W/X_t$ (Wh/km)
Yüksüz	4,45	0,187	23,80
35	5,05	0,187	27,01
50	5,33	0,187	28,50
70	5,75	0,187	30,75
95	6,17	0,187	32,99

Tablo 5.6'daki yüksüz teste ait 23,80 Wh/km'lik enerji tüketimi değeri baz alınarak yapılan km başına enerji tüketimi hesaplamalarında;

- 35 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 13.49 arttığı,
- 50 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 19.75 arttığı,
- 70 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 29.20 arttığı,
- 95 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 38.61 arttığı görülmüştür.

Bu da Wh/km değerlerinde kg başına sırasıyla % 0.39, % 0.39, % 0.42 ve % 0.41'lik artışa tekabül etmektedir. Dolayısıyla test edilen araç için 0,21°'lik eğime sahip bir yolda kullanıcı ağırlığındaki her 1 kg'lık artış, km başına aküden çekilen enerji miktarında ortalama % 0.40'lık bir artışa neden olmaktadır.

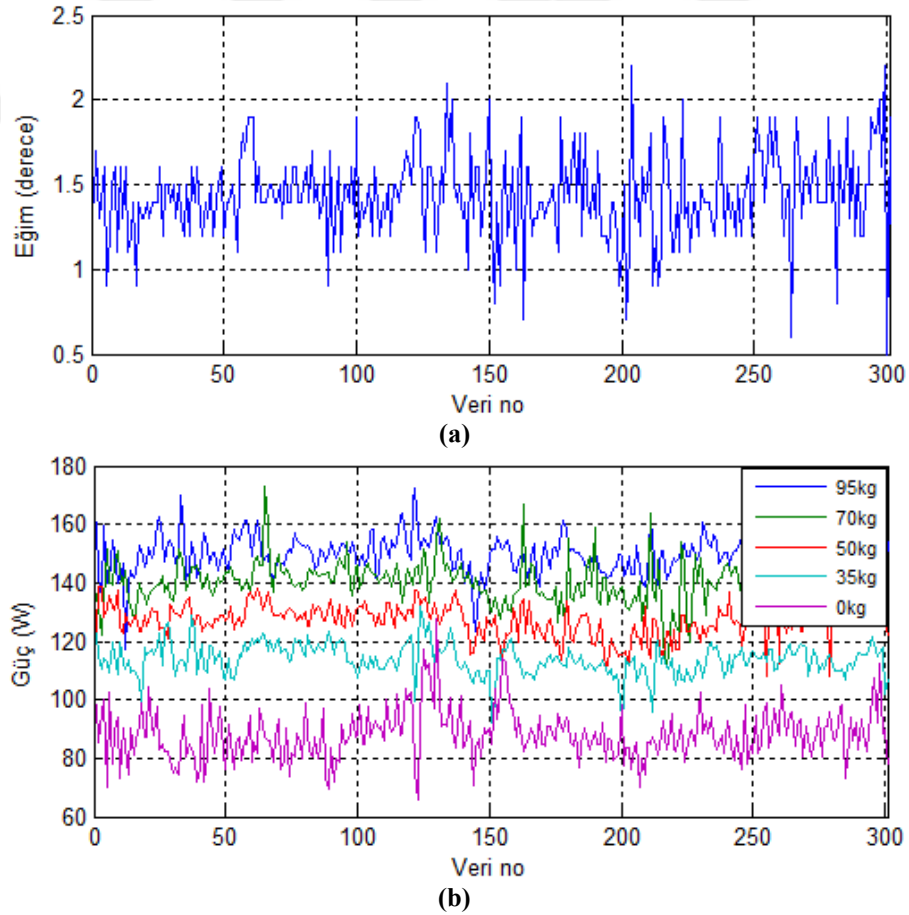
Hiç kuşkusuz yol eğimindeki artışın da bu oranlar üzerinde bir etkisi olacaktır. Aküden çekilen enerji miktarlarında yol eğiminin de etkisini görebilmek için bu defa ortalama eğimi 1,44° olan ve detayları Şekil 5.43'de verilen Celal Bayar Caddesinde test

yapılmıştır. Söz konusu cadde de Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat Yerleşkesinde bulunmakta olup test A noktasından B noktasına doğru yapılmıştır. Test yapılan bölüm caddenin 246 m'lik bölümüdür.



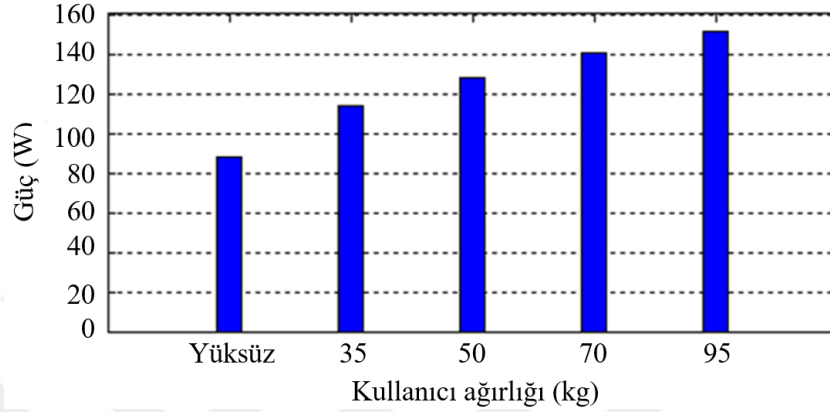
Şekil 5.43 Celal Bayar Caddesinde ortalama eğimin  $1,44^\circ$  olduğu 246 m'lik test güzergâhı.

İlgili test güzergâhına ait yol eğiminin ve bu güzergâh boyunca aküden çekilen güçlerin değişimleri Şekil 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.44 Celal Bayar Caddesinde farklı kullanıcı ağırlıklarıyla yapılan testlere ilişkin grafikler (a) Yol eğimi, (b) Aküden çekilen güç (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,017 s).

246 m'lik bu parkur boyunca yüksüz olarak yol alan aracın aküden çektiği anlık güçlerin ortalaması 88.3 W olarak gerçekleşmiştir. 35 kg, 50 kg, 70 kg ve 95 kg'lık kullanıcı ağırlıkları durumundaki ortalama güç değerler ise 113.83 W, 127.70 W, 140.75 W ve 150.97 W'dır. Kullanıcı ağırlığı ile ortalama anlık güç tüketimi arasındaki bu ilişki Şekil 5.45'deki grafikte de görülebilir.



Şekil 5.45 1,44°'lik yol eğiminde aküden çekilen ortalama anlık gücün kullanıcı ağırlığına göre değişimi.

Söz konusu güzergaha ait toplam mesafe ( $X_t$ ), kullanıcı ağırlıkları ( $m$ ), aküden çekilen toplam enerji ( $W$ ) ve aracın 1km yol kat etmesi için aküden çekmesi gereken enerji ( $W/X_t$ ) bilgileri Tablo 5.7'de özetlenmiştir.

Tablo 5.7 1,44° eğimli yolda farklı kullanıcı ağırlıklı PM senkron motorlu aracın enerji tüketim bilgisi

$m$ (kg)	$W$ (Wh)	$X_t$ (km)	$W/X_t$ (Wh/km)
Yüksüz	7,37	0,246	29,96
35	9,52	0,246	38,70
50	10,68	0,246	43,41
70	11,77	0,246	47,85
95	12,84	0,246	52,18

Tablo 5.7'deki 0kg testine ait 29,96 Wh/km'lik enerji tüketimi değeri baz alınarak yapılan km başına enerji tüketimi hesaplamalarında;

- 35 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 29,17 arttığı,
- 50 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 44,89 arttığı,
- 70 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 59,71 arttığı,
- 95 kg'lık kullanıcı durumunda tüketimin % 74,17 arttığı görülmüştür.

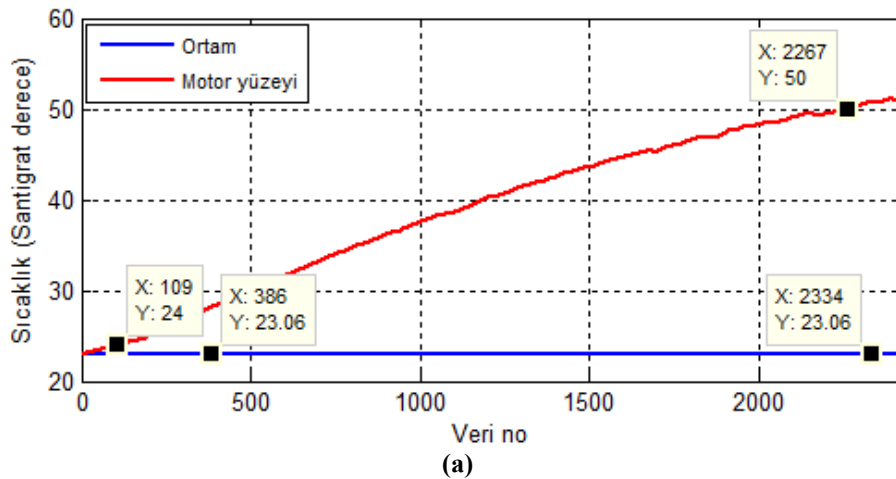
Elde edilen bu veriler tekrar değerlendirildiğinde Wh/km değerlerinde kg başına sırasıyla % 0.83, % 0.90, % 0.85 ve % 0.78'lik artış yaşandığı görülmektedir. Dolayısıyla test edilen araç için 1,44°'lik eğime sahip bir yolda kullanıcı ağırlığındaki her 1 kg'lık artış, km başına aküden çekilen enerji miktarında ortalama % 0.84'lük bir artışa neden olmaktadır. Bu değer 0,21°'lik yol eğiminde % 0,40 olduğu hatırlanacak olursa, yol eğimindeki 1,23°'lik bu artışın kg başına enerji tüketimi değerinde % 110'luk bir artışa neden olduğu görülecektir.

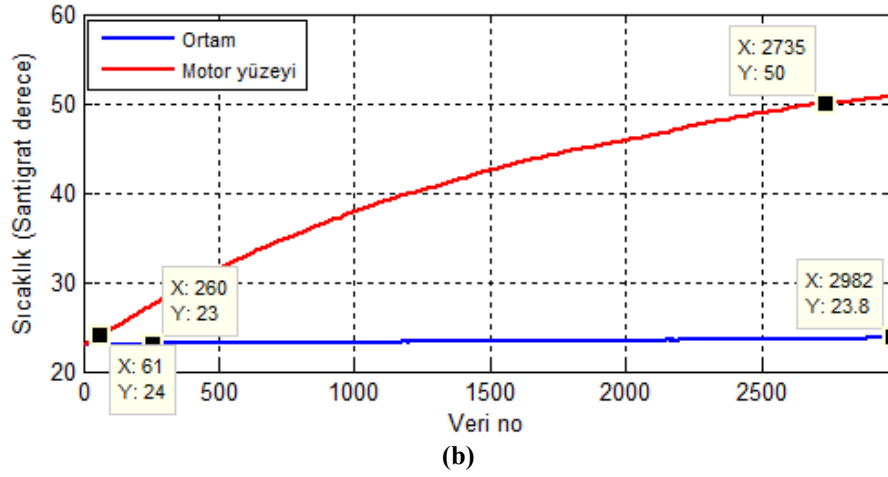
#### 5.4 Motor Yüzey Sıcaklığı Artışının İncelenmesi

Bu bölümde araç üzerindeki PMDC ve PM senkron motorun aynı çalışma ve test koşullarında yüzey sıcaklıklarındaki artış hızları incelenecektir. Bu amaçla yapılan testler laboratuvar ortamında yapılmış olup:

- Testler araç yüksüzken yapılmıştır.
- Motorlar harici olarak soğutulmamıştır.
- Testin yapıldığı ortam sıcaklığı olabildiğinde eşitlenmeye çalışılarak motorların başlangıçtaki yüzey sıcaklıklarının eşit olmasına çalışılmıştır.
- Testler, motor yüzey sıcaklıkları 51 °C'ye ulaştığında sonlandırılmıştır.
- Test başlatıldıktan sonra ilgili yüzey sıcaklığına ulaşıncaya kadar test kesintisiz olarak devam ettirilmiştir.
- Motor yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinde aynı sensörler kullanılmıştır.

PMDC motorun sıcaklık testi boyunca ortamın ve motor yüzey sıcaklığının değişimi Şekil 5.46.a'da, PM senkron motor testine ait sıcaklık değişimleri ise Şekil 5.46.b'de verilmiştir.

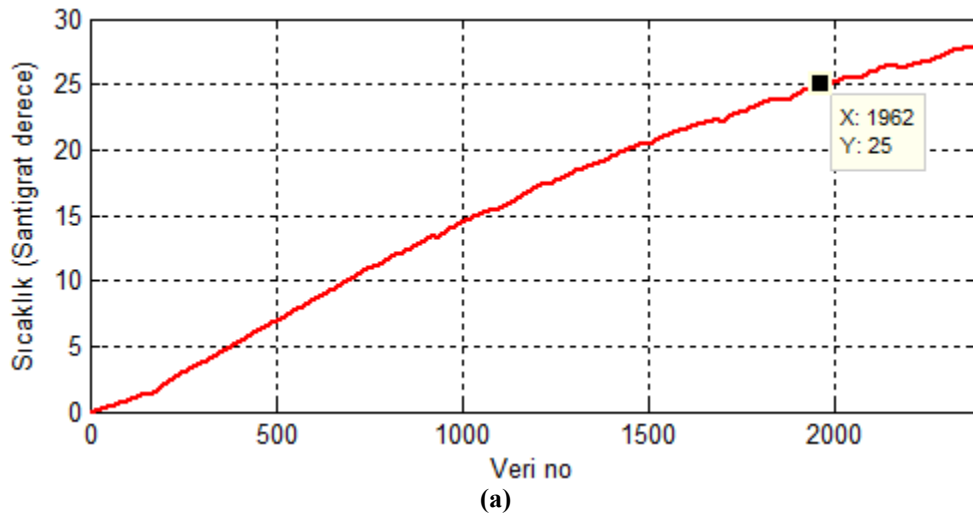


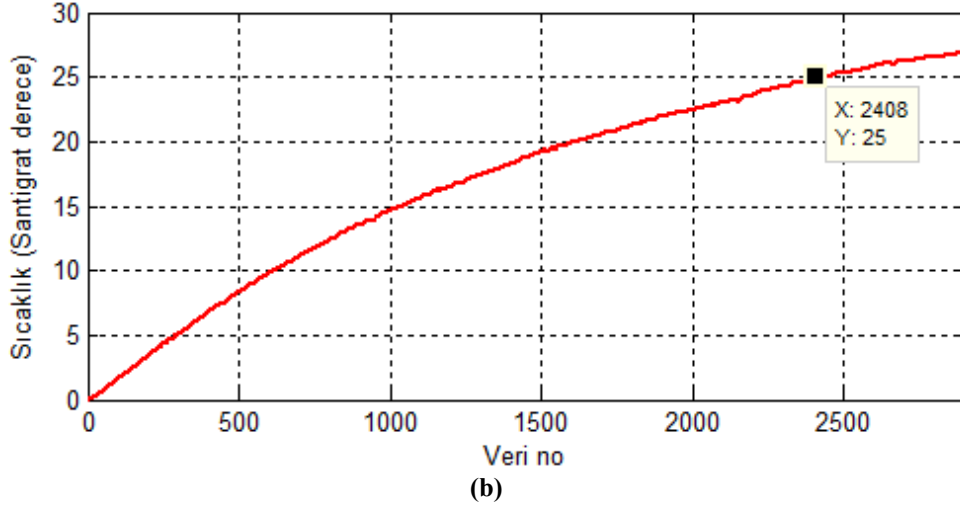


Şekil 5.46 Sıcaklık testine ilişkin grafikler

- (a) PMDC motor (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,9896 s)  
 (b) PM senkron motor (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,0202 s)

Her iki şekil incelendiğinde PMDC motorlu testte ortam sıcaklığının sabit kaldığı, ancak PM senkron motorlu testte ortam sıcaklığında test sonuna kadar 0,8 °C'lik bir artışın olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla sıcaklık artış kıyaslamasını 24 °C'den 50 °C'ye çıkma süreleri karşılaştırılarak yapılabilir. Fakat motor yüzey sıcaklıklarındaki gerçek artışı ortam sıcaklığını da dikkate alarak elde etmek, daha doğru bir kıyaslama sağlayacaktır. Bunun için yapılması gereken şey o anki motor yüzey sıcaklığından o anki ortam sıcaklığı değerini çıkartmaktır. Böylece test boyunca motor yüzeyindeki mutlak sıcaklık artışı daha net ortaya çıkacaktır. Bu yapıldığında elde edilen PMDC ve PM senkron motor yüzey sıcaklıklarındaki mutlak artış grafikleri sırasıyla Şekil 5.47.a ve 5.47.b'de verilmiştir.





**Şekil 5.47** Motor yüzey sıcaklığındaki mutlak artış  
**(a)** PMDC motor (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 0,9896 s).  
**(b)** PM senkron motor (Ardışık iki veri arasındaki zaman farkı 1,0202 s).

Denklem (5.1) kullanılarak her iki motorun yüzey sıcaklığındaki 25 °C'lik mutlak sıcaklık artışı için geçen zaman ( $\Delta t$ ) bulunabilir.

$$\Delta t = (VN_{son} - VN_{ilk}) \cdot t \quad (5.1)$$

Denklemdaki  $VN_{son}$  ilgili veri aralığının son değeri,  $VN_{ilk}$  ilgili veri aralığının ilk değeri,  $t$  ise ardışık iki veri arasında geçen zamandır. Buna göre PMDC ve PM senkron motor için bu süreler sırasıyla Denklem (5.2) ve (5.3)'teki gibi olacaktır.

$$\Delta t_{PMDC} = (1962 - 0) \cdot 0,9896 = 1941,60 \text{ s} \quad (5.2)$$

$$\Delta t_{PMSM} = (2408 - 0) \cdot 1,0202 = 2456,64 \text{ s} \quad (5.3)$$

Her iki motorun yüzey sıcaklıklarındaki 25°C'lik mutlak artış süreleri kıyaslandığında, PM senkron motorun PMDC'den 515,04 s daha geç ısındığı görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında akülü engelli araçlarının test ve analizlerinin gerçekleştirilebileceği bir sistem tasarlanmıştır. Veri okuma kartı, bilgisayar arayüzü ve mekaniksel bir test platformundan oluşan bu test sistemi sayesinde 4 tekerlekli tüm akülü engelli araçlarını ve kullanıcı davranışlarının araca yansımalarını bir bütün olarak test ve analiz etmek mümkün hale getirilmiştir.

Test sisteminin tasarımı sırasında hem mutlak hem de artımsal enkoder kullanılarak araç ve motorun hız ölçümleri yapılmıştır. Genelde açısal konum ölçümünde kullanılan analog çıkışlı mutlak enkoderlerin hız ölçümünde de kullanılabilmesi literatürdekilerden farklı bir yöntemle ortaya konulmuş ve literatüre M+ADC yöntemi olarak kazandırılmıştır. Sadece frekans yöntemi kullanılarak yapılan hız ölçümünde % 4.91 olarak gerçekleşen ortalama bağıl hata, önerilen yeni yöntem kullanıldığında % 0.08'e düşmüştür.

Tasarlanan test sistemi kullanılarak yapılacak analizlere geçmeden önce test sisteminden elde edilen verilerin doğruluğu ortaya konulmuştur. Bu doğrulama sırasında, tasarlanan sistemden elde edilen verilerle araç üzerindeki PMDC motoru üreten firmanın gerçek test verileri kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırmada motor verimindeki ortalama mutlak hatanın % 0,98 olduğu, dolayısıyla test sisteminden elde edilen verilerin kabul edilebilir bir hata payına sahip olduğu görülmüştür.

Tasarlanan test sistemi kullanılarak PMDC motorlu engelli aracının farklı yük ve yol eğimlerdeki davranışları elde edilen veriler ışığında incelenmiş ve analiz edilmiştir. Ardından Türkiye'de ilk kez bu tez çalışmasında tek motora sahip 4 tekerlekli bir akülü engelli aracının sürülmesinde üzerindeki PMDC motor yerine PM senkron motor kullanılmıştır. 12V-33Ah'lık seri bağlı ve tam şarjlı iki akü tarafından beslenen 750 W'lık PMDC ve 640 W'lık PM senkron motorlu aracın laboratuvar ortamında hem boş koltuk hem de 95 kg'lık kullanıcı ağırlığı durumlarındaki testleri yapılmıştır.

Boş koltukla yapılan testlerde PMDC motorlu aracın tükettiği ortalama enerji 21,92 Wh/km, PM senkron motorlu aracınki 15,79 Wh/km olmuştur. 95 kg'lık kullanıcı ile yapılan testlerde ise PMDC motorlu aracın ortalama enerji tüketimi 29,21 Wh/km, PM senkron motorlu aracınki 19,95 Wh/km olarak gerçekleşmiştir.



PMDC motorlu aracın laboratuvardaki boş koltuk testinde ortalama verim % 7,16 ortalama anma gücü kullanımı da % 2,25 olarak gerçekleşmiştir. Ancak 95 kg'lık bir kullanıcı durumunda ortalama verim % 26,68'e, ortalama anma gücü kullanımı da % 10,88'e yükselmiştir. Dolayısıyla aracın 95 kg'lık bir kullanıcı tarafından kullanılması, motor veriminde % 19,52 anma gücü kullanımında da % 8,63'lük bir artış sağlamıştır.

Laboratuvar testlerinin ardından araçların dış ortamdaki davranışları araştırılmıştır. Öncelikle 95 kg'lık kullanıcı tarafından kullanılan PMDC motorlu aracın dış ortamda yapılan testlerinde yol eğiminin araç hızı, aküden çekilen akım, akü uç gerilimi ve aküden çekilen güç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan testlerde *yol eğimi 0,2°'den 1,9°'ye çıktığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:*

- Aküden çekilen akım % 57,8 artmıştır.
- Akü gerilimi % 1,29 azalmıştır.
- Aküden çekilen güç % 55,8 artmıştır.
- Araç hızı % 3,69 azalmıştır.

Yol eğiminin söz konusu bu parametreler üzerindeki etkisini daha net görebilmek için yine aynı kullanıcıyla ancak daha fazla eğime sahip başka bir güzergâhta test yapılmıştır. Test yapılan güzergâhta *yol eğiminin %161,9 artarak 2,1°'den 5,5°'ye çıkması durumunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:*

- Aküden çekilen akım % 46,27 artmıştır. 0,2°'lik yol eğimindeki akü akımı baz alındığında ise eğimdeki 5,3°'lik artış akımda % 134,63'lük bir artışa yol açmıştır. Dolayısıyla yol eğimindeki her 1°'lik artış, aküden çekilen akımda ortalama % 25,40'lık bir artışa neden olmuştur.
- Akü uç gerilimi % 2,95 azalmıştır.
- Araç 5,5°'lik eğime ulaştığında bile anma gücünün % 71,01'ini kullanmıştır.
- % 44,83 olan sistem verimi % 74,40'a çıkmıştır.
- Araç hızı % 11,42 azalmıştır.

PMDC motorlu araçta sadece eğimin bu parametreler üzerindeki etkisi incelendikten sonra PM senkron motorlu araçta hem eğim hem de kullanıcı ağırlığının etkileri birlikte incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak ortalama eğimi 0,21° olan bir yolda hem yüksüz hem de 35 kg, 50 kg, 70 kg ve 95 kg'lık kullanıcı ağırlıklarıyla testler yapılmıştır.

Bu testlerde 0,21°'lik eğime sahip bir yolda kullanıcı ağırlığındaki her 1 kg'lık artışın, km başına aküden çekilen enerji miktarında ortalama % 0.40'lık bir artışa neden

olduğu görülmüştür. Daha sonra aynı test 1,44°'lik eğime sahip başka bir yolda tekrarlanmıştır. 1,44°'lik eğime sahip yolda yapılan testte de kullanıcı ağırlığındaki her 1 kg'lık artışın km başına aküden çekilen enerji miktarında ortalama % 0.84'lük bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bu değer 0,21°'lik yol eğiminde % 0,40 olduğu dikkate alındığında, yol eğimindeki 1,23°'lik artışın kg başına enerji tüketimi değerinde % 110'luk bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Aracın yavaşlaması sırasında görülen ve negatif eğimli yollarda daha belirgin olarak karşımıza çıkan rejeneratif frenlemenin aküden çekilen akım üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için PMDC motorlu araçla negatif eğimli yollarda testler yapılmıştır. Yapılan testlerde ortalama eğimin -3°'den daha küçük olması durumunda akü akımının belirgin bir şekilde negatif değer aldığı, yani akünün şarj olduğu (rejeneratif frenlemenin gerçekleştiği) görülmüştür. Yol eğiminin -2° ve daha büyük olması durumunda ise akü akımının pozitif değer aldığı, yani akünün deşarj olduğu gözlenmiştir. Ancak yol eğiminin 0° ile -2° arasında olması durumunda aküden çekilen akım değerinin aracın elektromanyetik fren sistemini devre dışı bırakacak kadar küçük olduğu ve bu değer ortalama 1,5 A ile 2,5 A arasında değiştiği görülmüştür.

PMDC ve PM senkron motorun aynı çalışma ve test koşullarında yüzey sıcaklıklarındaki artış hızları da laboratuvar ortamında incelenmiştir. Bu amaçla yapılan testlerde her iki motorun yüzey sıcaklıklarındaki 25°C'lik mutlak artış süreleri kıyaslandığında, PM senkron motorun PMDC motordan 8,5 dakika daha geç ısındığı görülmüştür.

## 6.2 Öneriler

Bilindiği gibi motorların en verimli çalıştıkları güç değeri, anma güçlerinin % 75'i civarındadır. 95 kg'lık kullanıcıyla 0°'lik yol eğiminde yapılan PMDC motorlu araç testinde % 10,88 olan bu değer 5,5°'lik yol eğiminde % 74,70'a çıkmıştır. Bu sonuçlar dikkate alındığında *akülü engelli aracına takılacak motorların güçleri belirlenirken kullanıcı ağırlığı, aracın evde veya dış ortamda kullanılması ve aracın eğimli yollarda kullanılıp kullanılmayacağı dikkate alınmalı ve gereksiz yere yüksek güçlü motorların kullanılmasından kaçınılmalıdır*. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda da görüldüğü gibi sadece uygun güçte bir motor seçilerek engelli aracının aynı şarjla daha uzun mesafe kat etmesi sağlanmış olacaktır. Bu da akülerin şarj edilme sıklığını azaltacağından akünün kullanım ömrünü artıracaktır.

Testlerde kullanılan PMDC motorlu aracın PM senkron motorlu araçla aynı yolu kat edebilmesi için % 46,42 daha fazla enerji tüketmek zorunda kalması, PMDC motorun PM senkron motordan 110 W daha güçlü olmasına bağlanabilir. Ancak motor gücündeki fazlalığın % 17,19'da kaldığı dikkate alınır, ülkemizdeki tüm tek motorlu akülü araçlarda PMDC motor yerine daha verimli olan PM senkron motor kullanmak çok daha uygun olacaktır.

Tasarlanan test sistemi kullanılarak farklı güç ve türdeki engelli araçları için bir veri deposu oluşturulabilir. Ardından bu tasarıma eklenecek bir optimizasyon algoritması sayesinde, test edilen araçta normal olmayan parametreler ve bunların kaynağı belirlenerek daha sağlıklı ve hızlı bir arıza tespitine gidilebilir ve çözüm önerisinde bulunulabilir.

Tasarlanan test sistemindeki ihmal edilebilir hataları çok daha azaltmak için motor ile redüktör arasına uygun bir aparat tasarlanarak tork sensörü bağlanabilir.

Bu test sistemi biraz daha geliştirilerek BLDC motorlu elektrikli bisikletlerin veya diğer elektrikli araçların testlerinde veya arıza tespitlerinde de kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- Akpunar, A. (2007). *Ergonomik Bir Elektrikli Tekerlekli Sandalye İçin Dişlisiz Ve Direkt Sürmeli Bir Elektrik Motor Tasarımı* Yüksek Lisans, Muğla Üniversitesi, Muğla.
- Anuchin, A., Astakhova, V., Shpak, D., Zharkov, A. ve Briz, F. "Optimized Method for Speed Estimation Using Incremental Encoder." *Presented at 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)*.
- Anuchin, A., Dianov, A., Shpak, D., Astakhova, V. ve Fedorova, K. "Speed Estimation Algorithm with Specified Bandwidth for Incremental Position Encoder." *Presented at Mechatronics-Mechatronika (ME), 2016 17th International Conference on*.
- Arai, K. ve Mardiyanto, R. (2011). "Eyes based electric wheel chair control system." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2(12).
- Asyraf, S., Heerwan, P., Izahar, I., Zulhilmi, I., Zikri, J. ve Hern, S. "Parameters estimation and calibration of BLDC motor for electric powered wheelchair." *Presented at AIP Conference Proceedings*.
- Aymen, F. ve Lassâad, S. "BFO control tuning of a PMSM high speed drive." *Presented at Electrotechnical Conference (MELECON), 2012 16th IEEE Mediterranean*.
- Azad, A., Tavakoli, R., Pratik, U., Varghese, B., Coopmans, C. ve Pantic, Z. (2018). "A Smart Autonomous WPT System for Electric Wheelchair Applications with Free-Positioning Charging Feature." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
- Bal, G. (2004). *Özel elektrik makinaları*: Seçkin Yayıncılık.
- Carella, F., Lidozzi, A., Solero, L., Di Napoli, A. ve Crescimbeni, F. "High Reliable Near-Zero Speed Control for Sinusoidal PMSM Drives with Low Resolution Position Sensors." *Presented at Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*.
- Chauhan, R., Jain, Y., Agarwal, H. ve Patil, A. "Study of implementation of Voice Controlled Wheelchair." *Presented at 3rd International Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*.
- Chen, X., Chase, J. G., Wolm, P., Anstis, I., Oldridge, J., Hanbury-Webber, W., Elliot, R. ve Pettigrew, W. (2008). "System identification and modelling of front wheel drive electric wheelchairs." *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 3076-3081.
- Condit, R. (2004). "Brushed DC Motor Fundamentals." *Microchip Technology Inc*, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00905a.pdf>.

- Cruz, R., Souza, V., Bastos Filho, T. ve Lucena, V. "Electric Powered Wheelchair Command by Information Fusion from Eye Tracking and BCI." *Presented at 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*.
- Çelik, H. ve Kürüm, H. (2013). "Sabit Miknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirme Kontrolü." *Engineering Sciences*, 8(1), 67-85.
- Deaconu, A. S., Ghița, C., Năvrăpescu, V., Chirilă, A., Deaconu, I. ve Staton, D. "Permanent magnet synchronous motor thermal analysis." *Presented at Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 6th IET International Conference on*.
- Deniz, Ö., Süzen, A. A. ve Çetin, A. "Kafa Hareketleri İle Kontrol Edilebilen Tekerlekli Sandalye." *Presented at 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi Burdur, Türkiye*.
- Derammelaere, S., Haemers, M., De Viaene, J., Verbelen, F. ve Stockman, K. "A quantitative comparison between BLDC, PMSM, Brushed DC and Stepping Motor Technologies." *Presented at 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*.
- Dey, P., Hasan, M. M., Mostofa, S. ve Rana, A. I. "Smart wheelchair integrating head gesture navigation." *Presented at 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*.
- Doruk, A., Buluş, H. N., Moralar, A., Çelen, S. ve Uzun, E. (2015). "Tracing of Velocity, Battery and Temperature Values of Electric Vehicles Using Physical Programming Platforms." *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 5(4), 48-56.
- Gajwani, P. S. ve Chhabria, S. A. (2010). "Eye motion tracking for wheelchair control." *International Journal of Information Technology*, 2(2), 185-187.
- Ghule, P., Bhalerao, M., Chile, R. ve Asutkar, V. G. "Wheelchair control using speech recognition." *Presented at 9th International Conference on Contemporary Computing (IC3)*.
- Gomes, D., Fernandes, F., Castro, E. ve Pires, G. (2019). *Head-movement interface for wheelchair driving based on inertial sensors*. EasyChair.
- Groot, S., Vegter, R. J. ve van der Woude, L. H. (2013). "Effect of wheelchair mass, tire type and tire pressure on physical strain and wheelchair propulsion technique." *Medical engineering & physics*, 35(10), 1476-1482.
- Hamilton, R. J. (2000). "DC motor brush life." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(6), 1682-1687.
- Hashimoto, N., Tomita, K., Boyali, A., Takinami, Y. ve Matsumoto, O. (2018). "Experimental study of the human factors when riding an automated wheelchair: supervision and acceptability of the automated system." *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), 236-241.

- Hisar, Ç. (2019). *Sabit mıknatıslı senkron motorlar için hız yörüngesi denetleyicisi tasarımı*, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Hondori, H. M., Trung, P. Q. ve Shih-Fu, L. "Simultaneous sensing and actuating for path condition monitoring of a power wheel chair." *Presented at Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on.*
- Hong, J., Wang, S., Sun, Y. ve Cao, H. (2018). "An effective method with copper ring for vibration reduction in permanent magnet brush DC motors." *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5.
- <http://www.akunedir.com/>. (Erişim 5.5.2019).
- <https://www.mutlu.com.tr>. (Erişim 5.5.2019).
- Ilmiawan, A. F., Wijanarko, D., Arofat, A. H., Hindersyah, H. ve Purwadi, A. "An Easy Speed Measurement for Incremental Rotary Encoder Using Multi Stage Moving Average Method." *Presented at Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), 2014 International Conference on.*
- Itoh, J.-I., Nomura, N. ve Ohsawa, H. "A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor." *Presented at Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579).*
- J Chapman, S. (2004). "Electric machinery fundamentals". City: McGraw-hill.
- Jain, M., Puri, S. ve Unishree, S. (2015). "Eyeball motion controlled wheelchair using IR sensors." *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng*, 9(4), 906-909.
- Jelonkiewicz, J. ve Linnman, S. "High efficient wheelchair drive with PM synchronous motor." *Presented at Power Electronics and Applications, 1993., Fifth European Conference on.*
- Ji, K., Lu, W. ve Yang, J. "A Method of Speed Measurement for Servo Motor Drive with Sinusoidal Quadrature Encoder." *Presented at Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE.*
- Joshi, K., Ranjan, R., Sravya, E. ve Baig, M. N. A. (2019). "Design of Voice-Controlled Smart Wheelchair for Physically Challenged Persons", *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security*. Springer, pp. 79-91.
- Ju, J., Shin, Y. ve Kim, E. (2009). "Intelligent wheelchair using head tilt and mouth shape." *IET Electronics letters*, 45(17), 873-875.
- Juming, S., Ming, Z. ve Yanmin, S. "Study of optimal efficient control of permanent magnet synchronous motor." *Presented at Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003.*

- Kaiser, M. S., Chowdhury, Z. I., Al Mamun, S., Hussain, A. ve Mahmud, M. (2016). "A neuro-fuzzy control system based on feature extraction of surface electromyogram signal for solar-powered wheelchair." *Cognitive Computation*, 8(5), 946-954.
- Karim, S., Que, B., Que, J., Reyes, L., Bandala, A., Vicerra, R., LA, E. D. ve Lim, G. "Development of an Autonomous Wheelchair: A Progress Report." *Presented at 10th DLSU Arts Congress, De La Salle University, Manila, Philippines.*
- Kazan, F. A. (2009). *Kalıcı mıknatıslı senkron motorun kontrolü*, Yüksek Lİsans, Selçuk Üniversitesi Konya.
- Kim, Y.-K., Cho, Y.-H., Park, N.-C., Kim, S.-H. ve Mok, H.-S. "In-Wheel motor drive system using 2-phase PMSM." *Presented at Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC'09. IEEE 6th International.*
- Kocabaş, D. A. (2016). "Farklı elektrik motorlarında tek bir sürücü ile geliştirilmiş algılayıcısız hız denetimi ve uygulaması" *Elektrik Mühendisliği*. City, pp. 42-45.
- Kondori, F. A., Yousefi, S., Liu, L. ve Li, H. "Head operated electric wheelchair." *Presented at Image Analysis and Interpretation (SSIAI), 2014 IEEE Southwest Symposium on.*
- Lakshmi, G. S., Kamakshaiyah, S. ve Das, T. R. "Closed loop PI control of PMSM for hybrid electric vehicle using three level diode clamped inverter for optimal efficiency." *Presented at Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on.*
- Lawn, M. J. ve Ishimatsu, T. (2003). "Modeling of a stair-climbing wheelchair mechanism with high single-step capability." *IEEE Transactions on Neural systems and rehabilitation engineering*, 11(3), 323-332.
- Lee, J.-H. "Practical implementation schemes of motor speed measurement by magnetic encoder on Electric Power Steering applications." *Presented at Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016 IEEE.*
- Lee, J. H. "Practical Implementation Schemes of Motor Speed Measurement by Magnetic Encoder on Electric Power Steering Applications." *Presented at 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).*
- Lee, K.-m., Choi, J. ve Bang, Y.-b. (2016). "Shaft Position Measurement Using Dual Absolute Encoders." *Sensors and Actuators A: Physical*, 238, 276-281.
- Li, Y., Gu, F., Harris, G., Ball, A., Bennett, N. ve Travis, K. (2005). "The Measurement of Instantaneous Angular Speed." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4), 786-805.
- Lopera, J. M., Granda, A., Linera, F. M. F., Vecino, G. ve Canga, Á. D. (2014). "Practical Speed and Elongation Measurement, Using Encoders, for a Temper Mill." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1), 113-119.

- Lopes, F. P., Oliveira, P. S., Reis, L. P. ve Araujo, R. E. "An electric wheelchair as a tool for motivating students in power electronics." *Presented at Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on.*
- Marins, G., Carvalho, D., Marcato, A. ve Junior, I. "Development of a control system for electric wheelchairs based on head movements." *Presented at Intelligent Systems Conference (IntelliSys), 2017.*
- Merry, R., Van de Molengraft, M. ve Steinbuch, M. (2010). "Velocity and Acceleration Estimation for Optical Incremental Encoders." *Mechatronics*, 20(1), 20-26.
- Modran, L. "Digital simulation of induction and permanent magnet synchronous motor starting." *Presented at 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment.*
- Moussavi, S., Alasvandi, M. ve Javadi, S. (2012). "Speed control of permanent magnet DC motor by using combination of adaptive controller and fuzzy controller." *International Journal of Computer Applications*, 52(20).
- Muni, B., Pillai, S. ve Saxena, S. "Digital simulation of internal power factor angle controlled surface mounted permanent magnet synchronous motor." *Presented at Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth.*
- Nabil, T., El-Naghi, B. E., Saeed, M., Kamal, A., Gharib, E., Mohsen, M. ve Ahmed, I. (2019). "Design and Fabrication of Prototype Battery Electric Three Wheeled Vehicles." *Journal of Asian Electric Vehicles*, 17(2).
- Nam, K. H. (2019). *AC motor control and electrical vehicle applications*: CRC press.
- Nasif, S. ve Khan, M. A. G. "Wireless head gesture controlled wheel chair for disable persons." *Presented at Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 2017 IEEE Region 10.*
- Negrea, A., Incze, I., Imecs, M., Pop, A. ve Szabo, C. "Identification of Position and Speed Using Incremental Encoder in Electric Drives." *Presented at 12 International Conference on Energetics-Electrical Engineering ENELKO 2011, Cluj-Napoca, Romania.*
- Negrea, A. C., Imecs, M., Iov Incze, I., Pop, A. ve Szabo, C. "Error Compensation Methods in Speed Identification Using Incremental Encoder." *Presented at Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition on.*
- Negrea, C. A., Incze, I. I., Imecs, M., Pop, A. V. ve Szabo, C. "An Improved Speed Identification Method Using Incremental Encoder in Electric Drives." *Presented at Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 2012 IEEE International Conference on.*



- Nguyen, Q. X. ve Jo, S. (2012). "Electric wheelchair control using head pose free eye-gaze tracker." *IET Electronics Letters*, 48(13), 750-752.
- Nguyen, V. T., Sentouh, C., Pudlo, P. ve Popieul, J.-C. "Path Following Controller for Electric Power Wheelchair Using Model Predictive Control and Transverse Feedback Linearization." *Presented at 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*.
- Nilssen, R., Skaar, S., Lund, R., Skjellnes, T., Ovrebo, S. ve Lovli, E. "Design of a permanent magnet synchronous motor integrated in the wheel rim on wheelchairs." *Presented at Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*.
- Oonishi, Y., Oh, S. ve Hori, Y. (2010). "A new control method for power-assisted wheelchair based on the surface myoelectric signal." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(9), 3191-3196.
- Ozturk, S. B., Kivanc, O. C., Atila, B., Rehman, S. U., Akin, B. ve Toliyat, H. A. "A Simple Least Squares Approach for Low Speed Performance Analysis of Indirect FOC Induction Motor Drive Using Low-Resolution Position Sensor." *Presented at 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*.
- Pavlidou, E., Kloosterman, M. G., Buurke, J. H., Rietman, J. S. ve Janssen, T. W. (2015). "Rolling resistance and propulsion efficiency of manual and power-assisted wheelchairs." *Medical engineering & physics*, 37(11), 1105-1110.
- Payne, P. ve Sanchez, E. "Comparison of Electric Wheelchair Control Systems in a Virtual Environment." *Presented at 2018 10th Computer Science and Electronic Engineering (CEECE)*.
- Petrella, R., Tursini, M., Peretti, L. ve Zigliotto, M. "Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives: A Comparative Analysis." *Presented at Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP'07. International Aegean Conference on*.
- Pillay, P. ve Krishnan, R. (1988). "Modeling of permanent magnet motor drives." *IEEE Transactions on industrial electronics*, 35(4), 537-541.
- Pillay, P. ve Krishnan, R. (1991). "Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives." *IEEE Transactions on industry applications*, 27(5), 986-996.
- Prokop, L. ve Grasblum, P. (2005). "3-Phase PM Synchronous Motor Vector Control Using a 56F80x, 56F8100, or 56F8300 Device." *Freescale Semi—conductor Application Note*.
- Putra, R. H., Rahman, A. G. W., Ningrum, E. S. ve Purnomo, D. S. "Design and stress analysis on electric standing wheelchair." *Presented at Engineering Technology and Applications (IES-ETA), 2017 International Electronics Symposium on*.

- Qiu, H., Yu, W., Li, Y. ve Yang, C. (2017). "Research on the influence of driving harmonic on electromagnetic field and temperature field of permanent magnet synchronous motor." *Archives of Electrical Engineering*, 66(2), 295-312.
- Quaglia, G., Franco, W. ve Oderio, R. "Wheelchair. q, a mechanical concept for a stair climbing wheelchair." *Presented at 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*.
- Rabhi, Y., Mrabet, M. ve Fnaiech, F. (2018). "Intelligent control wheelchair using a new visual joystick." *Journal of healthcare engineering*, 2018.
- Rojas, M., Ponce, P. ve Molina, A. (2018). "A fuzzy logic navigation controller implemented in hardware for an electric wheelchair." *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(1), 1729881418755768.
- Ruiz, J.-R. R., Garcia Espinosa, A., Romeral, L. ve Cusidó, J. (2010). "Demagnetization diagnosis in permanent magnet synchronous motors under non-stationary speed conditions." *Electric Power Systems Research*, 80(10), 1277-1285.
- Sakamoto, K., Iwaji, Y. ve Endo, T. "Position Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for Electrical Household Appliances." *Presented at Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07*.
- Sankardoss, V. ve Geethanjali, P. (2019). "Design and Low-Cost Implementation of an Electric Wheelchair Control." *IETE Journal of Research*, 1-10.
- Sato, F., Koshizen, T., Matsumoto, T., Kawase, H., Miyamoto, S. ve Torimoto, Y. "Self-driving system for electric wheelchair using smartphone to estimate travelable areas." *Presented at 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*.
- Sawa, K., Isato, M., Ueno, T., Nakano, K. ve Kondo, K. "Commutation characteristics and brush wear of DC motor at high rotation speed." *Presented at 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*.
- Sawabe, T., Okajima, T., Kanbara, M. ve Hagita, N. "Evaluating passenger characteristics for ride comfort in autonomous wheelchairs." *Presented at Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017 IEEE 20th International Conference on*.
- Sebastian, T. (1995). "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets." *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 31(2), 353-357.
- Sharma, J., Anbarasu, M., Chakraborty, C. ve Shanmugasundaram, M. "Iris movement based wheel chair control using raspberry Pi—A state of art." *Presented at Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 2017*.

- Silva, L. C. d. A., Dedini, F. G., Corrêa, F. C., Eckert, J. J. ve Becker, M. (2016). "Measurement of wheelchair contact force with a low cost bench test." *Medical engineering & physics*, 38(2), 163-170.
- Škraba, A., Stojanović, R., Zupan, A., Koložvari, A. ve Kofjač, D. (2015). "Speech-controlled cloud-based wheelchair platform for disabled persons." *Microprocessors and Microsystems*, 39(8), 819-828.
- Süzen, A. A., Deniz, Ö. ve Çetin, A. (2017). "Kafa Hareketleri İle Kontrol Edilebilen Tekerlekli Sandalye"4. *Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi*. City: Burdur, pp. 771-778.
- Takura, D. ve Akatsu, K. "Variable characteristics DC motor by changing brush lead angle to expand the operation range." *Presented at 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*.
- Tang, Z., Li, X., Dusmez, S. ve Akin, B. (2016). "A new V/f-based sensorless MTPA control for IPMSM Drives." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4400-4415.
- Tao, W., Jia, Y., Liu, T., Yi, J., Wang, H. ve Inoue, Y. (2016). "A novel wheel-track hybrid electric powered wheelchair for stairs climbing." *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10(4), JAMDSM0060-JAMDSM0060.
- Tarımer, İ., Akpunar, A. ve Gürbüz, R. (2008). "Design of a direct sliding gearless electrical motor for an ergonomic electrical wheelchair." *Elektronika IR Elektrotehnika*, 83(3), 75-80.
- Toliyat, H. A. ve Campbell, S. G. (2004). *DSP-based electromechanical motion control*: CRC press.
- Ulu, Y. ve Parlak, F. (2018). "A DSP-Controlled High Accuracy Speed Measurement Techniques for Motion Control in PMSM Drivers." *Engineering Sciences*, 13(1), 13-20.
- Üstün, O. (2004). *Sürekli mıknatıslı bir senkron motor hızının bulanık sinirsel ve kayma kipli denetleyicilerle dönüşümlü denetimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Waheed, A. ve Cai, L. "Alternative Design for Optical Incremental Encoder Measurement Systems." *Presented at 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*.
- Wang, D. ve Yu, H. "Development of the control system of a voice-operated wheelchair with multi-posture characteristics." *Presented at Intelligent Robot Systems (ACIRS), 2017 2nd Asia-Pacific Conference on*.
- Wang, H., Grindle, G. G., Connor, S. ve Cooper, R. A. "An experimental method for measuring the moment of inertia of an electric power wheelchair." *Presented at*

*Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE.*

- Wang, H., Salatin, B., Grindle, G. G., Ding, D. ve Cooper, R. A. (2009). "Real-time model based electrical powered wheelchair control." *Medical engineering & physics*, 31(10), 1244-1254.
- Wang, T., Kaneko, J. i. ve Kojima, K. "Study on relevance between electric wheelchair riding comfort and user exposure to whole-body vibration." *Presented at Consumer Electronics (GCCE), 2017 IEEE 6th Global Conference on.*
- Wang, Y., Wang, L. ve Yan, Y. (2017b). "Rotational Speed Measurement through Digital Imaging and Image Processing."
- Wu, B.-F., Chang, P.-J., Chen, Y.-S. ve Huang, C.-W. (2018a). "An Intelligent Wheelchair Anti-Lock Braking System Design With Friction Coefficient Estimation." *IEEE Access*, 6, 73686-73701.
- Wu, B.-F., Chen, Y.-S., Huang, C.-W. ve Chang, P.-J. (2018b). "An Uphill Safety Controller With Deep Learning-Based Ramp Detection for Intelligent Wheelchairs." *IEEE Access*, 6, 28356-28371.
- Xia, C.-l. (2012). *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*: John Wiley & Sons.
- Xia, C., Ji, B., Shi, T. ve Yan, Y. (2016). "Two-Degree-of-Freedom Proportional Integral Speed Control of Electrical Drives with Kalman-Filter-Based Speed Estimation." *IET Electric Power Applications*, 10(1), 18-24.
- Yan, Y., Zhang, X., Xia, C., Ji, B. ve Wang, Z. "Speed measurement algorithm for low speed permanent magnet synchronous motor based on overlapped measurement regions." *Presented at Industrial Electronics (ISIE), 2016 IEEE 25th International Symposium on.*
- Yokota, S., Hashimoto, H., Ohyama, Y., She, J.-H., Chugo, D., Kobayashi, H. ve Blazevic, P. "Study on human body motion interface." *Presented at ICCAS-SICE, 2009.*
- Yu, S., Wang, T., Li, X., Yao, C., Wang, Z. ve Zhi, D. "Configuration and tip-over stability analysis for stair-climbing of a new-style wheelchair robot." *Presented at 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.*
- Zambada, J. ve Deb, D. (2010). "Sensorless Field Oriented Control of a PMSM." *Microchip.*
- Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H. ve Diallo, D. (2006). "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study." *IEEE Transactions on Vehicular technology*, 55(6), 1756-1764.

- Zhang, X., Li, W., Cheng, S., Cao, J. ve Zhu, C. "Thermal analysis of solid rotor in PMSM used for EV." *Presented at Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09. IEEE.*
- Zhi-Fu, W., Qi-zhi, T., Cheng-ning, Z. ve Jin-rui, N. "Real-time PMSM Temperature Rising in Electric Vehicles with MRAS." *Presented at Intelligent Systems, 2009. GCIS'09. WRI Global Congress on.*
- Zhu, X.-d. ve Yu, S.-n. "Measurement Angular Velocity Based on Video Technology." *Presented at Image and Signal Processing (CISP), 2011 4th International Congress on.*
- Zhu, Z.-Q. ve Howe, D. (2007). "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles." *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 746-765.



## EKLER

## EK-1 Araç Üzerindeki PMDC Motora Ait Üretici Firma Test Verileri

Motor S/N: SC103-750W Pole: 2 Speed: 3790 RPM Volt: 24 V Rate Torq.: 2.167  
 Motor Type: IP/Motor Freq.: DC Hz Output: 750 W Curr.: 150A A Torq. Unit N.m.

Page No.1 C:\Pw\motor.sys\TABLE\SC103-420W\03B281347.DBF 2016/11/28 下午 01:58:36

Item	Volt	Current	Input (Wi)	Torque	RPM	Output(Wo)	PF (%)	EFF %	Note
1	24.15	5.370	128.90	-0.161	3788.0	-63.72	99.47	49.43	
2	24.15	5.910	142.20	-0.140	3780.0	-55.25	99.57	38.85	
3	24.15	6.590	158.60	-0.106	3769.0	-41.91	99.64	26.42	
4	24.15	7.240	174.30	-0.077	3760.0	-30.29	99.68	17.38	
5	24.14	7.850	189.10	-0.049	3749.0	-19.32	99.72	10.22	
6	24.14	8.420	202.70	-0.030	3740.0	-11.89	99.74	5.87	
7	24.13	9.050	217.80	0.002	3728.0	0.74	99.77	0.34	
8	24.13	9.610	231.50	0.042	3722.0	16.37	99.80	7.07	
9	24.13	10.290	247.80	0.059	3707.0	22.81	99.83	9.21	
10	24.13	10.850	261.30	0.108	3701.0	41.97	99.83	16.06	
11	24.13	11.580	278.90	0.133	3690.0	51.46	99.86	18.46	
12	24.12	12.180	293.60	0.151	3679.0	58.06	99.87	19.78	
13	24.12	12.770	307.70	0.185	3670.0	71.28	99.88	23.17	
14	24.12	13.420	323.30	0.221	3660.0	84.75	99.88	26.21	
15	24.11	14.150	340.70	0.272	3646.0	103.93	99.89	30.50	
16	24.11	14.730	354.80	0.339	3639.0	129.13	99.90	36.40	
17	24.11	15.480	373.00	0.378	3630.0	143.77	99.91	38.54	
18	24.11	16.110	387.90	0.445	3622.0	168.74	99.90	43.50	
19	24.11	16.760	403.60	0.476	3607.0	179.90	99.92	44.57	
20	24.11	17.360	418.10	0.559	3601.0	210.64	99.92	50.38	
21	24.11	18.030	434.20	0.649	3592.0	244.30	99.92	56.26	
22	24.10	18.670	449.60	0.714	3581.0	267.96	99.92	59.60	
23	24.10	19.380	466.70	0.809	3570.0	302.56	99.92	64.83	
24	24.10	20.100	484.10	0.878	3558.0	327.30	99.93	67.61	
25	24.10	20.780	500.30	0.906	3550.0	336.79	99.93	67.32	
26	24.09	21.440	516.10	1.035	3541.0	383.91	99.94	74.39	
27	24.09	22.180	534.10	1.082	3531.0	400.22	99.94	74.93	
28	24.09	22.830	549.50	1.230	3519.0	453.41	99.94	82.51	
29	24.08	23.530	566.30	1.221	3509.0	448.75	99.94	79.24	
30	24.08	24.150	581.40	1.268	3501.0	465.04	99.94	79.99	
31	24.08	24.860	598.30	1.333	3489.0	486.98	99.94	81.39	
32	24.08	25.500	613.50	1.397	3482.0	509.42	99.95	83.04	
33	24.08	26.210	630.70	1.500	3469.0	544.79	99.94	86.38	
34	24.07	26.790	644.60	1.553	3459.0	562.42	99.95	87.25	
35	24.07	27.520	662.00	1.541	3450.0	556.96	99.95	84.13	
36	24.07	28.240	679.30	1.649	3442.0	594.48	99.94	87.51	
37	24.06	28.880	694.70	1.666	3431.0	598.54	99.95	86.17	
38	24.06	29.560	710.90	1.671	3419.0	598.39	99.95	84.17	
39	24.06	30.310	729.00	1.722	3409.0	614.92	99.95	84.35	
40	24.06	30.960	744.40	1.776	3400.0	632.57	99.95	84.98	
41	24.05	31.690	761.90	1.821	3393.0	647.00	99.95	84.92	
42	24.05	32.330	777.30	1.883	3379.0	666.42	99.95	85.74	
43	24.05	33.080	795.10	1.935	3370.0	683.09	99.96	85.91	
44	24.05	33.760	811.50	1.962	3359.0	690.37	99.96	85.07	
45	24.04	34.370	826.10	2.005	3350.0	703.56	99.96	85.17	
46	24.04	35.070	842.80	2.042	3338.0	713.71	99.96	84.68	
47	24.04	35.760	859.20	2.067	3332.0	721.12	99.96	83.93	
48	24.03	36.490	876.60	2.093	3318.0	727.36	99.96	82.98	
49	24.03	37.270	895.40	2.132	3309.0	738.69	99.96	82.50	
50	24.03	37.880	909.80	2.167	3299.0	748.81	99.96	82.30	

Page No.2

C:\Pw motor.sys\R\_TABLE\SC103-420W0B281347.DBF

2016/11/28 下午 01:58:36

Item	Volt	Current	Input (Wi)	Torque	RPM	Output(Wo)	PF (%)	EFF %	Note
Item	Volt	Current	Input (Wi)	Torque	RPM	Output(Wo)	PF (%)	EFF %	
No load	24.1	9.050	217.80	0.002	3728.00	0.74	99.77	0.34	
Max EFF%	24.1	28.240	679.30	1.649	3442.00	594.48	99.94	87.51	
MaxOutput	24.0	37.880	909.80	2.167	3299.00	748.81	99.96	82.30	
Max Torq.	24.0	37.880	909.80	2.167	3299.00	748.81	99.96	82.30	
Rise Torq	24.1	27.520	662.00	1.541	3450.00	556.96	99.95	84.13	
Rate Load	24.0	37.880	909.80	2.167	3299.00	748.81	99.96	82.30	
Start up	24.0	37.880	909.80	2.167	3299.00	748.81	99.96	82.30	

806061



**EK-2 Akülü Engelli Aracına Takılan PM Senkron Motorun Katalog Bilgisi.**

Üretici firma	Lenze
Kutup sayısı	8
Sargı bağlantı türü	Yıldız
Anma devri (d/dk)	4050
Maksimum hız (d/dk)	8000
Anma torku (N·m)	1,5
Maksimum tork (N·m)	6,20
Anma gücü (kW)	0,64
Anma akımı (A)	2,90
Maksimum akım (A)	11,8
Anma gerilimi (V)	175
Anma frekansı (Hz)	270
Verim (%)	81
Atalet momenti (kg.m <sup>2</sup> . 10 <sup>-4</sup> )	0,30
20°C için fazlar arası sargı direnci (Ω)	4,70
150°C için fazlar arası sargı direnci (Ω)	6,20
Sargı endüktansı (mH)	51



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Fatih Alpaslan Kazan  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Amasya 12.12.1977  
**Telefon** : (0332) 223 23 78  
**Faks** : (0332) 241 01 85  
**E-Posta** : fakazan@ktun.edu.tr

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Amasya Teknik Lisesi, Merkez, Amasya	1994
Üniversite	: Gazi Üniversitesi, Beşevler, Ankara	2002
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2009
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	Devam ediyor

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2002 - 2018	Selçuk Üniversitesi	Öğretim Elemanı
2018 -	Konya Teknik Üniversitesi	Öğretim Elemanı

### YABANCI DİL

İngilizce – 78,75 (ÜDS, Aralık 2010)

### YAYINLAR

#### *A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan/yayımlanacak makaleler*

1. R. Akkaya and F. A. Kazan, "A New Method for Angular Speed Measurement with Absolute Encoder," *Elektronika ir Elektrotehnika (SCI-E) (Doktora tezinden yapılmış olup basımı kabul edilmiştir).*
2. R. Akkaya and F. A. Kazan, "Design and Implementation of a Test Setup for Electric Mobility Scooter for the Disable," *Measurement and Control, 2019 (SCI-E) (Doktora tezinden yapılmıştır).*
3. F. A. Kazan, C. Sungur, and H. Terzioğlu, "The Extension of Battery Lives Used in Solar Irrigation System With Regards to Charge-Discharge Numbers," *Applied Mechanics and Materials, vol. 752-753, pp. 988-994, 2015.*
4. H. Terzioğlu, F. A. Kazan, and M. Selek, "The Use of dsPIC in the Identification of Inertia Moment and Friction Coefficient of PMS and DC Motors," *Applied Mechanics and Materials, vol. 446-447, pp. 1197-1201, 2014.*

**B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:**

1. F. A. Kazan and R. Akkaya, "Use of PMSM in Electric Mobility Scooter Propulsion," in International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19), Konya, Turkey, 2019 (Doktora tezinden yapılmıştır).
2. O. Bilgin and F. A. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," in Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on, Lausanne - Switzerland, 2016, pp. 2080-2085.
3. F. A. Kazan, H. Terzioglu, and A. C. Agacayak, "The Design of a Test & Development Board for the Training of PIC18F4550 Microcontroller," in Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 2015, pp. 951-955.
4. H. Terzioglu, F. A. Kazan, and M. Arslan, "A New Approach to the Installation of Solar Panels," in Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 2015, pp. 573-577.
5. M. Selek, H. Terzioglu, and F. A. Kazan, "The Design of Training Elevators for Effective Learning," in Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 2015, pp. 956-959.
6. H. Terzioglu, F. A. Kazan, and M. Selek, "The Designing of an Educational Solar Panel That Can Be Controlled in Different Ways," in Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 2015, pp. 960-964.
7. H. Terzioglu, F. A. Kazan, and C. Sungur, "The Irrigation System Fed from Biaxial PV Panels," in Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on, Shanghai, China, 2015, pp. 981-987.
8. T. Alagöz, A. Ürkmez, F. A. Kazan, and C. Sungur, "Designing and Realization of Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles" in 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), Istanbul, Turkey, 2013, pp. 750-755.

**C. Yazılan ulusal/uluslararası kitaplar veya kitaplardaki bölümler:**

**C1. Yazılan ulusal/uluslararası kitaplar:**

1. F. A. Kazan, A. C. Ağaçayak, C. Arslan, and M. Selek, MikroC İle PIC18F4550 Uygulamaları, 1th ed. Konya: Mesleki Akademi, 2014.
2. H. Terzioglu, F. A. Kazan, and M. Arslan, Asenkron Ve Senkron Makinalar 1ed. Konya: Mesleki Akademi, 2014.
3. H. Terzioglu, A. C. Ağaçayak, M. Arslan, and F. A. Kazan, Elektrik-Elektronik Ölçme Tekniği Ve Uygulamaları, 1th ed. Konya: Mesleki Akademi, 2014.

***D. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:***

1. F. A. Kazan and O. Bilgin, "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Simülasyonu," Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Türkiye, 2008, pp. 223-227 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

