

**SEGWAY İÇİN YÜK HÜCRESİ İLE ADAPTİF KONTROL
ALGORİTMASININ UYGULAMASI VE SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Mustafa KELEK

Danışman
Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Uğur FİDAN

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2020

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.16 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SEGWAY İÇİN YÜK HÜCRESİ İLE ADAPTİF KONTROL
ALGORİTMASININ UYGULANMASI VE SİMÜLASYONU**

Muhammed Mustafa KELEK

**Danışman
Prof. Dr. Yüksel OĞUZ**

**İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Uğur FİDAN**

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2020

TEZ ONAY SAYFASI

Muhammed Mustafa KELEK tarafından hazırlanan "Segway için Yük Hücresi ile Adaptif Kontrol Algoritmasının Uygulaması ve Simülasyonu" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 15 / 06 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dah'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman : Dr. Ögr. Üy. Uğur FİDAN

Başkan : Doç. Dr. Selim KÖROĞLU
Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Uğur FİDAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. İsmail KOYUNCU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Tahir Çetin AKINCI
İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... / / tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

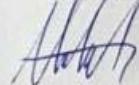
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sundugumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğim,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

15/06/2020



Muhammed Mustafa KELEK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SEGWAY İÇİN YÜK HÜCRESİ İLE ADAPTİF KONTROL ALGORİTMASININ UYGULANMASI VE SİMÜLASYONU

Muhammed Mustafa KELEK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur FİDAN

Bu çalışmada yük hücresi temelli Segway'in matematiksel modellenmesi, simülasyonu ve uygulaması yapılmıştır. Segway üzerine yerleştirilen dört adet yük hücresi, sistemin kontrolünü sağlamaktadır. Yük hücresinden gelen kütle bilgilerine ait analog sinyaller 24 bit çözümürlüklü HX711 tümleşik entegre ile sayısal dönüştürülmüştür. Sayısal dönüştürülen veriler senkron seri haberleşme protokolü üzerinden mikro denetleyici ile çözümlenerek ölçülmüştür. Ölçülen kütle bilgisine göre sistemin dinamik modeli anlık olarak güncellenebilmektedir. Bu işlem maksimum yunuslama açısını değiştirerek Segway kontrolünün kolaylaşmasını sağlamakta ve kullanıcının araç üzerinden düşmesini engellemektedir. Sistemin simülasyonun yapılabilmesi için gerekli olan Fırçasız Doğru Akım Motor (FDAM) parametreleri ise Maxwell program paketi ile çıkartılmıştır. Bu parametreler kullanılarak yük hücresi temelli Segway'in simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin gerçek zamanlı uygulaması ARM mimariye sahip STM32103C8T6 mikro denetleyicisi ile çalışılarak yapılmıştır. Aracın gerçek zamanlı uygulaması sırasında FDAM akımları ve motor dönüş hız bilgileri eş zamanlı olarak SD kart üzerine kaydedilmektedir. Gerçek zamanlı uygulamadan alınan veriler işlenerek yapılan simülasyon ile karşılaştırılması yapılmıştır. Simülasyon sonucunda belirlenen faz akımları uygulama sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca yük hücrelerinin tekrarlama testi yapılmış olup sol ön yük hücresinde 0,99, sağ ön yük hücresinde 0,99, sol arka yük hücresinde 0,99 ve sağ arka yük hücresinde 0,99 korelasyon bulunmuştur. Yapılan

çalışma sonucunda sistemin gerçek uygulaması ile simülasyonunun uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan sistemin daha kararlı halde çalışabilmesi için çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Bu önerilerin ilerleyen çalışmalaraya katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2020, xii + 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Segway, Elektrikli Araç, Yük Hücresi, Adaptif Kontrol Algoritma, Simülasyon

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

APPLICATION AND SIMULATION OF ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM WITH LOAD CELL FOR SEGWAY

Muhammed Mustafa KELEK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical – Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Yüksel OĞUZ

Co-Supervisor: Asst. Prof. Uğur FİDAN

In this study, mathematical modeling, simulation and application of load cell-based Segway has been done. Four load cells placed on the segway control the system. Analogue signals of mass information from the load cell are converted to digital with 24-bit resolution HX711 integrated. The digitally converted data were measured by resolving with microcontroller over synchronous serial communication protocol. According to the measured mass information, the dynamic model of the system can be updated instantly. This process makes the Segway control easier by changing the maximum pitch angle and prevents the user from falling over the vehicle. The Brushless Direct Current Motor (BLDC) parameters required to simulate the system were extracted with the Maxwell Software Program. Using these parameters, simulation of Segway which is load cell-based was carried out. Real-time application of the system was done by working with the STM32103C8T6 microcontroller with ARM architecture. During real time application of the vehicle, BLDC currents and motor rotation speed information are simultaneously recorded on the SD card. The data obtained from the real-time application are processed and compared with the simulation. BLDC currents determined as a result of simulation were compared with the application results. Also, repetition test of the load cells was performed and correlation was found in the left front load cell 0.99, in the right front load cell 0.99, in the left back load cell 0.99 and in the right back load cell 0.99. According to the result of the study, it has been observed that the real time application of the system is compatible with its simulation. In addition, various suggestions have been made to make

the system work more stable. We believe that in future studies, this study will be great contribution to other researchers.

2020, xii + 75 pages

Keywords: Segway, Electric Vehicle, Load Cell, Adaptive Control Algorithm, Simulation.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen öncelikle aileme, çalışma arkadaşlarına ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Yüksel Oğuz ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Uğur FİDAN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarına, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalara ve 19.FEN.BİL.16 numaralı BAPK proje numarasıyla destek sağlayan üniversiteme teşekkür ederim.

Muhammed Mustafa KELEK

Afyonkarahisar 2020

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Segway.....	3
2.2 Ters Sarkaç Sistemi	4
2.3 Literatür Taraması.....	5
2.3.1 Ulusal Çalışmalar	6
2.3.2 Uluslararası Çalışmalar	8
3. MATERİYAL ve METOT	12
3.1 Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM)	12
3.1.1 Dış Rotorlu FDAM	13
3.1.2 İç Rotorlu FDAM	14
3.1.3 Disk Tipi Rotorlu FDAM.....	15
3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Matematiksel Modellenmesi	15
3.3 Segway'in Matematiksel Modeli	20
3.3.1 Segway FDAM'lara Etki Eden Kuvvetler	20
3.3.1.1 Yuvarlanma Direnci	20
3.3.1.2 Yokuş Direnci.....	21
3.3.2 Sistem Olarak Segway'in Modellenmesi	22
3.4 Yük Hücre Temelli Segway Sistemi.....	28
3.5. Tasarlanan Sisteme Ait Temel Donanımlar.....	30
3.5.1 Mikrodenetleyici	30
3.5.2 Yük Hücresi	31
3.5.3 HX711 ADC Dönüştürücü.....	32

3.5.4 ACS712 Akım Sensörü	33
3.5.5 SD Kart Modülü.....	33
3.5.5 Çoklu Sensör Kartı.....	34
3.5.6 Segway Motorları.....	35
3.5.6 FDAM Sürücülerı	36
3.5.7 Batarya	37
4. BULGULAR	38
4.1 Motor Parametrelerin Çıkarılması	38
4.2. FDAM Simülasyonu	41
4.3. Yük Hücresi Temelli Segway Sisteminin Simülasyonu.....	45
4.4. Gerçekleştirilen Sistem	50
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	57
6. KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	64
EKLER	66

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

F	Uygulanan kuvvet
M	Aracın külesi
m	Ters Sarkaca bağlı cismin külesi
a	İvme
L	Sarkaç çubuğuun uzunluğu
θ	Sarkacın dikey ile yaptığı açı
V	Voltaj
A	Akım
V_{as}	A fazının voltaj değeri
V_{bs}	B fazının voltaj değeri
V_{cs}	C fazının voltaj değeri
e_a	A fazının zıt EMK voltaj değeri
e_b	B fazının zıt EMK voltaj değeri
e_c	C fazının zıt EMK voltaj değeri
I_{as}	A fazının akım değeri
I_{bs}	B fazının akım değeri
I_{cs}	C fazının akım değeri
R_a	A fazının faz direnci
R_b	B fazının faz direnci
R_c	C fazının faz direnci
L_a	A fazının faz endüktansı
L_b	B fazının faz endüktansı
L_c	C fazının faz endüktansı
R	Ortak faz direnci
M	Ortak faz endüktansı
K_e	Zıt EMK sabiti
θ_e	Elektriksel motor açısı
w_m	Mekaniksel açısal hız
$f(\theta_e)$	Kare EMK üretici fonksiyonu
T_a	A fazında üretilen tork
T_b	B fazında üretilen tork
T_c	C fazında üretilen tork
T_e	Bütün fazlarda üretilen toplam üretilen tork
K_t	Tork sabiti
T_m	Mekaniksel tork
$T_{yük}$	Yük torku
J	Atalet momenti
β	Sürtünme katsayısı
F_r	Yuvarlanma direnci
f_r	Yuvarlanma direnci katsayısı
G	Sistemin yere uyguladığı kuvvet
F_{ST}	Yokuş direnci
α	Yokuş açısı

Simgeler (Devam)

F_{sol}	Sol motorun üretmesi gereken kuvvet
$F_{sağ}$	Sağ motorun üretmesi gereken kuvvet
M_{sol}	Kullanıcı kütlesinin sol tarafa uyguladığı kütle
$M_{sağ}$	Kullanıcı kütlesinin sağ tarafa uyguladığı kütle
T	Tork
r	Tekerlek yarıçapı
Ψ_{max}	Maksimum yunuslama açısı
Ψ	Yunuslama açısı
W	Watt
L	Segway ile kullanıcısının ağırlık merkezi arasındaki mesafe
$L_{araç}$	Segway yatay uzunluğu
X	Segway'ın belirli bir yunuslama açısıyla eğilim yaptığında Z ekseninde oluşturduğu mesafe
$r_{dönme}$	Segway'ın dönüş için referans aldığı merkez noktaya uzaklık
d	$r_{dönme}$ ile x arasındaki açı
YH_1	Birinci yük hücresi
YH_2	İkinci yük hücresi
YH_3	Üçüncü yük hücresi
YH_4	Dördüncü yük hücresi
$YH_{öt}$	Ön taraftaki yük hücreleri toplamı
YH_{at}	Arka taraftaki yük hücreleri toplamı
YH_t	Bütün yük hücrelerin toplamı
k	Yunuslama açısının hesabında kullanılan katsayı

Kısaltmalar

ADC	Analog Digital Converter
BM	Bulanık Mantık
DA	Doğru Akım
DMA	Direct Memory Access
EMK	Elektro Manyetik Kuvvet
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motorları
IMU	Inertial Measurement Unit (Çoklu Sensör Kartı)
I-PENTAR	Inverted PENDulum Type Assistant Robot
km/sa	Kilometre / Saat
KA	Kutup Atama
KY	Kutup Yerleştirme
LQR	Linear Quadratic Regulator
mAh	Mili Amper Saat
MPC	Model Öngörülü Kontrol
PID	Oransal-İntegral-Türevsel
PWM	Sinyal Genlik Modülasyonu
RPM	Revolutions Per Minute
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
YSA	Yapay Sinir Ağları
Wh	Watt Saat

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Farklı kullanım amaçları için tasarlanmış Segway çeşitleri.....	3
Şekil 2.2 Mobil robot olarak kullanılan denge robotları.....	4
Şekil 2.3 Ters sarkaç sistemi.....	5
Şekil 2.4 Havada ve karada hareket edebilen iki tekerlekli denge robotu.....	6
Şekil 2.5 Nesne takibi yapabilen iki tekerlekli denge robotu tasarımı.....	7
Şekil 2.6 3 boyutlu denge robotunun tasarımı.....	7
Şekil 2.7 I-PENTAR.....	8
Şekil 2.8 BM kontrollü iki tekerlekli denge robotu.....	10
Şekil 3.1 Dış rotorlu FDAM modeli.....	14
Şekil 3.2 İç rotorlu FDAM modeli.....	14
Şekil 3.3 Disk tipi rotorlu FDAM modeli.....	15
Şekil 3.4 FDAM'ın eş değer devresi.....	15
Şekil 3.5 Yokuş direncinin detaylı geometrik gösterimi.....	22
Şekil 3.6 Segway için talep edilen kuvvetler ve motorların oluşturduğu kuvvetler.....	23
Şekil 3.7 Maksimum yunuslama açısının çıkarılması.....	24
Şekil 3.8 Segway'in direksiyon açısına göre sağ ve sol motor hızları.....	27
Şekil 3.9 Segway'in blok diyagramı.....	28
Şekil 3.10 Sistemin akış diyagramı.....	29
Şekil 3.11 STM32103C8T6 model mikro denetleyicinin pin özellikleri.....	30
Şekil 3.12 Kullanılan yük hücresinin devre şeması.....	31
Şekil 3.13 HX711 modülü devre şeması.....	32
Şekil 3.14 ACS712-30A akım sensörü devre şeması.....	33
Şekil 3.15 SD kart modülü devre şeması.....	34
Şekil 3.16 MPU6050 Çoklu sensör kartının devre şeması.....	34
Şekil 3.17 Tekerlek içeresine gömülü FDAM.....	36
Şekil 3.18 Wiwi K – D 1.5 kart numaralı FDAM sürücüsü.....	36
Şekil 3.19 Segway için kullanılan batarya.....	37
Şekil 4.1 Maxwell programında tasarlanan FDAM'ın tasarımı.....	38
Şekil 4.2 FDAM'ın kapalı sargı üzerinden faz sıralamasının gösterimi.....	39
Şekil 4.3 FDAM'ın açık sargı üzerinden faz sıralamasının gösterimi.....	40

Şekil 4.4 FDAM genel blok görüntüsü ve parametre giriş penceresi.	41
Şekil 4.5 Akım, tork ve zıt EMK denklemlerinin olduğu blok görüntüsü.	42
Şekil 4.6 Akım denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü.....	42
Şekil 4.7 Tork denklemleri blokunun detaylı görüntüsü.....	43
Şekil 4.8 Zıt EMK denklemleri blokunun detaylı görüntüsü.	43
Şekil 4.9 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın faz akımları grafiği.....	44
Şekil 4.10 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın mekaniksel hız grafiği.....	44
Şekil 4.11 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın zıt EMK gerilim grafiği.....	44
Şekil 4.12 Yük hücrelerinin Segway üzerindeki yerleşimleri.....	45
Şekil 4.13 Segway üzerindeki kullanıcı kütlesi ve yük hücrelerine kütlelerin dağılımı.	46
Şekil 4.14 Kütlesinin %60'ı öndeği yük hücrelerine olan 100 kg'luk kullanıcı verisi. ..	46
Şekil 4.15 Kütlesinin %60'ı sağdaki yük hücrelerine olan 100 kg'luk kullanıcı verisi..	47
Şekil 4.16 Kütlesinin %60'ını öne ve %60'ını sağa veren kişinin kütlesinin yük hücrelerine olan dağılımı.	47
Şekil 4.17 Kütlesinin %60'ını öne ve yokuş açısı 0 derece iken üretilen kuvvet ve torklar.....	48
Şekil 4.18 Kütlesinin %60'ını öne ve yokuş açısı 5 derece iken üretilen kuvvet ve torklar.....	48
Şekil 4.19 Kullanıcı kütlesine göre değişim gösteren maksimum yunuslama açısı.....	49
Şekil 4.20 Segway simülasyon ekranının genel görüntüsü.	50
Şekil 4.21 Tasarlanan Segway sisteminin kontrol kartı.	51
Şekil 4.22 Gerçekleştirilen Sistem.	52
Şekil 4.23 FDAM akım bilgisi.	55

ÇİZELGEler DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 STM32F103C8'in teknik özelliklerı.....	31
Çizelge 3.2 Kullanılan yük hücresinin teknik bilgileri.....	32
Çizelge 3.3 MPU6050 Çoklu sensör kartının pin özellikleri	35
Çizelge 4.1 Maxwell programında kullanılacak olan parametreler.	39
Çizelge 4.2 Maxwell programından elde edilen FDAM simülasyonu için gerekli olan parametreler.	40
Çizelge 4.3 Kontrol kartı üzerindeki modüllerin/soketlerin tanıtımı.	51
Çizelge 4.4 10 saniye aralıklarla ölçülen yük hücresi ölçüm değerleri.....	53
Çizelge 4.5 Farklı kütleler referans alınarak ölçülen yük hücresi ölçüm değerleri.....	54
Çizelge 4.6 100 kg kütleyeli bir kullanıcı tarafından çeşitli yüzdelerde kütlesini ön tarafa verdiğinde 115 RPM de çalışan FDAM'ların hızlarındaki değişimler.....	55
Çizelge 4.7 100 kg kütleyeli kullanıcının %60 kütlesini ön tarafa verirken sağ ve sol yük hücrelerine uyguladığı baskiya göre sağ ve sol motorların dönüş hızları. ..	56

1. GİRİŞ

Ulaşım, bir nesne veya kişinin bir yerden başka bir yere nakledilmesi olarak adlandırılmaktadır. Ulaşım için karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayollarından yararlanılmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2019 Aralık ayında yayınlanan rapora göre Türkiye'de toplam 23 156 975 adet motorlu taşıt bulunmaktadır (TÜİK 2019). Ulaşım araçlarının artmasıyla birlikte insanların ulaşım konusunda ki rahatsızlıklar da artmaya başlamıştır. Bu rahatsızlıklara trafik yoğunluğu, trafik sıkışıklığı, trafik kazaları, park problemi, gürültü kirliliği, sera gazı emisyonu vb. hususlar örnek olarak verilebilir. Gürültü ve gaz kirliliği problemlerin temel kaynağı, kullanılan araçların büyük bir çoğunluğunun petrol ürünleriyle çalışmasıdır. Bu sebepten ötürü motorlu taşıtların egzozlarından çıkan sera gazları havayı kirletmektedir. Sera gazının çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için bilim insanları temiz enerji kullanımı üzerine yapılan çalışmalara yönelmiştir. Mevcut çalışmalar hem eldeki mevcut enerjiyi daha verimli kullanmak hem de hava kirliliğini azaltmak için temiz enerji kullanımını üzerine odaklanmaktadır.

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de elektrikli araçlara olan ilgi gün geçikçe artmaktadır. Elektrikli araçlara yönelikde aracın ne kadar güç ve ne kadarlık bir menzile sahip olduğu belirleyici olmaktadır. Bilindiği üzere bu tarz araçların baryalarının dolum süresi petrol ürünleri ile kıyaslandığın da daha uzun süre almaktadır. Bu yüzden yapılacak ve yapılmakta olan çalışmalarda elektrikli araçların şarj dolum süresini kısaltıp hem güçlerini hem de menzillerini artırma yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde literatüre Segway olarak adlandırılan iki tekerlekli denge robottu kazandırılmıştır. Segway'in kullanım alanına bakıldığından hem ulaşım aracı hem de hizmet robotlarının yapılmasına katkı sağladığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Segway'in kontrolü için literatürde kullanılan sensörlerden farklı olarak yük hücreleri kullanılmıştır. Yük hücreleri sayesinde Segway'i kullanacak olan kişinin ağırlık merkezindeki savrulma bilgilerine ulaşılmıştır. Kullanıcının ağırlık merkezine göre motorların kontrolü yapılarak motorların daha verimli kullanılması sağlanmıştır. Bu çalışmada ağırlık ve ağırlık merkezi bilgileri ile kullanıcının Segway'i

daha verimli, daha yüksek güçlü ve daha iyi batarya ömrü ile kullanabilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında Segway'in hareketi sensörlerden gelen bilgilere göre hem simülasyon hem de gerçek zamanda robot üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yük hücrelerinden kullanıcı kütle bilgisinin elde edilmesi sistemin dinamik modelinin çıkartılmasında kolaylık sağlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular kişi ve nesnelerin transferi için farklı Segway tasarımlarına ışık tutulabileceği gibi "Boston Dynamics" firmasının robotlarında olduğu gibi farklı görevleri icra edebilecek robot tasarımları için alt yapı oluşturmuştur.

Bu tezin, İkinci bölümünde Segway'in çalışma mantığından, ters sarkaç sisteminden ve bugüne kadar literatürde Segway ile ilgili yapılan akademik çalışmalarдан bahsedilmiştir. Üçüncü bölüm de Fırçasız Doğru Akım Motorunun (FDAM) yapısından, FDAM'ın matematiksel modelinden, Segway'in matematiksel modelinden, Segway simülasyonundan ve tasarlanan sistemde kullanılan donanımlardan bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, Maxwell programı kullanılarak elde edilen motor parametrelerinden, FDAM simülasyon bulgularından, yük hücresi temelli Segway simülasyonunun bulgalarından ve gerçekleştirilen sisteme ait bulgulardan bahsedilmiştir. Beşinci bölümde yapılan bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler üzerinde durulmuş ve ilerleyen çalışmalarında nelere daha çok dikkat edilmesi gerektiği dephinilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde Segway'in tarihsel gelişim süreci ve çalışma ilkesi olan ters sarkaç metodu açıklanmıştır. Ayrıca konu ile ilgili ulusal ve uluslararası alanda yapılan akademik çalışmalar irdelenmiştir.

2.1 Segway

Dean Kamen vd. (2001) tarafından ilk olarak literatüre giren Segway, iki teker üzerinde kendi dengesini koruyabilen tek kişilik ulaşım aracı veya mobil robotlar için kullanılan genel bir tanımlamadır. Kullanımının basit olması, boyutlarının küçük ve dar yerlerde manevra kabiliyetinin yüksek olması nedeni ile birçok uygulamada tercih edilmektedir. Şekil 2.1'de farklı kullanım amaçları için tasarlanmış Segway tasarımları görülmektedir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 2.1 Farklı kullanım amaçları için tasarlanmış Segway çeşitleri.

Bu araçların havaalanlarında, golf sahalarında, gezi turlarında, güvenlik şirketlerinde, polislerde, hastanelerde, büyük fabrikalar gibi sayısını artırabileceğimiz birçok yerde ulaşım aracı olarak kullanımı mevcuttur. Örneğin gezi sektöründe Segway kullanımını yaygınlaştıran Fransa, İspanya, Rusya, Polonya, İsveç, Almanya, Avusturya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi birçok ülke bulunmaktadır (İnt. Kyn. 2). Güvenlik sektöründe de güvenlik personellerinin toplumsal olaylara daha hızlı müdahale etmesine kolaylık sağlamaktadır. Tahiti, Filipinler, Tayland, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, İstanbul, Japonya, Dubai havaalanlarında görev alan güvenlik personelleri tarafından kullanımı örnek gösterilebilir (İnt. Kyn. 3).

Mobil robot olarak kullanılan platformlarda ise Segway'e çeşitli görevler (Şekil 2.2) verilerek bu görevleri yerine getirmesi istenilmektedir. Bunlara örnek verilecek olursa otonom hareket edebilen robotlar, üzerindeki kamera modülü ile çevresinin haritalandırmasını yapan robotlar, uzaktan kumanda edilerek verilen görevleri yerine getirebilen robotlar ve çeşitli yükleri taşımak için tasarlanmış mobil robotlar örnek olarak verilebilir.



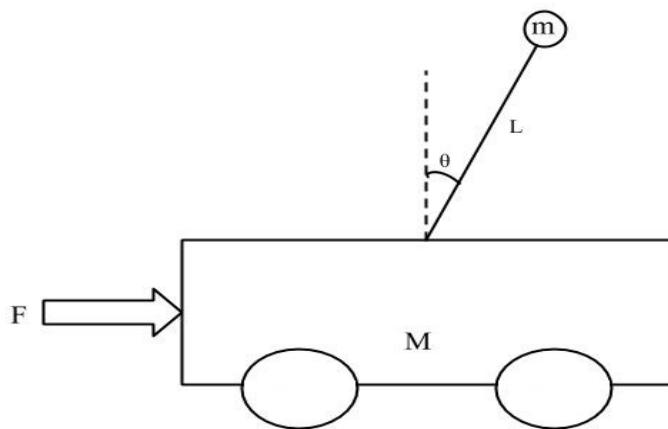
Şekil 2.2 Mobil robot olarak kullanılan denge robotları.

Sistemin dengede kalabilmesi için eğimin istenilen açıda tutması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli algoritmalar geliştirilmiş ve algoritmaların birbirleri ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Sistemin dik konumda dengede kalabilmesi için geliştirilen algoritmala örnek olarak Oransal-İntegral-Türevsel (PID), Linear Quadratic Regulator (LQR), Bulanık Mantık (BM), Yapay Sinir Ağları (YSA) verilebilir. Segway'in dik konumda kalması için jiroskop ve akselerometre sensörlerinden gelen veriler eş zamanlı olarak kontrol birimine aktarılmaktadır. Bu verilerin aktarımında işaret gürültü oranının yükseltilmesi için kalman, medyan vb. filtreleme tekniklerinden yararlanılmaktadır.

2.2 Ters Sarkaç Sistemi

İki tekerlekli denge robotları ters sarkaç sistemi ile kontrol edilmektedir. Ters sarkaç sistemi $\pm x$ düzleminde doğrusal hareket eden bir cismin dairesel hareket edebilecek şekilde mesnetli bir sarkaç ile cismin istenilen açıda durabilmesini sağlayacak şekilde kuvvetlerin uygulandığı fiziksel sistemdir. Ters sarkaç sisteminin kullanıldığı birçok alan

vardır. Bunlara örnek olarak mobil robot sistemleri, vinç sistemleri, roket sistemleri, robot kol sistemleri, uydu sistemleri, uçak sistemleri sayılabilir (Ertuğrul 2015). Ters sarkaç ile ilgili ilk uygulama Yamafuji ve Kawamura tarafından 1988 yılında yapılmıştır. Şekil 2.3'te ters sarkaç sisteminin temel prensip şeması verilmiştir. Bu sistemde F uygulanan kuvvet, M aracın kütlesi, m ters sarkaca bağlı cismin kütlesi, L sarkaç çubuğuun uzunluğu ve θ açısı sarkacın dikeyle yaptığı açıdır. Cisme kuvvet uygulandıkça sarkaca bağlı olan m kütlesi devrilmeye çalışacaktır. Bu devrilme işlemini engellemek için θ açısının kontrolü sağlanmaktadır (Altun 2008).



Şekil 2.3 Ters sarkaç sistemi.

Ters sarkaç sistemi yapılarına göre;

- Tek çubuklu ters sarkaç,
- Çift çubuklu ters sarkaç,
- Döner ters sarkaç,
- Tek ve çift dönel sarkaç

gibi çeşitleri bulunmaktadır (Ertuğrul 2015).

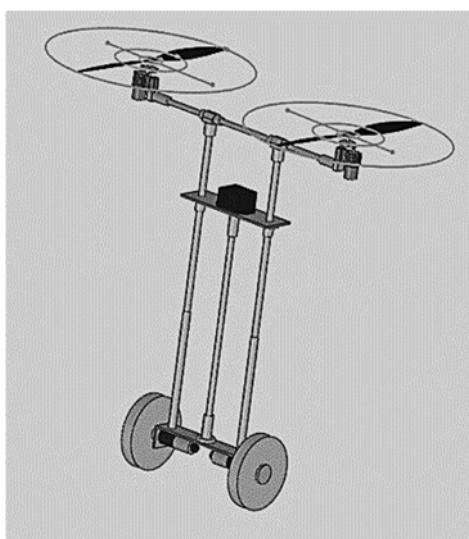
2.3 Literatür Taraması

Bu tez çalışmasında literatür taraması, ulusal ve uluslararası çalışmalar olmak üzere iki farklı başlık altında toplanmıştır. Yapılan tarama ile ortaya çıkan ürünler ve bu ürünlerin geliştirilmesi için nasıl bir yol izlendiği araştırılmıştır.

2.3.1 Ulusal Çalışmalar

Şen (2014) gerçekleştirdiği iki tekerlekli denge robotunun kontrolünü BM ve LQR algoritmaları ile yapmıştır. BM parametrelerinin belirlenmesinde ise arı algoritmasından yararlanılmışlardır. Çalışma sonucunda BM ve LQR algoritmalarının performansları Matlab/Simulink ortamında karşılaştırmalar.

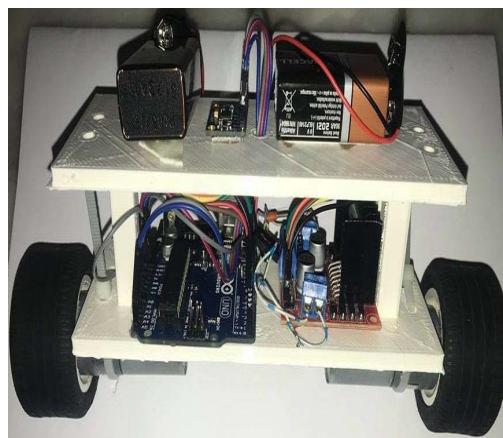
Küçük (2010) yapmış olduğu çalışmada melez bir robotik sistem (Şekil 2.4) tasarlamıştır. İki tekerlek üzerinde dengede durabildiği gibi 2 adet döner kanat ile havada seyredebilmektedir. Hem hava hem de kara için gerekli lineer olmayan matematiksel denklemler türetmiş ve bu denklemler durum uzay matrisi ile doğrusallaştırılmıştır. Algoritma olarak karada LQR ve hata uzay yaklaşımı havada ise PID ve LQR kullanmıştır. Matlab / Simulink ara yüzü ile sistemin gerçek zamanlı kontrolü sağlanmıştır. Gerçekleştirdiği çalışmada hem karada hem de havada sistemin dengeli davranışını gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4 Havada ve karada hareket edebilen iki tekerlekli denge robotu.

Önkol (2018) yapmış olduğu çalışmada iki tekerlek üzerinde dengede duran bir sistemin üzerine robot kol mekanizması eklemiştir. Robot kolun kaldıracağı kütle değişken olduğu için değişen kütle koşuluna adapte olabilen uyarlamalı model tabanlı öngörücü kontrol yaklaşımı ile PID performansı kıyaslanarak sistemin başarımı gösterilmiştir.

Çelik (2018) yapmış olduğu çalışmada nesne takibi yapabilen iki tekerlekli denge robotu (Şekil 2.5) tasarlamışlardır. Sistemin dengede durabilmesi için jiroskoptan gelen veriler kalman滤resine uygulanarak gürültünün bastırılması hedeflenmiştir. Kalman filtre çıkışından alınan veriler PID kontrolörün de kullanarak motorların sürülmESİ sağlanmıştır.



Şekil 2.5 Nesne takibi yapabilen iki tekerlekli denge robotu tasarımı.

Polat (2018) yapmış olduğu çalışmada ters sarkaç prensibine sahip olan iki tekerlekli denge robotun Matlab ortamında simülasyonunu yapmıştır. Sistemin 3 boyutlu halini Solidworks programıyla tasarlamış ve Matlab / Simulink ortamında kullanmıştır. Yaptığı çalışmada kontrolör olarak PID kullanılmış ve parametrelerini ‘PID tuner’ yardımıyla elde etmiştir. Şekil 2.6’da 3 boyutlu hali tasarlanmış olan iki tekerlekli denge robotu verilmiştir.



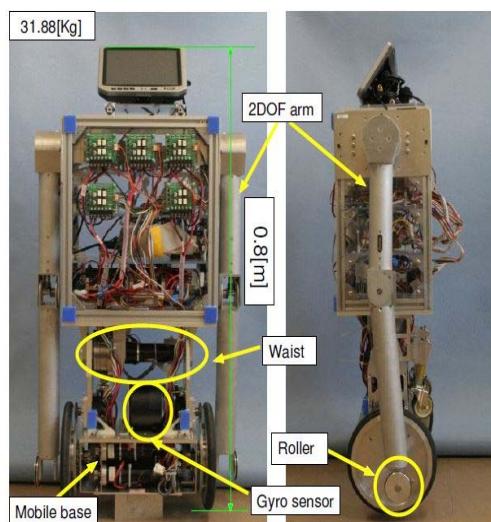
Şekil 2.6 3 boyutlu denge robotunun tasarımı.

Umay (2018) yapmış olduğu çalışmada iki tekerlekli denge robotunu ters sarkaç prensibini kullanarak tasarlamıştır. Sistemin matematiksel modelini Lagrange metodunu kullanarak çıkarmış ve Matlab / Simulink programında simülasyonunu yapmıştır. Yaptığı simülasyonu LQR, PID ve Kutup Atama (KA) gibi kontrolörler ile çalıştmış ve bu kontrolörler arasındaki başarı oranlarını karşılaştırmıştır.

Celik (2014) yapmış olduğu çalışmada iki tekerlekli denge robotunun tasarımını Matlab / Simulink ortamında yapmıştır. Sistemin matematiksel modelini Lagrange metodunu kullanarak çıkarmıştır. Kontrol algoritması olarak PID ve Model Öngörülü Kontrolü (MPC) kullanılmıştır. Sarkaç açısının kontrolünü izleyerek hangi kontrolörün daha başarılı olduğunu incelemiştir. Bu incelemelerin sonucunda MPC algoritmasının PID'ye göre performansının daha iyi olduğunu gözlemlemiştir.

2.3.2 Uluslararası Çalışmalar

Jeong ve Takahashi (2007) Inverted PENDulum Type Assistant Robot (I-PENTAR) adında ayakta durabilen ve oturabilen bir mobil robot (Şekil 2.7) tasarlamışlardır. Bu robotun ters sarkaç sistemini, jiroskop sensöründen aldıkları veriler ile LQR metodu kullanarak kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmada ayakta durma ve oturmanın hareket planlaması önerilmiştir. I-PENTAR'in ayakta durma, koşma, dönme ve dengeli oturma gibi bir dizi temel hareketleri gerçekleştirebileceği deneysel olarak doğrulanmıştır.

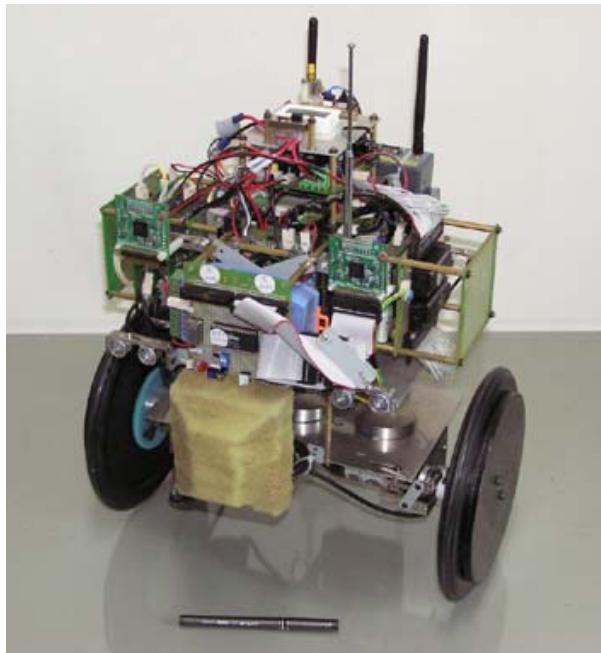


Şekil 2.7 I-PENTAR.

Butler ve Bright (2008) yapmış oldukları çalışmada, iki tekerlekli mobil robot üzerinde farklı kilolardaki kullanıcılara göre mobil robotun tepki sürelerini LQR metodu kullanarak incelemiştir. Grepl (2009) yapmış olduğu çalışmada ise iki tekerlekli bir denge robotunu ivme ölçer sensörden aldığı verileri işleyerek LQR metoduyla kontrolünü sağlamıştır. Çok gövdeli mobil robotun sistem dinamiği için Matlab / SimMechanics modelleme yazılımı kullanılmıştır. Literatürde bu çalışma içeriğine benzer birçok çalışmada yer almaktadır (Angeles 2004, Chi vd. 2005, Takita vd. 2009, Salerno ve Oryschuk 2009, Huang 2010).

Li vd. (2007) yaptıkları çalışmada, insan ve diğer şeylerin taşınmasında kullanmak üzere iki tekerlekli, ters sarkaç sistemini kullanan, eğimlerde ve dar alanlarda yüksek manevra kabiliyetine sahip bir robotun mekanik tasarımını ve dinamik modelini çıkarmışlardır. Robotun farklı işlerde kullanımına imkân vermesi için farklı çalışma modları bulunmaktadır. PID kontrolör kullanılarak geliştirilen robotun kontrolü, jiroskop ve ivme sensörlerinden gelen bilgiler ile yapılmaktadır. Mobil robot tırmanma eğimi, etrafında dönme ve küçük engelleri aşma gibi testlere tabi tutularak robotun etkinliği deneyler ile doğrulanmıştır. Literatürde PID algoritması kullanılan birçok araştırma mevcuttur (Burkert vd. 2004, Chee ve Abidin 2006, Vallius ve Röning 2007, Burdette 2007, Becker 2008, Nagarajan vd. 2009, Goher ve Tokhi 2010)

Sasaki vd. (2005) yapmış oldukları çalışmada, insanların ulaşımlarını sağlaması için iki tekerlek üzerinde dengede durabilen mobil bir robot yapmışlardır. Robotun tekerlekleri bağımsız sürücüler tarafından sürülmekte olup merkezi ağırlık noktasının konumuna göre yönlendirmesi jiroskop ve ivme sensöründen alınan bilgiler ile yapılmaktadır. Yapılan robotun basit yapılı ve küçük olmasının avantajlarına deðinmiş 12 kg'dan küçük bir robot yapmışlardır. Chiu ve Peng (2006) yapmış oldukları diğer bir çalışmada da iki tekerlekli denge robotunu tasarlamışlar ve kontrolünde BM algoritması kullanmışlardır. Tasarlanan robot Şekil 2.8'de verilmiştir. Tasarladıkları robotta ivme ve jiroskop sensörlerinden gelen verilerden yararlanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda uzaktan kumanda ile istenildiği gibi kontrol edilebildiğini grafikler üzerinden göstermişlerdir. Bu çalışma gibi literatürde bulanık mantık kontrol tabanlı yapılmış farklı çalışmalarında yer almaktadır (Tirmant vd. 2002, Jean ve Wang 2009).



Şekil 2.8 BM kontrollü iki tekerlekli denge robotu.

Grasser vd. (2002) yapmış oldukları çalışmada, Kutup Yerleştirme (KY) yöntemiyle iki tekerlekli mobil robotun kontrolünü sağlamışlardır. Ayrıca iki tekerlekli mobil robotlarda kullanılan sensörlerden gelen veriler üzerinde durmuşlardır. Gelen verilere filtreleme işlemi yaparak yüksek frekanslı filtrelerin robotu olumsuz etkilemesini ortadan kaldırmışlardır.

Charles ve Forrest (2006) yapmış oldukları çalışmada iki tekerlekli denge robotunun engellerden kaçması için yapay sinir ağları kullanmışlardır. Tasarladıkları robot üzerindeki lazer sensör yardım ile engeller belirlenmekte olup o engellerden kaçmak için gerekli Sinyal Genlik Modülasyonu (PWM) sinyalleri motorlara iletilmektedir.

Literatürde, iki tekerlekli denge robotların matematiksel modelinin çıkarılmasında farklı denklemler kullanılarak çıkarımlar yapılmıştır. Bazı çalışmalarda Lagrange Denklemleri kullanılmıştır (Chi vd. 2005, Pathak vd. 2005, Hu vd. 2007, Salerno ve Angeles 2007, Grepl 2009, Nagarajan vd. 2009, Goher ve Tokhi 2010, Huang 2010). Lagrange denklemleri metodu kullanılmayan çalışmalarda da genellikle Newton'un hareket yasasını kullanarak matematiksel model çıkartılmaktadır (Kim vd. 2006, Nawawi vd. 2008, Becker 2008, Lin ve Tsai 2009).

Yapılan sistemlerin simülasyon uygulamaları için genellikle Matlab/Simulink programı (Hu vd. 2007, Butler ve Bright 2008, Grepl 2009, Oryschuk vd. 2009), dinamik modellemenin çıkarılmasında ise Matlab / SimMechanics (Grepl 2009) programından yararlanılmıştır. Bazı çalışmalarda simülasyon üzerinden gidilmiş iken bazı çalışmalarda da simülasyon ve gerçek zamanda uygulaması yapılmaktadır. Böylelikle simülasyon ve gerçek zamandaki uygulaması arasındaki farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Yapılan bazı uygulamalarda ise Segway'e farklı farklı görevler yüklenerek Segway'in o görevi yerine getirmesi istenmiştir (Polat 2018, Önkol 2018, Çelik 2018, Pourmand vd. 2018, Gong vd. 2018, Morantes vd. 2018, Huai vd. 2019).

Literatür incelemeleri sonucunda, Segway'lerin kontrolünün ters sarkaç sisteme göre kontrolünün yapıldığı görülmüştür. Sistemin eğimini kontrol edebilmek için genellikle jiroskop sensör ve ivme sensörü kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu sensörlerden gelen verilerde oluşabilecek gürültü vb. durumlar için filtrelemeler yapılmıştır. Çalışmalar da sistemin dinamik modeli çıkartılmıştır ancak kullanıcıya bağlı olarak dinamik modelin eş zamanlı olarak güncellenmesi kullanılan sensörlerden dolayı yapılamamıştır. Bu tez çalışmasında ise yük hücresi kullanarak hem sensörler de oluşabilecek olan gürültüler daha aza indirilmeye çalışılmış hem de kullanıcı kütlesi yük hücreleri sayesinde öğrenildiği için sistemin dinamik modelinin çıkışını anlık olarak güncellenmektedir. Bu da sistemin kontrolünü ve sürüş dinamiğini kolaylaşırma da büyük bir avantaj sağlanmasıdır.

3. MATERİYAL ve METOT

3.1 Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM)

Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM) iki temel parçadan meydana gelmektedirler. Bunlardan birincisi manyetik alanı oluşturacak olan stator (endüktör) ve stator saç paketidir. İkincisi ise mıknatıslardan meydana gelen rotor (endüvi) kısmıdır. Bu rotor kısmı standart tip doğru akım motorlarında fırçalar yardımıyla enerjilendirilen sargılılardan meydana gelmektedir. Ancak FDAM'larda fırça olmadığı için uyartım akımına ihtiyaçları yoktur. FDAM'lar özel tip elektrik makineleri sınıfına dahil edilmektedirler. Stator ve rotor kutup sayılarına ve faz sayılarına göre çeşitli türleri mevcutlardır. Bu tip motorların kontrolü fazların istenilen dönme yönüne doğru sırayla tetiklenmesiyle yapılmaktadır. Kontrol için kullanılan kontrol kartının giriş gerilimi Doğru Akım (DA) kaynağı şeklindedir. Bu nedenle FDAM şebekede oluşabilecek olan bozucu frekans değişimlerinden etkilenmezler. FDAM yüksek verimli olması, yüksek tork sağlayabilmesi, sessiz çalışabilmeleri ve sağlam yapılı olmalarından dolayı endüstride çok tercih edilmektedir. Özellikle havacılık, tip, bilgisayar teknolojileri, endüstriyel otomasyon, askeri uygulamalar, parlama ve yanma riski olan ortamlarda ve robotik alanlarında kullanılmaktadır (Yedamale 2003).

Yapısı itibarı ile elektronik olduğu için verimleri yüksektir. Fırçalı DA Motor ile kıyaslandığında, fırça ve kollektör yapısına ihtiyaç duymamaları önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Elektrik iletimi herhangi bir fırça yardımıyla yapılmadığından dolayı sürtünmeye bağlı ark oluşturmazlar. Bu sayede bakım periyotları daha uzun olabilmektedir. FDAM'ların statora yerlesik sargıların soğutulma işlemi daha kolay olduğundan, her iki motora aynı güç uygulandığında, FDAM'dan daha yüksek mekanik güç elde edilmektedir. (Ding vd. 2010, Bayraktar 2014).

FDAM, kullanım amaçlarına göre iki, üç veya daha çok fazlı olarak tasarlanıp çalıştırılmaktadır. Endüstride genellikle üç fazlı FDAM'lar tercih edilmektedirler. Yapıları itibarı ile fazların doğru tetiklenmeleri gerekmektedir. Bu tetiklenme işlemini ise Encoder, Alan etkisi (Hall effect) sensörü gibi çeşitli sensörlerden gelen sinyaller

anlamlandırılarak motora zarar vermeden istenilen fazın tetiklenmesi kontrol kartı tarafından sağlanmaktadır.

Endüstride daha çok tercih edilen FDAM'ların aşağıda diğer motor türlerine göre avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Aydoğdu ve Mert, 2008).

Avantajları

- Tork/Hacim değeri oldukça yüksektir.
- Yüksek verime sahiptirler.
- Güvenilirdir.
- Sessiz çalışırlar.
- Ark oluşturmazlar.
- Uyarma akımına ihtiyaçları yoktur.
- Yüksek hızlar elde edilebilir.
- Fırçasız oldukları için kömür tozları yoktur.

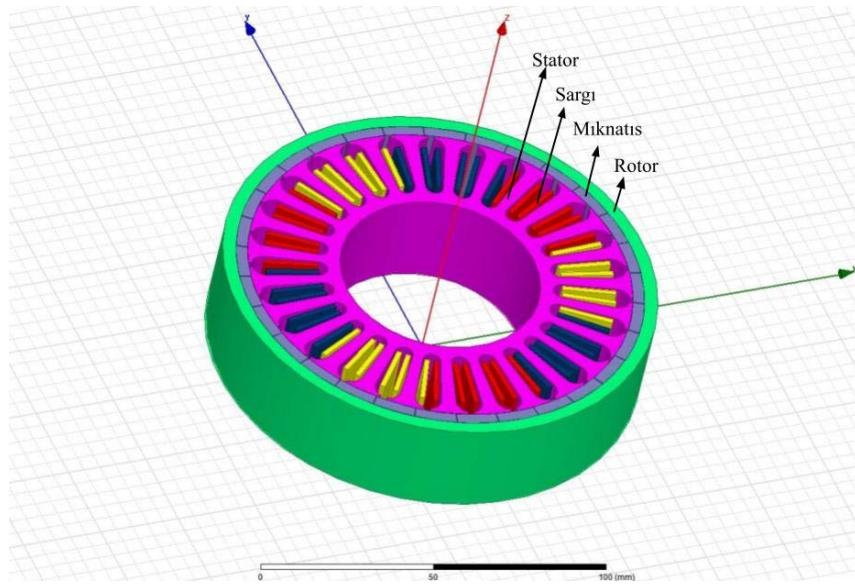
Dezavantajları

- İçlerinde mıknatıs barındıklarından dolayı fiyatları diğer motor türlerine göre yüksektir.
- Durgun haldeyken tork üretebilecek fazın tetiklenebilmesi için rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir.
- Kontrol devreleri diğer motorların kontrol devrelerine göre karmaşıktır.

FDAM rotor yapılarına göre dış rotorlu, iç rotorlu ve disk tipi rotorlu olmak üzere üçer ayrırlırlar.

3.1.1 Dış Rotorlu FDAM

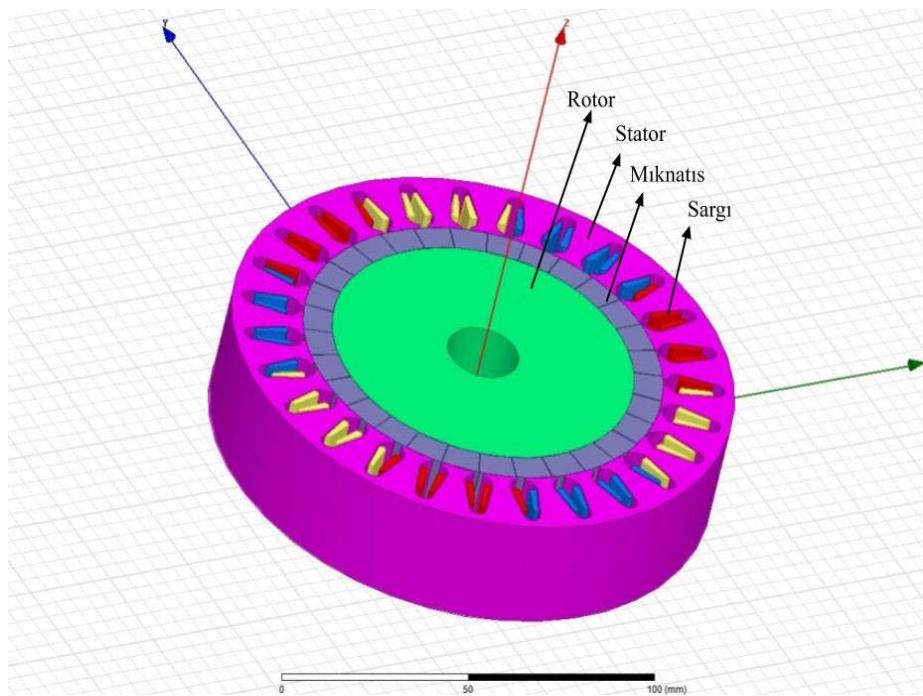
Şekil 3.1'de iç yapısı verilen dış rotorlu FDAM'larda stator iç kısımda, rotor ise dışında kalmakta olup mıknatıslar rotorun içine yerleştirilirler. Statorun üretim esnasında sarımlarının kolay olması avantaj sağlamaktadır. Genellikle yüksek hızlarda ve ani yük değişimlerinde kullanılan rotor yapısıdır (İnt. Kyn. 5).



Şekil 3.1 Dış rotorlu FDAM modeli.

3.1.2 İç Rotorlu FDAM

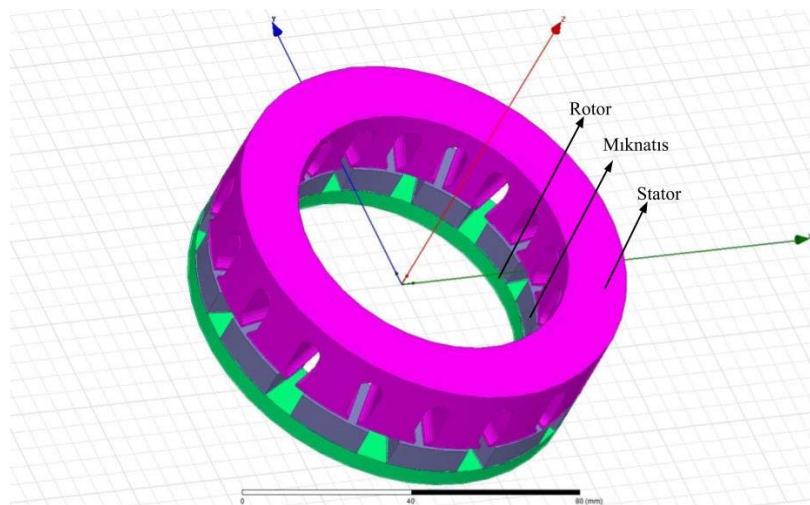
Şekil 3.2'de iç yapısı verilen iç rotorlu FDAM'larda stator dış kısımda, rotor ise iç kısımda kalmakta olup mıknatıslar rotorun dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Yapısı senkron ve asenkron makinelerdeki yapıya çok benzemektedir. Statorun üretim esnasında sarımının zor olması diğer rotor yapılarına göre bir dezavantaj oluşturmaktadır (İnt. Kyn. 5).



Şekil 3.2 İç rotorlu FDAM modeli.

3.1.3 Disk Tipi Rotorlu FDAM

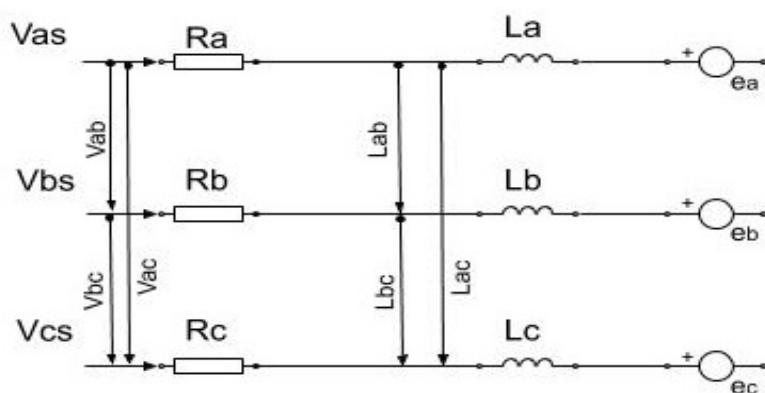
Şekil 3.3'te iç yapısı verilen disk tipi rotorlu FDAM'larda disk şeklinde olan rotorun yüzeyine mıknatıslar yerleştirilmiştir. Düşük hızlarda iyi performans gösteren bu yapı, hızın yükselmesiyle birlikte sıcaklığının artması sonucu verimi düşmektedir. Şekil 3.3'te disk tipi rotorlu FDAM modeli verilmiştir (İnt. Kyn. 5).



Şekil 3.3 Disk tipi rotorlu FDAM modeli.

3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Matematiksel Modellenmesi

Şekil 3.4'te FDAM'ın eş değer elektrik devresi görülmektedir. Fırçasız doğru akım motorlarının matematiksel modellemesinde faz değişken yaklaşımı basitliği nedeni ile tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 3.4 FDAM'ın eş değer devresi.

Tepe voltajı motorun maksimum voltaj sınırını aşmadığı sürece kaynak sinüzoidal, kare dalga, yamuk veya başka bir dalga şeklinde uygulanabilir. FDAM'ın elektriksel ve mekaniksel denklemleri aşağıda verilmektedir.

Faz voltaj değerlerine ait denklemler, Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

$$V_{as} = R_a \cdot i_{as} + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3.1)$$

$$V_{bs} = R_b \cdot i_{bs} + (L - M) \frac{di_{bs}}{dt} + e_b \quad (3.2)$$

$$V_{cs} = R_c \cdot i_{cs} + (L - M) \frac{di_{cs}}{dt} + e_c \quad (3.3)$$

Yukarıda denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımları,

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Faz voltajları,

e_a, e_b, e_c : Zıt EMK voltajları,

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : Faz akımları,

R : Faz direnci,

R_a, R_b, R_c : Faz dirençleri olup $R_a = R_b = R_c = R$

L_a, L_b, L_c : Faz endüktansları olup $L_a = L_b = L_c = L$ 'dir.

M : Ortak endüktanştır.

FDAM'ın torku temel olarak zıt elektro manyetik kuvvet (EMK)'in dalga biçiminden etkilenmektedir (Yamafuji ve Kawamura 1988, Ha ve Yuta 1996, Shiroma vd. 1999). Çalışan motorun stator sargılarında oluşan zıt gerilim Zıt EMK olarak adlandırılmaktadır. Zıt EMK manyetik akıya, hızı ve pozisyon parametrelerine bağlıdır. Her fazda oluşan Zıt EMK gerilimlerinin formülleri Denklem 3.4, 3.5 ve 3.6'da verilmiştir.

$$e_a = K_e \cdot f(\theta_e) \cdot w_m \quad (3.4)$$

$$e_b = K_e \cdot f(\theta_e - (2\pi/3)) \cdot w_m \quad (3.5)$$

$$e_c = K_e \cdot f(\theta_e + (2\pi/3)) \cdot w_m \quad (3.6)$$

Yukarıda denklemelerde kullanılan parametrelerin tanımları,

e_a, e_b, e_c : Zıt EMK voltajları,

K_e : Zıt EMK sabiti,

θ_e : Elektriksel motor açısı,

w_m : Mekanik açısal hızdır.

Yamuk EMK üretici fonksiyonu $f(\theta_e)$ Denklem 3.7'de verilmiştir.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta_e < 30, \\ 1 & 30 \leq \theta_e < 90, \\ 1 & 90 \leq \theta_e < 150, \\ 0 & 150 \leq \theta_e < 210, \\ -1 & 210 \leq \theta_e < 270, \\ -1 & 270 \leq \theta_e < 330, \\ 0 & 360 \leq \theta_e < 360, \end{cases} \quad (3.7)$$

Her fazın oluşturduğu elektromanyetik tork değerleri Denklem 3.8, 3.9 ve 3.10 ile ifade edilmektedir. Toplam elektromanyetik tork ise Denklem 3.11 ve 3.12'de verilmiştir.

$$T_a = K_t \cdot f(\theta) \cdot I_a \quad (3.8)$$

$$T_b = K_t \cdot f(\theta - 2\pi/3) \cdot I_b \quad (3.9)$$

$$T_c = K_t \cdot f(\theta + 2\pi/3) \cdot I_c \quad (3.10)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (3.11)$$

$$T_e = (e_a \cdot I_a + e_b \cdot I_b + e_c \cdot I_c) / w_m \quad (3.12)$$

Yukarıda denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımları,

T_a, T_b, T_c : Fazlarda üretilen torklar,

I_a, I_b, I_c : Faz akımları,

e_a, e_b, e_c : Zıt EMK voltajları,

K_t : Tork sabiti,

T_e : Fazlarda üretilen toplam tork,

w_m : Mekanik açısal hızdır.

Mekaniksel torkun formülü ise Denklem 13'de verilmiştir.

$$T_m = T_{yük} + J \cdot \frac{dw_m}{dt} + \beta \cdot w_m \quad (3.13)$$

Yukarıda denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımları,

T_m : Mekaniksel tork,

$T_{yük}$: Yük torku,

J : Atalet momenti,

β : Sürtünme katsayısıdır.

Hat gerilim denklemlerinden daha kolay modelleme yapılabileceği için $V_{ab} = V_a - V_b$ ve $e_{ab} = e_a - e_b$ eşitliklerinden yararlanarak hat gerilimleri Denklem 3.14 ve 3.15'deki gibi hesaplanabilir.

$$V_{ab} = V_a - V_b = R_s(I_a - I_b) + (L - M) \frac{d}{dt}(I_a - I_b) + e_{ab} \quad (3.14)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = R_s(I_b - I_c) + (L - M) \frac{d}{dt}(I_b - I_c) + e_{bc} \quad (3.15)$$

Ortak endüktans ihmali edilirse ve $I_a + I_b + I_c = 0$ alındığında akım denklemleri Denklem 3.16 – 3.18'de verilmiştir.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.16)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}i_b - \frac{1}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.17)$$

$$I_c = -(I_a + I_b) \quad (3.18)$$

Elektriksel açı ve mekaniksel açı arasında kutup sayısı ile orantılı olup Denklem 3.19'da aralarındaki bağlantı verilmiştir. Bu bağlantı bakıldığından elektriksel açı ile mekaniksel açı arasında kutup sayısının yarısı ile orantılı bir çarpan bulunmaktadır.

$$\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklemdeki;

θ_e : Elektriksel açı,

θ_m : Mekaniksel açı,

P : Kutup sayısıdır.

Mekaniksel hız ile mekaniksel açı arasındaki bağlantı Denklem 3.20'de verilmiştir. Denklemde de görüldüğü gibi mekaniksel hızın zamana göre türevi mekaniksel hızı vermektedir.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = w_m \quad (3.20)$$

Yukarıda denklemde,

θ_m : Mekaniksel açı,

w_m : Mekaniksel hızdır.

3.3 Segway'in Matematiksel Modeli

Bölüm 3.2'de FDAM matematiksel modelinin nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Segway içerisinde iki adet FDAM kullanılmaktadır. Bu bölümde iki adet FDAM kullanılarak Segway'in matematiksel modellenmesi ve simülasyonunun nasıl yapıldığı açıklanacaktır.

3.3.1 Segway FDAM'lara Etki Eden Kuvvetler

FDAM'ların ürettiği tork kuvveti Segway'in hareketi için gerekli kuvvetleri karşılamalıdır. Sistemin hareket edebilmesi için üretilen torkun talep edilen kuvvetten daha fazla olması gerekmektedir. Bu nedenle FDAM'lara etki eden kuvvetlerin bulunması gerekmektedir. Bir aracın hareket etmesine tesir eden direnç kuvvetleri; (İnt. Kyn. 4).

- Yuvarlanma Direnci,
- Yokuş Direnci,
- Hava Direnci,
- İvmelendirme Direnci.

şeklinde sıralanabilir. Hava direnci ve ivmelendirme direncinin Segway üzerindeki etkisi sınırlı olduğu için ihmäl edilebilir. Sistemin hareketinde etkili olan yuvarlanma direnci ve yokuş direnci aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3.1.1 Yuvarlanma Direnci

Doğrusal olarak hareket etmekte olan bir aracın tekerlekleri üzerinde oluşan sürtünme kuvvetidir. Hareket esnasında tekerleğin şeklinin değişimi ve yol yüzeyindeki değişimler yuvarlanma direncini değiştirmektedir. Farklı teker ve yol tiplerine göre yuvarlanma dirençlerinde değişiklikler olmaktadır. Bu teker ve yol tipleri aşağıda verilmiştir.

- Katı tekerlek – katı yol,
- Katı tekerlek – şekil değiştiren yol,

- Elastik tekerlek – katı yol,
- Elastik tekerlek – şekil değiştiren yol

olmak üzere 4 farklı durumda incelenmektedir.

Günümüzde ulaşım araçlarının kullanmış olduğu seçenek elastik tekerlek – katı yol seçeneğidir. Yuvarlanma direnci formülü Denklem 3.21' de verilmiştir.

$$F_r = \left(\frac{e}{r_{dyn}} \right) G = f_r G \quad (3.21)$$

Yukarıdaki denklemdeki parametreler,

F_r : Yuvarlanma direnci,

$\frac{e}{r_{dyn}}$ = f_r : Yuvarlanma direnci katsayısı,

G : Sistemin yere uyguladığı kuvvettir.

Denklemde kullanılan yuvarlanma direnci katsayısı tekerleğin yapısına ve aracın hızına göre değişiklik göstermektedir. Yuvarlanma direnci 20 km/sa hızda, katı yolda ve çelik kuşaklı bir tekerlekte 0,010 – 0,015 arasında alınmaktadır. Bu çalışmada yuvarlanma direnci katsayısı 0,012 olarak alınmıştır.

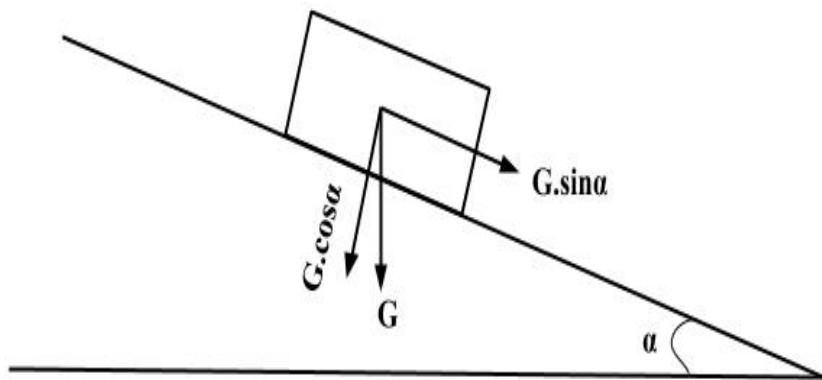
3.3.1.2 Yokuş Direnci

Hareketli sistemlerin en fazla kuvvete ve/veya torka ihtiyaç duydukları dirençler yokuş dirençleridir. Yokuş direnci herhangi bir aracın eğimli yolda yaptığı açıya bağlı olarak ters yönde oluşan kuvetten kaynaklanmaktadır. Şekil 3.5'te yokuş direncinin detaylı geometrik gösterimi verilmiştir. Yokuş direnci Denklem 3.22'de görüldüğü gibi formülize edilmektedir.

$$F_{ST} = G \cdot \sin\alpha \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemde,

- F_{ST} : Yokuş direnci,
- α : Yokuş açısı,
- G : Sistemin yere uyguladığı kuvvettir.



Şekil 3.5 Yokuş direncinin detaylı geometrik gösterimi.

Araca tesir eden toplam direnç kuvvet Denklem 3.23'de verilmiştir.

$$F_{toplam} = F_R + F_{ST} \quad (3.23)$$

Yukarıdaki denklemde,

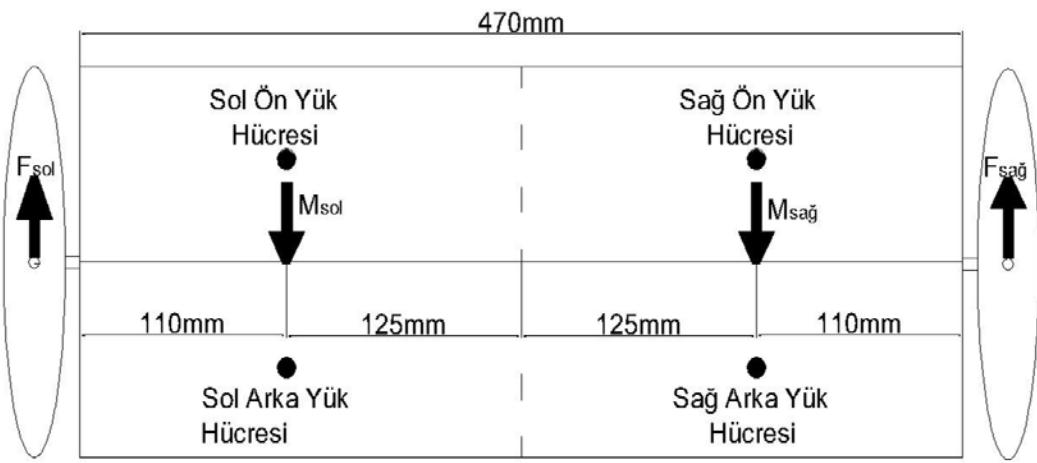
F_{toplam} : Araca tesir eden toplam kuvvet,

F_R : Yuvarlanma direnci,

F_{ST} : Yokuş direncidir.

3.3.2 Sistem Olarak Segway'in Modellenmesi

Sistemin hareket edebilmesi için toplam direnç kuvvetini yenebilecek bir kuvvet oluşturulması gerekmektedir. Segway üzerinde ihtiyaç duyulan kuvvetler ve motorların oluşturduğu kuvvetler Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kişi kütlesi sağ ve sol taraftan olmak üzere iki farklı yerden kuvvet uygulamaktadır. M_{sol} kişinin sol tarafa uyguladığı kütle ve $M_{sağ}$ kişinin sağ tarafa uyguladığı kütleyi vermektedir. F_{sol} ve $F_{sağ}$ kuvvetleri ise Segway'in motorunun oluşturulması gereken kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 3.6 Segway için talep edilen kuvvetler ve motorların oluşturduğu kuvvetler.

Segway sisteminin kuvvetlerin hesaplanmasıında kaldırıç sistemi kullanılmaktadır. F_{sag} kuvvetini bulmak için F_{sol} kuvvet noktası merkez noktası olup, M_{sol}, M_{sag} ve F_{sag} kuvvetleri işleme alınarak istenilen kuvvet bulunmaktadır. F_{sol} kuvveti içinde aynı durum geçerlidir. F_{sol} ve F_{sag} kuvvetleri sırasıyla Denklem 3.24'te ve Denklem 3.25'te verilmiştir.

$$F_{sol} = \frac{M_{sag}*110 + M_{sol}*360}{470} \quad (3.24)$$

$$F_{sag} = \frac{M_{sol}*110 + M_{sag}*360}{470} \quad (3.25)$$

Sistem üzerinde elde edilen kuvvetler Şekil 3.6'da görülmektedir. Bu kuvvetlerin toplamı, araca tesir eden kuvvetlerin toplamını geçtiğinde (Denklem 3.26) sistemin hareket etmesi sağlanacaktır.

$$F_{sag} + F_{sol} > F_{toplam} \quad (3.26)$$

Sistemin kuvvetleri bilindiğinde, sistemin torku da bilinmektedir. Tork ve kuvvet arasındaki bağıntı Denklem 3.27'de verilmiştir.

$$T = F * r \quad (3.27)$$

Yukarıdaki denklemde,

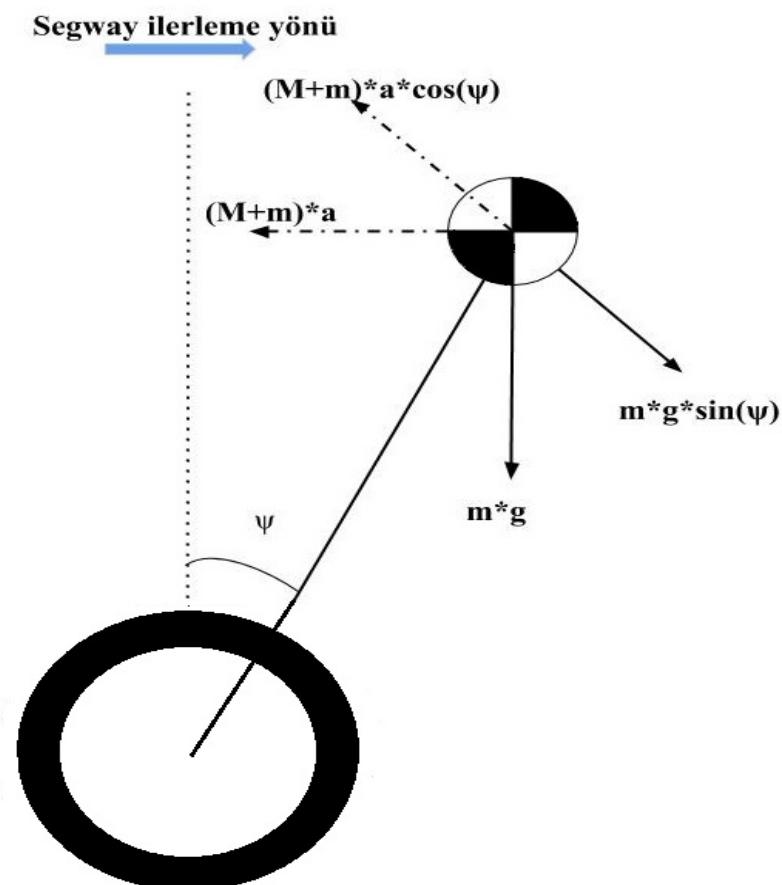
T : Tork,

F : Uygulanan kuvvet,

r : Tekerlek yarıçapıdır.

Segway'in sağa ve sola dönüşlerinde sağ ve sol taraftaki yük hücrelerinin farklarına göre Segway'in direksiyon açısı belirlenmektedir. Ancak direksiyon açısından fark çok yüksek olduğunda oluşabilecek kazaları önlemek için bazı önlemler alınmıştır. Bu önlemler sayesinde fark ne kadar çok olursa olsun maksimum direksiyon açısı 5 derecenin üzerine çıkmayacak şekilde yazılım üzerinden ayarlanmıştır.

Segway'in kontrolünde sürücünün belirli bir açıda öne veya arkaya doğru eğilimi olmaktadır. Zemin ile yapmış olduğu bu açı yunuslama açısı (Şekil 3.7) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.7 Maksimum yunuslama açısının çıkarılması.

Yunuslama açısının (ψ) kullanıcıya göre dinamik değişimini yapılmaktadır. Kullanıcının kütle bilgisi alındığı için dinamik değişim yapılabilmektedir. Bu da bize kullanıcının kütlesine göre yapabileceği maksimum açısının ne kadar olacağını, o açısının üzerine çıktıığında oluşabilecek olan kazaları önlemek için yazılım ile maksimum açayı aşması engellenmiştir. Şekil 3.7 incelenip gerekli matematiksel işlemler yapıldığında kullanıcının Segway'den düşmemesi için maksimum yunuslama açısının matematiksel denklemi çıkartılmış ve Denklem 3.28'de verilmiştir.

$$\Psi_{max} = \arctan \left(\frac{(M + m) \cdot a}{M \cdot g} \right) \quad (3.28)$$

Yukarıdaki denklemde,

M : Segway kütlesi,

m : Kullanıcı kütlesi,

a : İvme,

g : Yer çekimi ivmesi,

Ψ_{max} : Maksimum yunuslama açısıdır.

Maksimum yunuslama açısı (Ψ_{max}) çıkarıldıkten sonra Segway'in kullanım esnasındaki yunuslama açısı (Ψ) belirlenmektedir. Bu açı ön ve arka yük hücrelerindeki kütle farkının bağıl yüzdesine (Denklem 3.29-3.32) göre oluşturulmaktadır.

$$YH_{\ddot{o}t} = YH_1 + YH_2 \quad (3.29)$$

$$YH_{at} = YH_3 + YH_4 \quad (3.30)$$

$$YH_t = YH_{\ddot{o}t} + YH_{at} \quad (3.31)$$

$$\Psi = \Psi_{max} * \frac{k * (YH_{\ddot{o}t} - YH_{at})}{YH_t} \quad (3.32)$$

Yukarıdaki denklemde,

Ψ : Yunuslama açısı,

Ψ_{max} : Maksimum yunuslama açısı,

YH_1 : Birinci yük hücresi,

YH_2 : İkinci yük hücresi,

YH_3 : Üçüncü yük hücresi,

YH_4 : Dördüncü yük hücresi,

$YH_{\text{öt}}$: Ön taraftaki yük hücreleri toplamı,

YH_{at} : Arka taraftaki yük hücreleri toplamı,

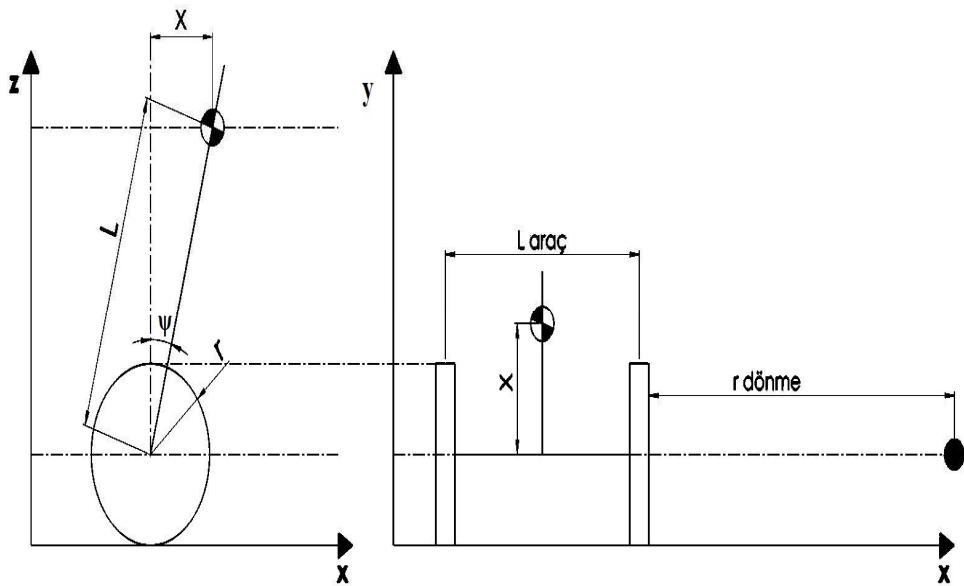
YH_t : Bütün yük hücrelerin toplamı,

k: Katsayıdır.

Yunuslama açısının hesabında kullanılan k katsayısı (Denklem 3.32) simülasyon üzerinde kullanıcının kütlesinin hepsini öndeği yük hücrelerine ya da arkadaki yük hücrelerine vermesini engellemek için kullanılmıştır.

Segway'in tasarımindan kullanılan motorlar 350 W 400 RPM özelliğine sahiptir. Kullanılan tekerleğin çapına göre km/sa birimine dönüştürüldüğünde maksimum 20 km/saat hız yapabilmektedir. Yapılan sistemde ön ve arka yük hücreleri farkına göre motorların hızları belirlenmektedir. Referans hızın (W_{ref}) belirlenmesinde öncelikle ön ve arka yük hücrelerinin farklılıklarını alınmakta olup toplam kütleye olan yüzdelik oranı çıkarılmaktadır. Bu oran ± 1 aralığında normalize edildikten sonra maksimum hız ile çarpılarak referans hız elde edilmektedir. Segway ileri veya geri giderken direksiyon açısı sıfır derece olduğunda referans hız, sağ ($W_{sağ}$) ve sol (W_{sol}) hızlara eşit dağılmaktadır. Ancak direksiyon açısı sıfırdan farklı olduğu durumlarda sağ ve sol hızlar direksiyon açısına göre dağılmaktadır.

Sağ ve sol hızların referans hız'a göre belirlenmesini anlatan geometrik çizim Şekil 3.8 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Segway'in direksiyon açısına göre sağ ve sol motor hızları.

Sağ ve sol motor hızları Şekil 3.8'deki çizimden çıkartılmaktadır. L uzunluğu genelleme yapılarak 110 cm olarak alınmıştır. Denklem 3.33 – 3.38 arasındaki eşitlikler sağ ve sol hızların çıkartıldığı denklemleri göstermektedir.

$$X = L \cdot \sin (\Psi) \quad (3.33)$$

$$\tan d = \frac{X}{R_{\text{dönme}} + \frac{L_{\text{araç}}}{2}} \quad (3.34)$$

$$R_{\text{dönme}} = \frac{L \cdot \sin (\Psi)}{\tan d} - \frac{L_{\text{araç}}}{2} \quad (3.35)$$

$$\frac{W_{\text{ref}}}{R_{\text{dönme}} + \frac{L_{\text{araç}}}{2}} = \frac{W_{\text{sag}}}{R_{\text{dönme}}} = \frac{W_{\text{sol}}}{R_{\text{dönme}} + L_{\text{araç}}} \quad (3.36)$$

$$W_{\text{sag}} = \frac{R_{\text{dönme}} + W_{\text{ref}}}{R_{\text{dönme}} + \frac{L_{\text{araç}}}{2}} \quad (3.37)$$

$$W_{\text{sol}} = \frac{(R_{\text{dönme}} + L_{\text{araç}}) \cdot W_{\text{ref}}}{R_{\text{dönme}} + \frac{L_{\text{araç}}}{2}} \quad (3.38)$$

Yukarıdaki denklemlerde,

L : Segway ayak tabanı ile kullanıcının ağırlık merkezi arasındaki mesafe,

$L_{araç}$: Segway uzunluğu,

X : Segway’ın belirli bir yunuslama açısıyla eğilim yaptığında Z ekseninde oluşan mesafe,

$r_{dönme}$: Segway’ın dönüş için referans aldığı merkez,

d : $r_{dönme}$ ile X arasında oluşan açı,

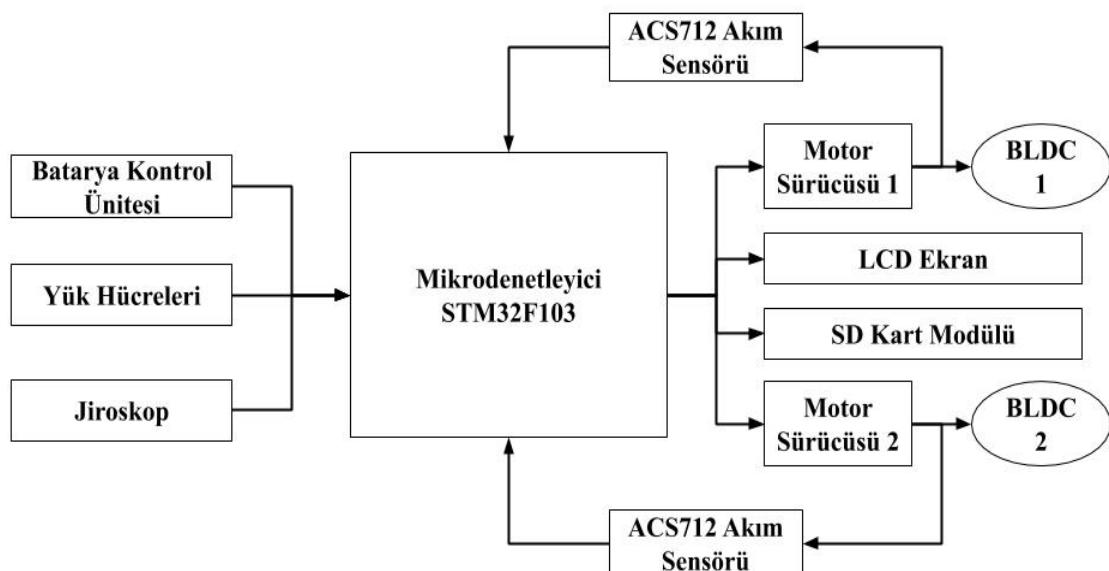
$W_{sağ}$: Sağ motorun hızı,

W_{sol} : Sol motorun hızı,

W_{ref} : Referans hızıdır.

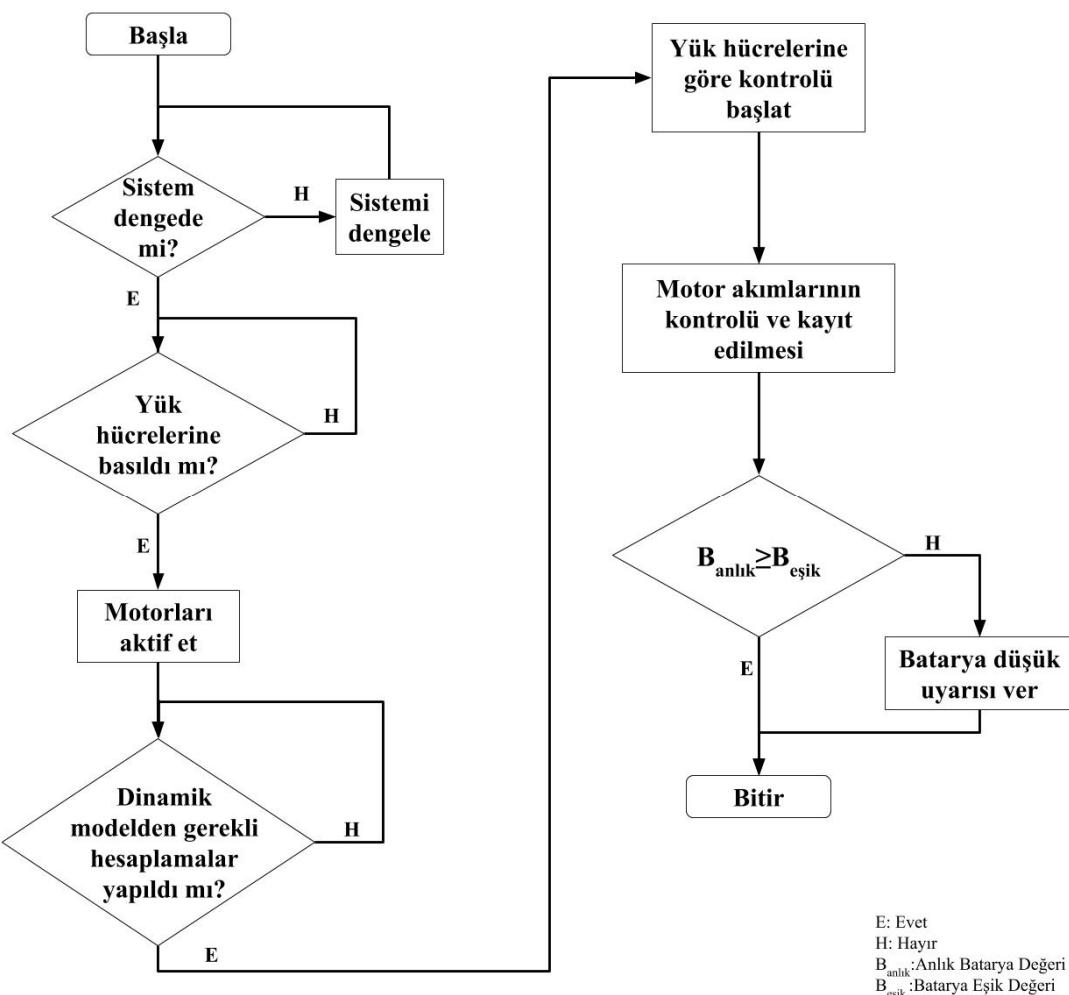
3.4 Yük Hücre Temelli Segway Sistemi

Bu bölümde yük hücresi temelli yapılan Segway uygulamasından bahsedilmektedir. Şekil 3.9’da simülasyonu yapılan Segway’ın blok diyagramı gösterilmiştir. Blok diyagramından da anlaşılacağı üzere ARM mimariye sahip olan STM32F103C8T6 model bir mikrodenetleyici ile sistemin tasarıımı yapılmıştır. Sisteme yük hücreleri, batarya kontrol ünitesi, jiroskop ve akım sensörleri giriş olarak verilmiştir. Sistemin çıkışında ise LCD izleme paneli, SD kart modülü, iki adet FDAM sürücüsü ve bu sürücülere bağlı FDAM bulunmaktadır.



Şekil 3.9 Segway’ın blok diyagramı.

Şekil 3.10'da sistemin akış diyagramı verilmiştir. Sistemin çalışma mantığı akış diyagramından da anlaşılacağı üzere sistem öncelikle Segway'in dengesinin kontrolüne bakmaktadır. Sistem eğer dengede ise Segway üzerindeki yük hücrelerine baskı var mı yok mu kontrol edilmektedir.



Şekil 3.10 Sistemin akış diyagramı.

Yazılan yazılımda 4 adet yük hücresine de baskı yapılması gerektiği aksi takdirde motor sürücüsünün motoru tetiklemesi engellenmiştir. Böylelikle herhangi bir kullanıcının Segway'in üzerine bineceği esnada tek ayagını atıp ikinci ayagını atacak olan süre içerisinde Segway'in hareket etmesi engellenmektir. Aksi takdirde kullanıcıların Segway'e binme esnasında düşmeye bağlı yaralanmalar olabilmektedir. Her bir yük hücresine baskı yapıldığında motor sürücülerini motorları tetikleyebilecek konuma

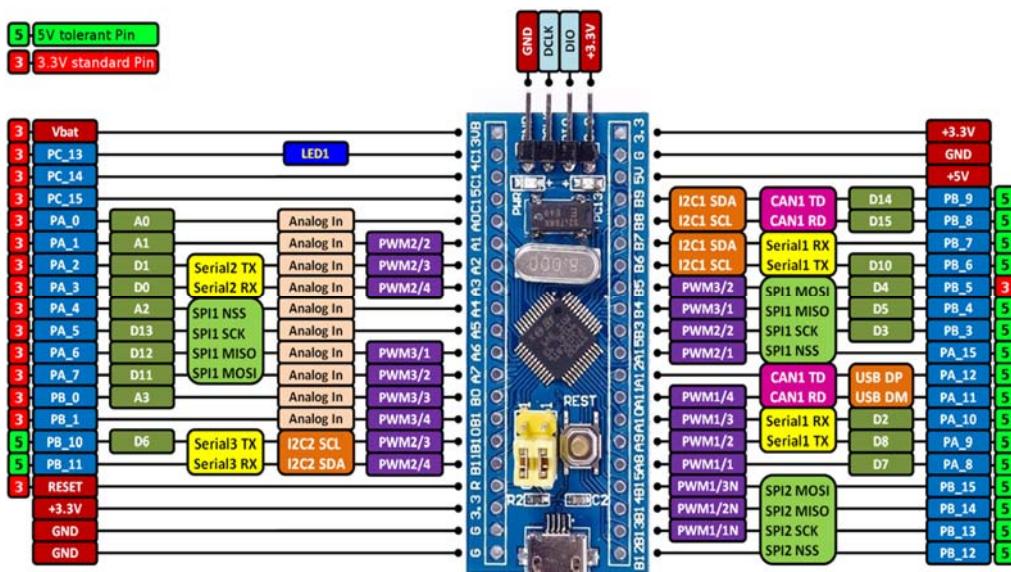
gelmektedir. Motorların aktif edilmesinden sonra sistemin dinamik modelinden gerekli hesaplamaların yapılip yapılmadığı kontrol edilmektedir. Gerekli hesaplar elde edildikten sonra aktif edilen motorların kontrolü yük hücrelerine göre yapılmaktadır. Motorların çekmiş olduğu akımlar sensörler yardımıyla ölçülmekte ve SD kart modülü sayesinde SD karta yazdırılmaktadır. Batarya kontrol ünitesi, sistemin bataryasını kontrol etmekte ve sistemin çalışmaya devam edip edemeyeceğine karar vermektedir.

3.5. Tasarlanan Sisteme Ait Temel Donanımlar

Bu başlık altında Segway sistemin uygulaması için kullanılan temel donanımların özelliklerinden bahsedilmiştir. Kullanılan temel donanımlar mikrodenetleyici, yük hücresi, HX711 modülü, ACS712 Akım sensörü, SD kart modülü, çoklu sensör kartı, Segway motorları, motor sürücülerleri ve batarya olup bu donanımlar hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.5.1 Mikrodenetleyici

Uygulama da ARM mimariye sahip olan STM32F103C8T6 model bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Kullanılan işlemcinin pin özellikleri Şekil 3.11'de gösterilmiş olup, kullanılan işlemcinin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



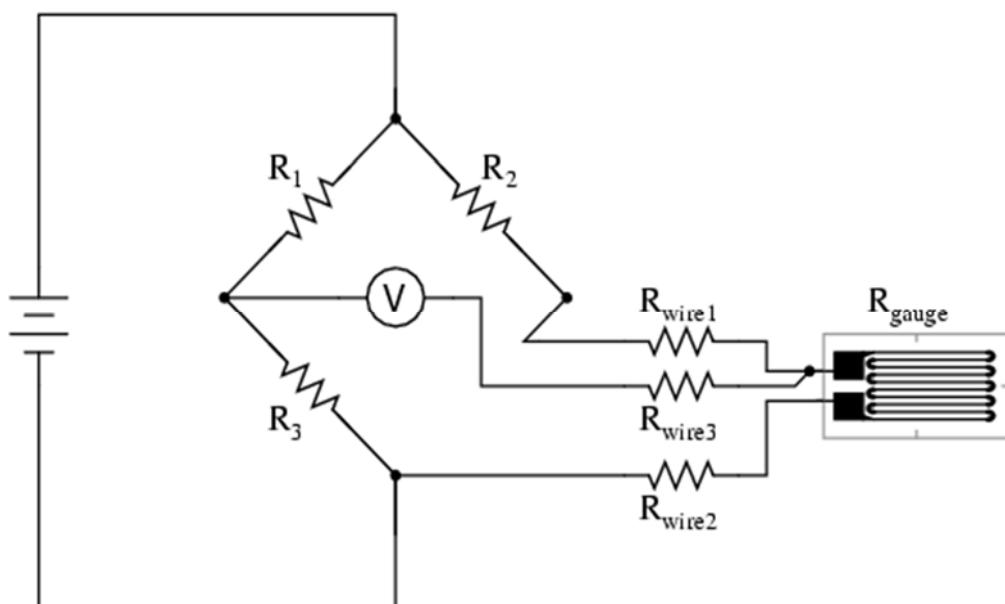
Şekil 3.11 STM32F103C8T6 model mikro denetleyicinin pin özellikleri.

Çizelge 3.1 STM32F103C8'in teknik özellikler.

Parametre	Ölçüm Sonucu
İşlemci	ARM®32-bit Cortex®-M3 CPU Core
Çalışma Voltajı	2,0 – 3,6 V
Flash Hafıza	64 ve 128 Kbyte
Güç Tüketimi	Düşük güç tüketimi, uyuma, durma, hazırda bekleme özellikler
ADC özellikleri	2x12 bit, 16 kanal
DMA özellikleri	7 kanal DMA vardır.
Haberleşme arayüzü	SPI, Uarts, I ² C, CAN, USB
Zamanlayıcı	7 adet 16 bit zamanlayıcısı vardır.
Sarımlı sayısı	34 Sarım

3.5.2 Yük Hücresi

Yük hücresi, üzerine uygulanan kuvveti elektriksel sinyale çeviren sensör çeşididir. Oluşturduğu elektriksel voltaj ile ne kadarlık bir baskı yapıldığı hesaplanabilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan yük hücresi 3 pinden oluşmakta olup devre şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Yük hüresinin detaylı teknik bilgileri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



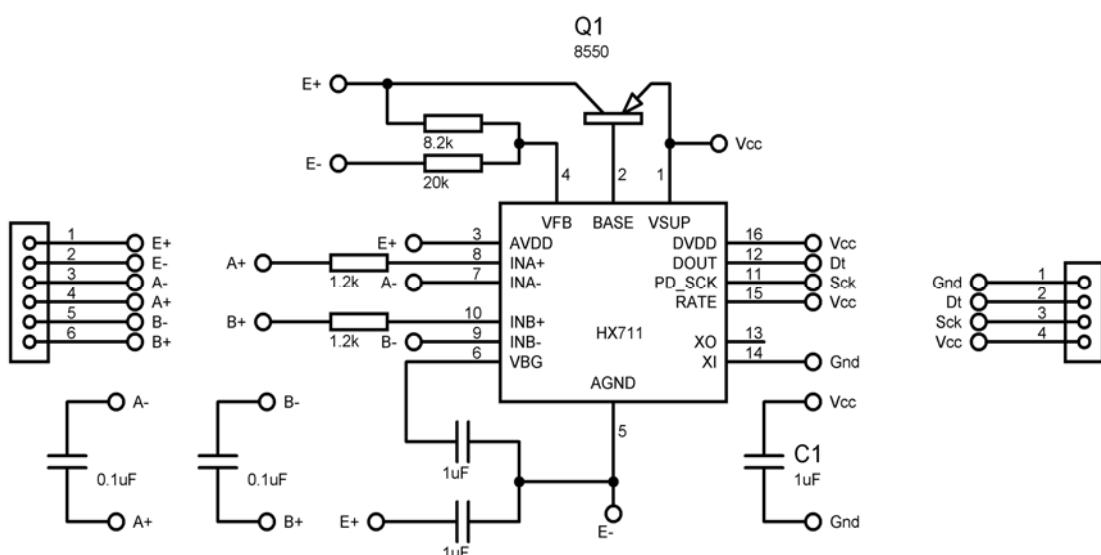
Şekil 3.12 Kullanılan yük hüresinin devre şeması.

Çizelge 3.2 Kullanılan yük hücresinin teknik bilgileri.

Parametre	Teknik Özellik
Pin sayısı	3 pin
Ölçüm aralığı	0 – 50 kg
Boyut	34X34X8 mm
Ölçüm Hassasiyeti	1.1 ± 0.15 (mV/V)
Doğrusallık hata payı	%0,2
Tekrarlanabilirlik	%0,1
Gecikme	%0,2
Yayılma	%0,1 / 3dk
Çıkış direnci	1000 ± 50 Ω
Yalıtım direnci	≤ 2000 MΩ (100VDC)
Çalışma sıcaklığı	-10/50 °C
Aşırı yük kapasitesi	%150

3.5.3 HX711 ADC DönüştürÜcÜ

Kullanılan yük hücrelerin daha hassas bir ölçüm yapabilmesi için 24 bit ADC çözünürlüğe sahip HX711 (Şekil 3.13) kullanılmıştır. Kütle ölçümlerinde ve endüstriyel kontrol uygulamalarında yaygınça kullanılmaktadır.

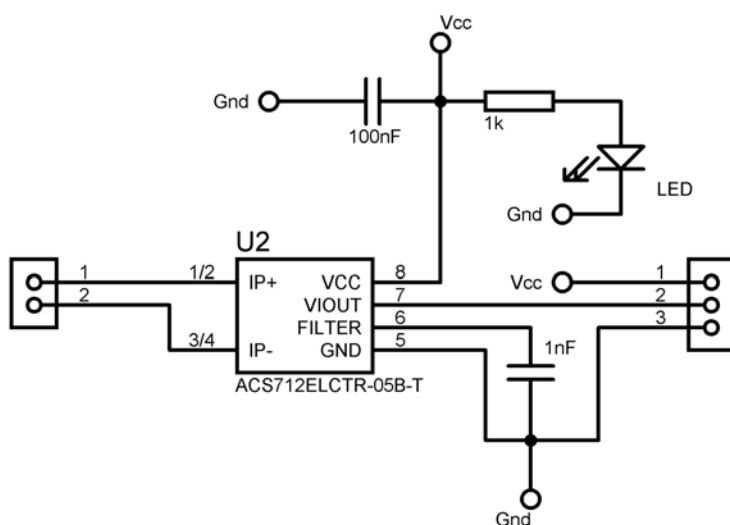


Şekil 3.13 HX711 modülü devre şeması.

2 ayrı kanal girişine sahip olan HX711'de 32, 64 ve 128 olmak üzere 3 çeşit kazanç seçeneği vardır. 10 SPS ve 80 SPS olmak üzere iki farklı veri örnekleme hızı bulunmaktadır. Çalışma voltajı 2,6V ile 5,5V arasında olup çalışma sıcaklığı – 40 °C ile 85 °C arasında değişmektedir.

3.5.4 ACS712 Akım Sensörü

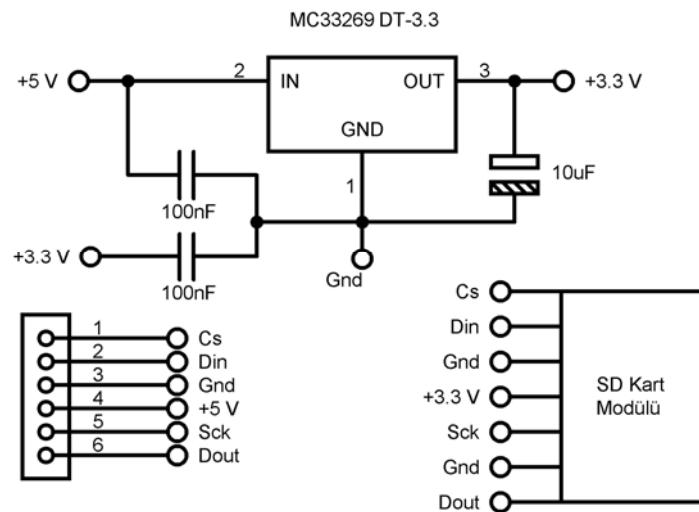
Yapılan sistemde motorların çektığı akım ACS712 akım sensörü ile ölçülmektedir. Çeşitli akım aralıklarında ölçüm yapan bu sensörün 5 A, 20 A ve 30 A olmak üzere 3 farklı çeşidi bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında –30 A ile 30 A arası akım okuma yapan 66mV hassasiyete sahip olan ACS712-30 A kullanılmıştır. Akım ölçümü için gerçekleştirilen sisteme ait açık devre şeması Şekil 3.14 görülmektedir.



Şekil 3.14 ACS712-30A akım sensörü devre şeması.

3.5.5 SD Kart Modülü

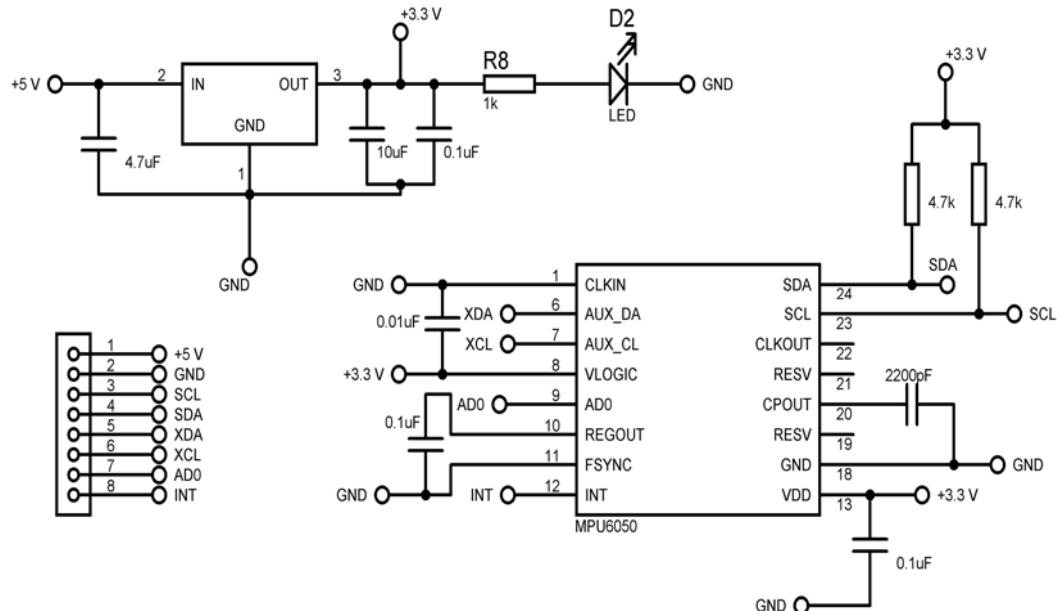
Segway üzerinden ölçülen verilerin analiz edilmesi için kayıt altına alınması gerekmektedir. Bu veriler, SD kart modülü yardımıyla hafıza kartına “.txt” dosya formatında kayıt edilmektedir. SD kart modülü, mikrodenetleyici ile haberleşmek için SPI haberleşme protokolünü kullanmaktadır. Bu modül sayesinde sisteme gerekli görülen bütün veriler kayıt altına alınıp incelenebilmektedir. Şekil 3.15'te SD kart modülünün devre şeması verilmiştir.



Şekil 3.15 SD kart modülü devre şeması.

3.5.5 Çoklu Sensör Kartı

Segway'in dengeli bir şekilde dik konumda kalmasını kontrolü çoklu sensör kartı (IMU) ile yapılmaktadır. Segway üzerine yerleştirilecek olan donanımların simetrik yapıya sahip olması ya da simetrik yapıya yakın olması Segway sisteminin daha kolay dengede olmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.16 MPU6050 Çoklu sensör kartının devre şeması.

Bu çalışmada 3 eksenli jiroskop ve 3 eksenli açısal ivme ölçer olmak üzere 6 eksenli IMU sensör kartı olan MPU6050 kullanılmıştır. Çalışma voltaj aralığı 3V ile 5V arasındadır. Haberleşme protokolü olarak I²C kullanan IMU, her eksen için 16 bit çözünürlüğe sahip çıkış vermektedir. Şekil 3.16'da kullanılan IMU kartın açık devre şeması görülmektedir. Sensör kartının üzerinde 8 pinli soketi olup bu pinlerin özellikleri Çizelge 3.3'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 3.3 MPU6050 Çoklu sensör kartının pin özellikleri.

Pin	Teknik Özellik
VDD	2,3-3,7 V çalışma voltaj aralığı
GND	Toprak pini
SCL	Serial Clock – Veri senkronizasyonundan sorumlu
SDA	Serial Data Line – Verilerin taşıdığı hat
XDA	Dışardan başka bir sensör bağlantı veri pini
XCL	Dışarıdan başka bir sensör clock pini
AD0	Master-Slave pini
INT	Kesme(interrupt) pini

3.5.6 Segway Motorları

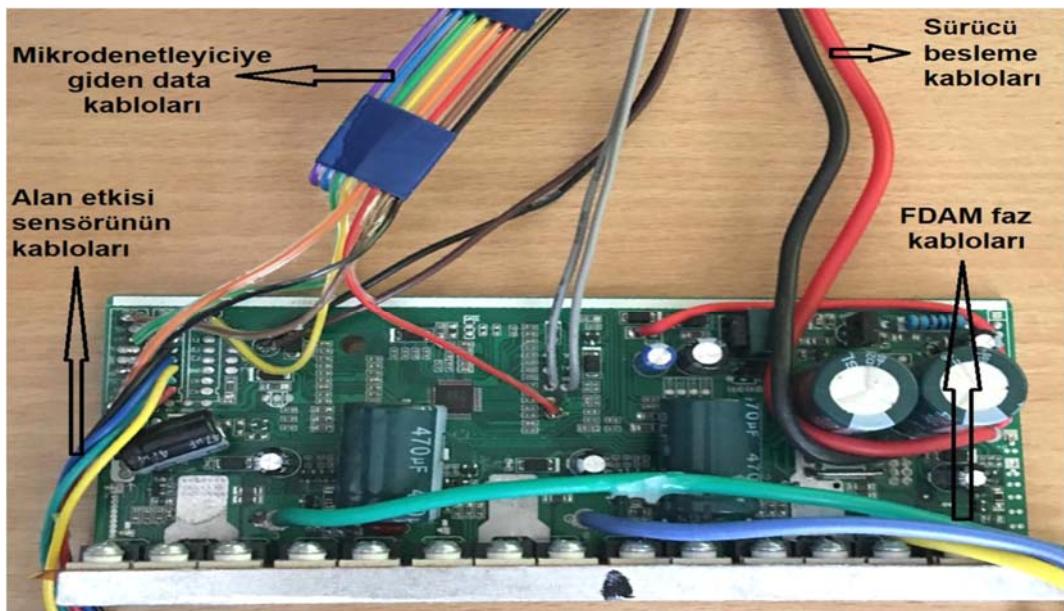
Segway'de kullanılan FDAM'lar, 350 Watt, 400 RPM, dıştan rotorlu, 30 kutup ve 27 slota sahiptir. Motorların sırasıyla doğru fazda tetiklenebilmeleri için Alan Etkisi (hall effect) sensöründen motorun konumu ve hangi fazın tetikleneceği hakkında veriler alınmaktadır. Bu alınan veriler ile fazların doğru sırada tetiklenmesi yapılmaktadır. Fazların doğru tetiklenmemesi motora zarar vermektedir. Şekil 3.17'de tekerlek içerisinde gömülü olan FDAM'un görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.17 Tekerlek içerisinde gömülü FDAM.

3.5.6 FDAM Sürücülerı

FDAM'ları sürmek için K – D 1,5 kart numaralı Wiwi marka 48 V ile 84 V çalışma gerilimi aralığına sahip olan 2 adet motor sürücüsü kullanılmıştır. Sürücüler 1200 W güce ve 40 A akım kapasitesine sahiptir. Şekil 3.18'de motor sürücüsü ve bu sürücü üzerindeki kabloların bilgileri verilmiştir.



Şekil 3.18 Wiwi K – D 1,5 kart numaralı FDAM sürücüsü.

3.5.7 Batarya

Segway'in enerji ihtiyacı 54,8 V, 4300 mAh ve 236 Wh güce sahip batarya bloğu üzerinden sağlanmaktadır. Şekil 3.19'da kullanılan bataryanın görüntüsü verilmiştir.



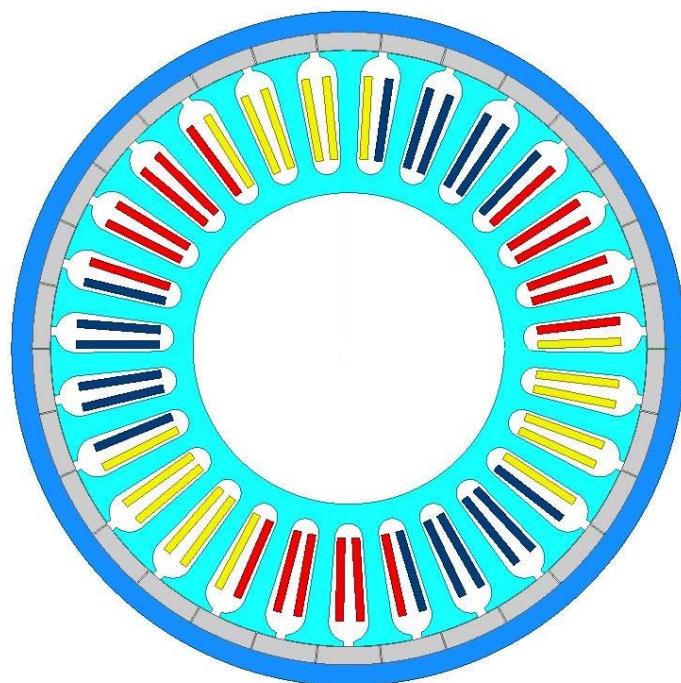
Şekil 3.19 Segway için kullanılan batarya.

4. BULGULAR

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular, motor parametrelerinin çıkarılması, çıkarılan parametrelere göre FDAM'ın simülasyonu, yük hücresi temelli Segway sisteminin simülasyonu ve gerçekleştirilen sistem başlığı altında verilmiştir.

4.1 Motor Parametrelerin Çıkarılması

Maxwell programı, elektromanyetik alandaki problemleri Maxwell denklemlerini kullanarak belirli sınır koşullar altında başlangıç koşullarını dikkate alarak çözen bir paket yazılımdır. Bu çalışmada Maxwell yazılım paketi kullanılarak FDAM'ın simülasyonu için gerekli olan parametreler elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan motorun teknik dokümanlarına ulaşılmadığı için simülasyon için gerekli olan parametreler Maxwell programından elde edilmiştir. Şekil 4.1'de Maxwell programında tasarımlı yapılan FDAM'ın görüntüsü verilmiştir. Bu süreçte ihtiyaç duyulan tasarım parametreleri motor üzerinden kumpas ile ölçülmüştür. Parametrelerin belirlenmesi için gerekli olan fiziksel ölçümler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

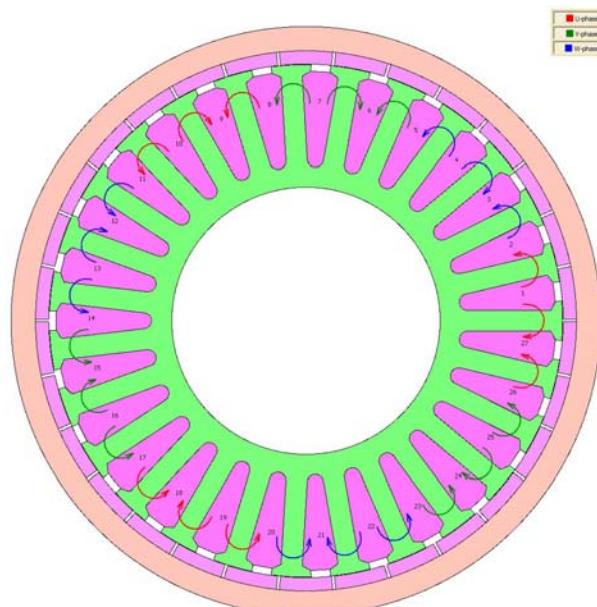


Şekil 4.1 Maxwell programında tasarlanan FDAM'ın tasarımı.

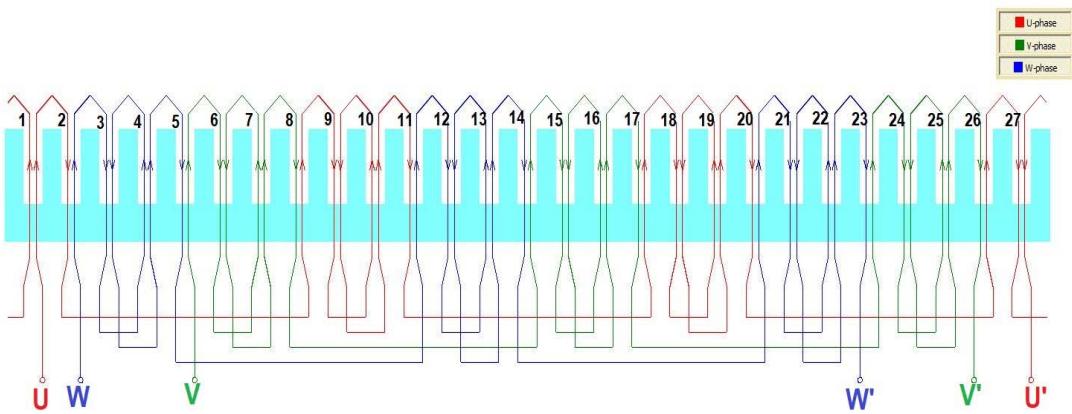
Çizelge 4.1 Maxwell programında kullanılacak olan parametreler.

Parametre	Ölçüm Sonucu
Kutup sayısı	30 Adet
Slot sayısı	27 Adet
Slot türü	1 nolu slot türü
B_{s0}	1,9 mm
B_{s1}	7,82 mm
B_{s2}	5,39 mm
H_{s0}	0,9 mm
H_{s2}	16,3 mm
Sarım sayısı	34 Sarım
Stator iç / dış çapı	60 mm / 114,8 mm
Rotor iç / dış çapı	115 mm / 129,9 mm
Mıknatıs kalınlığı	3,45 mm
Paket uzunluğu	30 mm
Sargı özelliği	Yıldız bağlantı, 6 x 0,511 mm

Yapılan tasarımda kullanılan FDAM'ın faz sıralamalarının kapalı sarım çizimi Şekil 4.2'de açık sarım çizimi ise Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.2 FDAM'ın kapalı sargı üzerinden faz sıralamasının gösterimi.



Şekil 4.3 FDAM’ın açık sargı üzerinden faz sıralamasının gösterimi.

FDAM’ın tasarımının sonucunda Maxwell programı,

- Motor hakkında,
- Stator hakkında,
- Rotor hakkında,
- Mıknatıs hakkında,
- Materyallerin tüketimi hakkında,
- Kararlı durum parametreleri hakkında,
- Yüklü ve yüksüz iken oluşan manyetik alan bilgileri hakkında,
- Sargı bilgileri hakkında,
- Geçici sonlu elemanlar analizi için gerekli giriş parametreleri hakkında bilgiler vermektedir olup bu bilgilerin detayları EK 1’de verilmiştir.

Buradan elde edilen verilerden bazıları FDAM’ın simülasyonun için gereklidir. Çizelge 4.2’de FDAM’ın simülasyonu için gerekli olan parametreler ve bu parametrelerin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Maxwell programından elde edilen FDAM simülasyonu için gerekli olan parametreler.

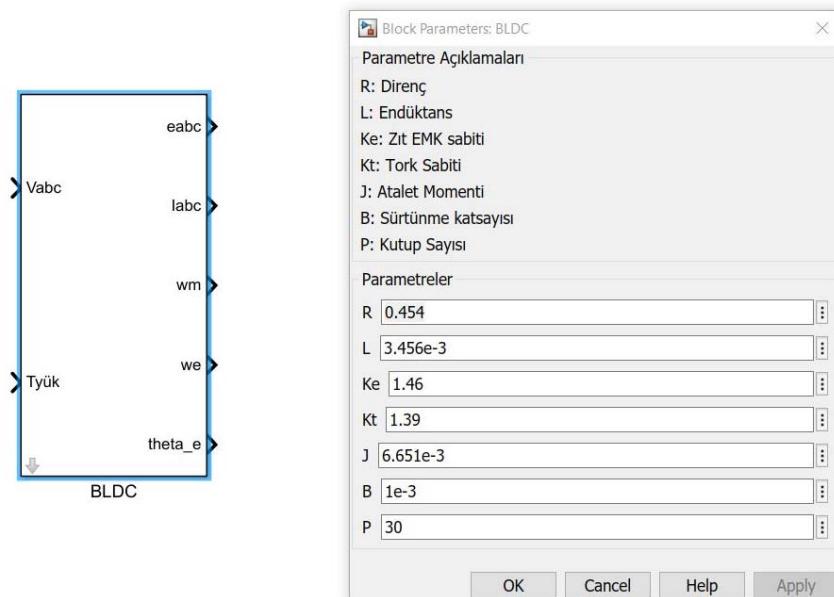
Parametre	Değeri
K_e	1,46 (V_s/rad)
K_t	1,39 (Nm/A)
J	$6,651 \text{ e}^{-3} (kg.m^2)$

Çizelge 4.2 (Devam) Maxwell programından elde edilen FDAM simülasyonu için gerekli olan parametreler

Parametre	Değeri
L	$3,456 \text{ e}^{-3}$ (H)
R_s	$0,454$ (Ω)

4.2. FDAM Simülasyonu

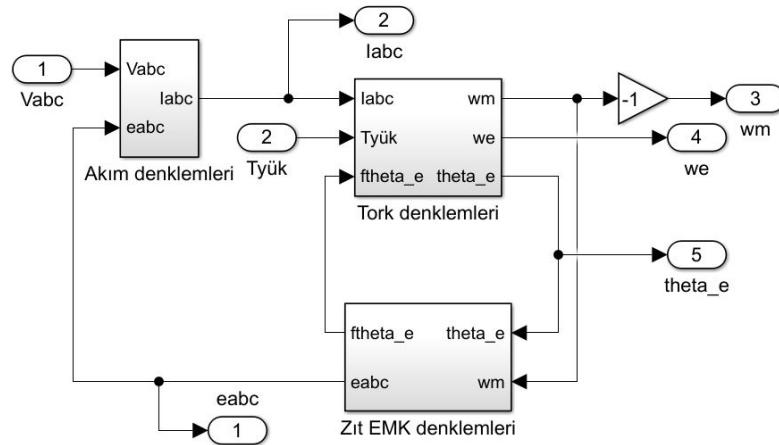
Maxwell programı kullanılarak elde edilen FDAM parametreleri FDAM'ın simülasyonu için kullanılmıştır. FDAM simülasyonu Matlab / Simulink ortamında yapılmıştır. Simülasyonun yapılabilmesi için gerekli olan matematiksel model “3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Matematiksel Modellemesi” başlığı altında verilmiştir. Matematiksel modellemede ihtiyaç duyulan ancak herhangi bir motor teknik bilgisi olmadığı için bilinmeyen parametreler Maxwell programı sayesinde elde edilmiş olup Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu parametreler Şekil 4.4'te görülen FDAM'ın parametre giriş penceresinde girilmiştir.



Şekil 4.4 FDAM genel blok görüntüsü ve parametre giriş penceresi.

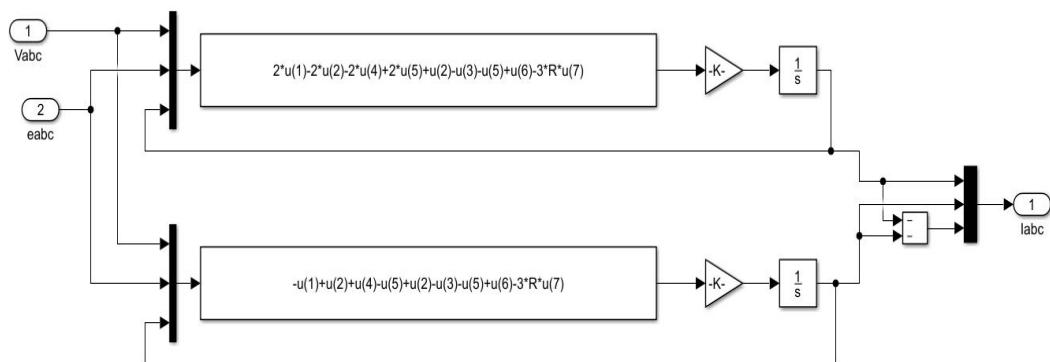
Genel blok diyagramından da görüldüğü üzere FDAM'ın simülasyonunda faz voltajları (V_a , V_b , V_c) ve yük torku ($T_{yük}$) giriş olarak verilmektedir. Zıt EMK gerilimleri (e_a , e_b , e_c), faz akımları (I_a , I_b , I_c), mekaniksel hız (w_m), elektriksel hız (w_e), ve elektriksel

açı (θ_e) ise çıkış olarak alınmaktadır. Parametre giriş penceresinde simülasyonun matematiksel formülünde gerekli olan FDAM parametrelerinin giriş'i yapılmaktadır. FDAM'ın genel bloğunun içerisinde olan akım denklemlerinin, tork denklemlerinin ve zıt EMK denklemlerinin olduğu blokların gösterimleri Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Akım, tork ve zıt EMK denklemlerinin olduğu blok görüntüsü.

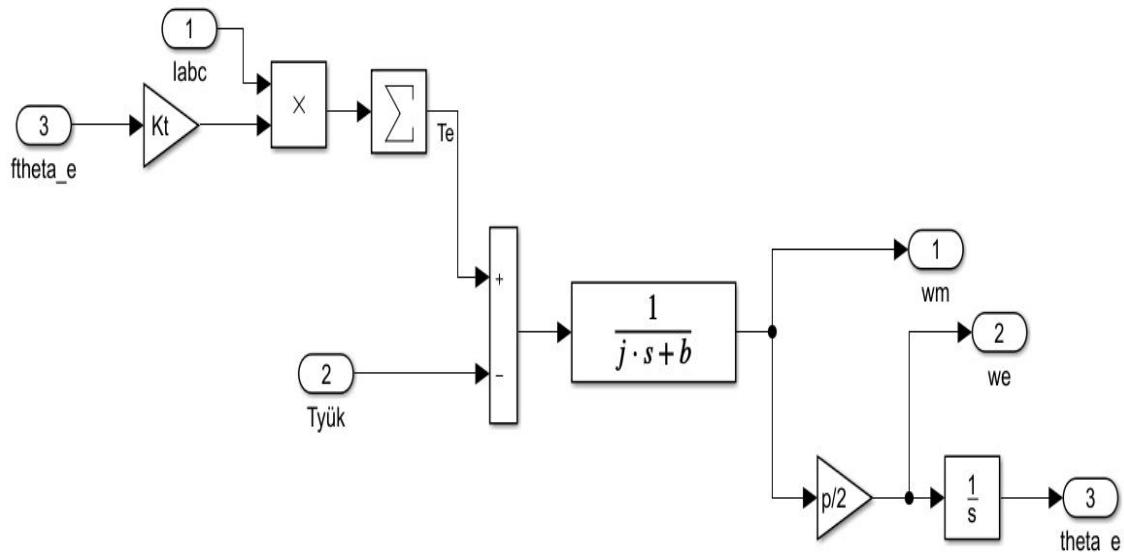
Akım denklemleri bloğuna faz voltajları (V_a , V_b , V_c) ve zıt EMK gerilimleri (e_a , e_b , e_c) giriş olarak verilmekte olup çıkış olarak faz akımları (I_a , I_b , I_c) elde edilmektedir. Şekil 4.6'da akım denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü verilmiştir. Bu blokta yapılan matematiksel işlemler Denklem 3.16 – 3.18 arasında verilen denklemlerdir.



Şekil 4.6 Akım denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü.

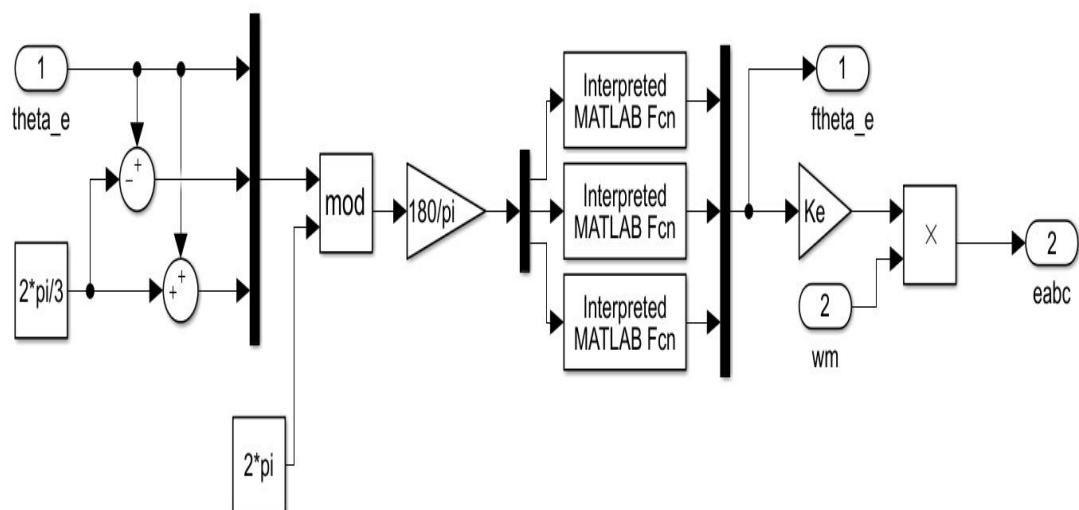
Tork denklemleri bloğuna faz akımları (I_a , I_b , I_c), yük torku ($T_{yük}$) ve elektriksel açının fonksiyonu ($f(\theta_e)$) giriş olarak verilmekte olup mekaniksel hız (w_m), elektriksel hız

(w_e), ve elektriksel açı (θ_e) çıkış olarak elde edilmektedir. Tork denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu blokta yapılan matematiksel işlemler Denklem 3.8 – 3.13 arasında verilmiştir.



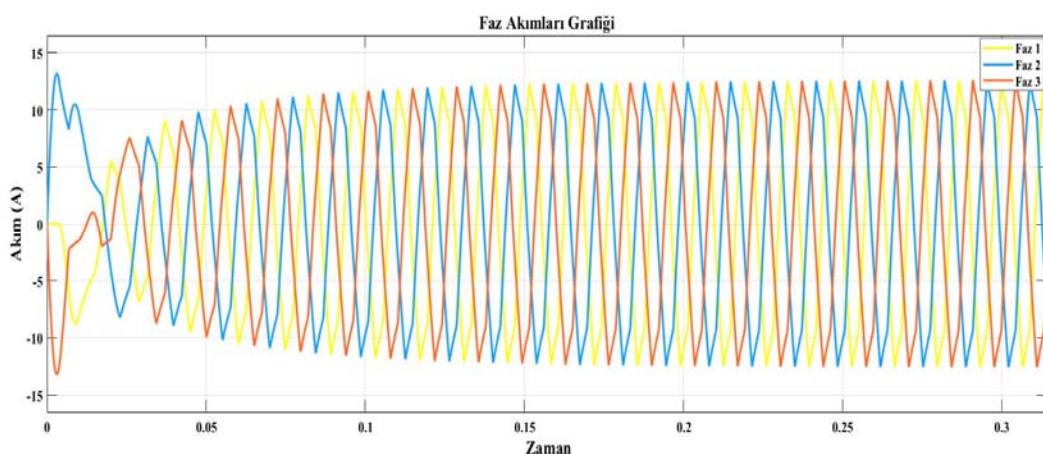
Şekil 4.7 Tork denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü.

Zıt EMK denklemleri bloğuna elektriksel açı (θ_e) ve mekaniksel hız (w_m) giriş olarak verilmekte olup çıkışında zıt EMK gerilimlerini (e_a , e_b , e_c) ve elektriksel açının fonksiyonunu ($f(\theta_e)$) elde edilmektedir. Zıt EMK denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü Şekil 4.8'de verilmiştir.

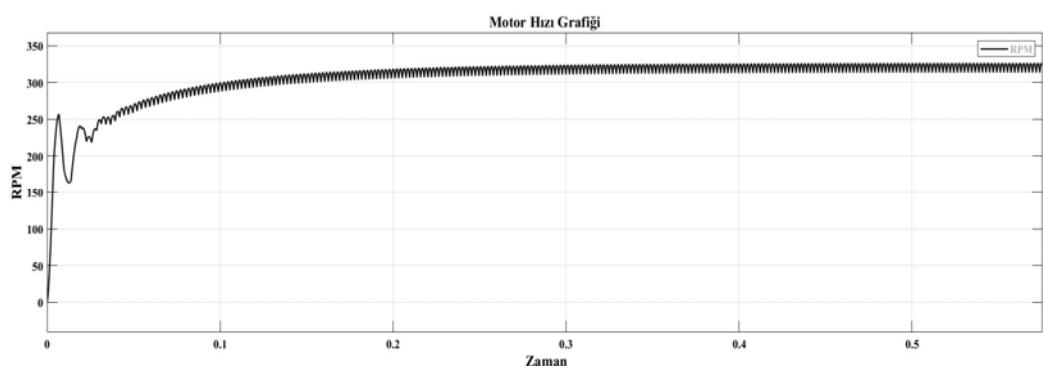


Şekil 4.8 Zıt EMK denklemleri bloğunun detaylı görüntüsü.

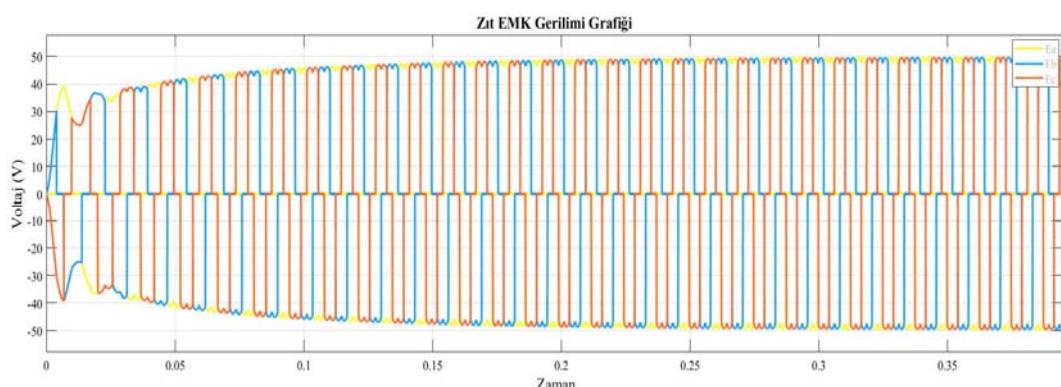
Zıt EMK denklemlerinde kullanılan Matlab fonksiyonu EK 2'de verilmiştir. FDAM'ın simülasyonu bu şekilde tamamlanmıştır. Tam yükte sistem çıkışında bulunan faz akımları grafiği Şekil 4.9'da, mekaniksel motor hızı Şekil 4.10'da ve zıt EMK gerilim değerleri grafiği ise Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.9 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın faz akımları grafiği.



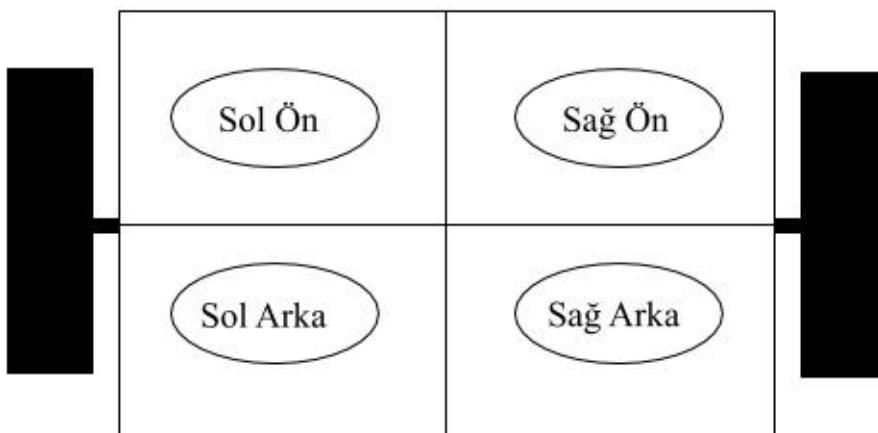
Şekil 4.10 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın mekaniksel hız grafiği.



Şekil 4.11 Simülasyon ortamında tam yükte FDAM'ın zıt EMK gerilim grafiği.

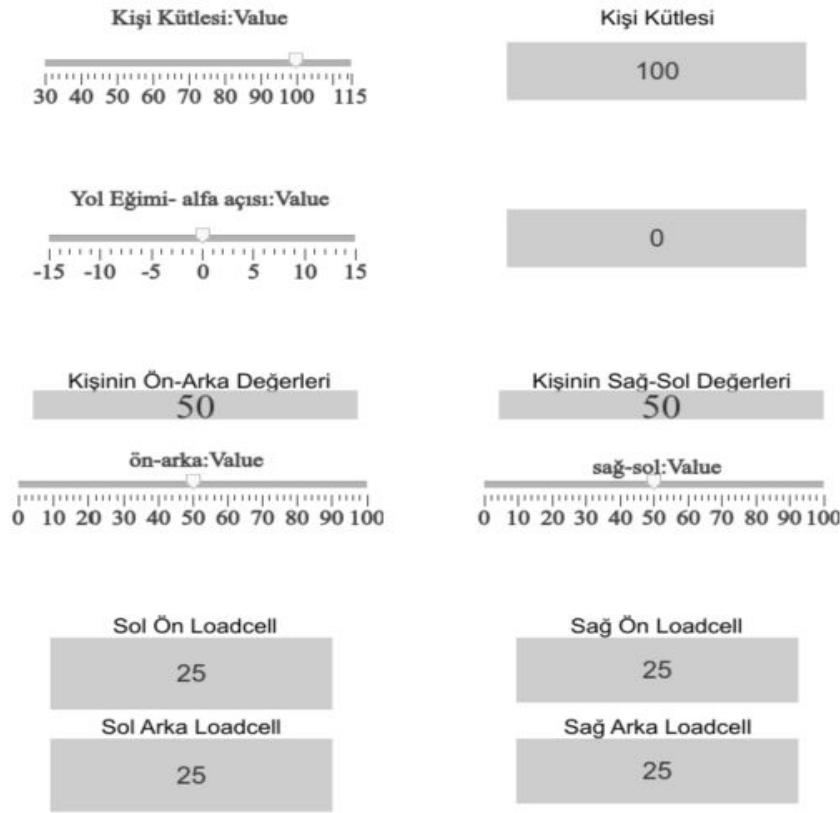
4.3. Yük Hücresi Temelli Segway Sisteminin Simülasyonu

Bu bölümde Segway sisteminden ve sistemin modellemesi açıklanmaktadır. Sistemin kontrolünde yük hücreleri kullanılmıştır. Toplamda 4 adet yük hücresi kullanılmış olup konumlandırması Şekil 4.12'de gösterildiği üzere sağ ön, sağ arka, sol ön ve sol arka olmak üzere yerleştirilmiştir.



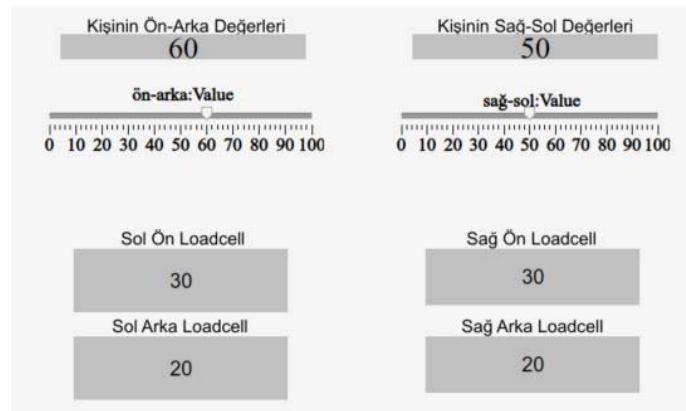
Şekil 4.12 Yük hücrelerinin Segway üzerindeki yerleşimleri.

Segway üzerindeki 4 adet yük hücresi sistemin kontrolünü sağlamaktadır. Ön taraftaki yük hücreleri arka taraftaki yük hücrelerinden daha fazla yüze maruz kaldığında Segway'in öne doğru hareket etmesi ve tersi durumda ise arkaya doğru hareket etmesi sağlanacaktır. Aynı şekilde sistemin sağ tarafında bulunan yük hücreleri sol tarafta bulunan yük hücrelerinden fazla olduğunda Segway'in sağa doğru yönelimi ve tersi durumlarda ise sola yönelimi sağlanacaktır. Simülasyon üzerinde kullanıcıının kütlesinin dağılımı slidebar ile yapılmış olup Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Yapılan simülasyonda kullanıcı kütlesi minimum 30 kg ve maksimum 115 kg olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi ilk başta sisteme kişinin kütle bilgisi girilmektedir. Kişi kütlesi girildikten sonra toplam kütlenin 4 yük hücresine dağılımı yapılmaktadır. Bu dağılım yapılırken öncelikle kişinin ön ve arka yük dağılım değerlerine bakılmaktadır.



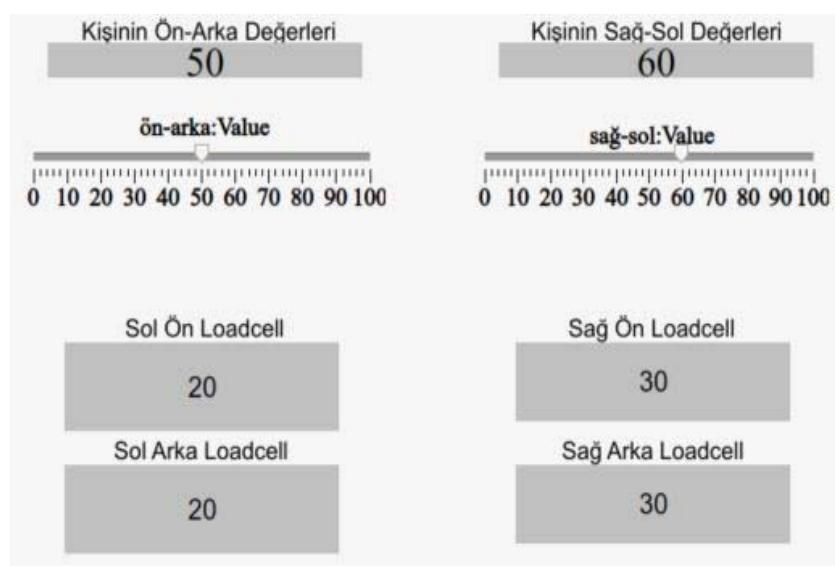
Şekil 4.13 Segway üzerindeki kullanıcı kütlesi ve yük hücrelerine kütlelerin dağılımı.

Kişinin ön ve arka değerlerinin olduğu slidebar 50'de duruyor ise kişi öne ve arkaya aynı oranda yüklendiği anlamına gelir. Yani kişinin ön kütlesi ve arka kütlesi toplamı birbirine eşittir. Eğer slidebardaki değer 60 olursa kişi kütlesinin %60'lık kısmı öndeği yük hücrelerine geri kalan %40'luk kütlesi de arkadaki yük hücrelerine vermektedir. Şekil 4.14'te kişinin %60'lık kütlesinin öne verildiği gösterilmektedir.



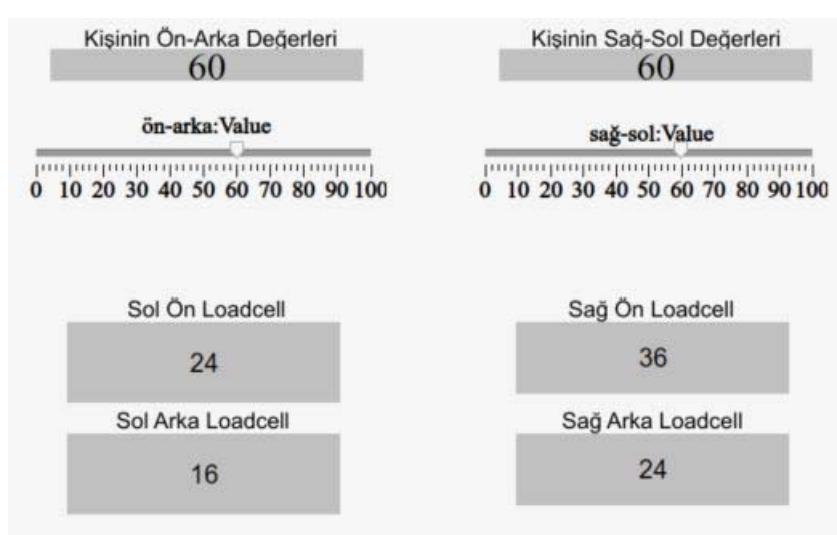
Şekil 4.14 Kütlesinin %60'ı öndeği yük hücrelerine olan 100 kg'lık kullanıcı verisi.

Yük hücrelerinin ön ve arka dağılımı tamamlandıktan sonra sağ ve sol taraftaki yük dağılımları yapılmaktadır. Aynı mantıkta çalışan sistemde, kişinin sağ ve sol değerleri sliderbar değerinin 50'de durması sağ ve sol yük dağılımlarının eşit olduğunu göstermektedir. Eğer sliderbarın değerini 60 yaparsak kişi kütlesinin %60'ı sağ yük hücrelerine geri kalan %40'ı da sol yük hücrelerine dağılımı yapılmaktadır. Şekil 4.15'te kişinin %60'luk kütlesinin sağa verildiği gösterilmektedir.



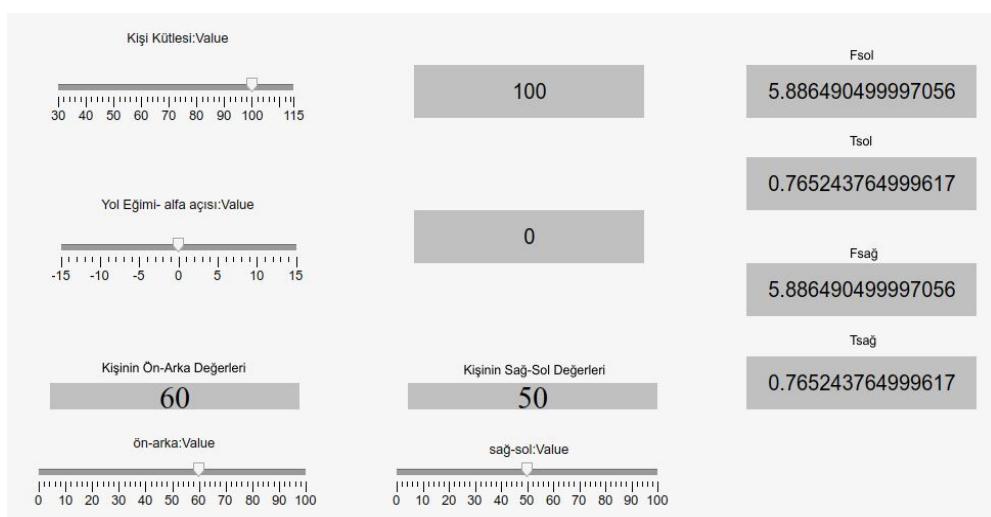
Şekil 4.15 Kütlesinin %60'ı sağdaki yük hücrelerine olan 100 kg'luk kullanıcı verisi.

Şekil 4.16'da kişinin %60'luk kütlesinin öne ve sağa verdiği dağılım gösterilmiştir.



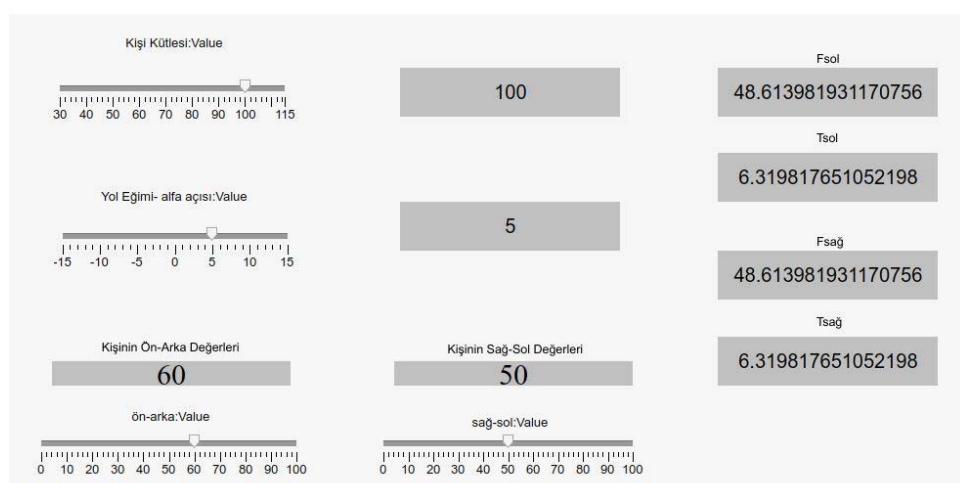
Şekil 4.16 Kütlesinin %60'ını öne ve %60'ını sağa veren kişinin kütlesinin yük hücrelerine olan dağılımı.

Tasarlanan Segway sisteminin motor hızları da bu şekilde ayarlanmıştır. Segway'lerin düz zeminde hareket etmeleri motor açısından kolaydır. Üretmeleri gereken tork değeri küçüktür. Ancak işin içine yokuş girdiği zaman yokuş direncinden kaynaklı olarak sistemin üretmesi gereken tork değeri çok yükselmektedir. Oluşturulan sistemde yol eğimi slidebarı yapılmış olup bu eğime göre oluşturulan torklar değişmektedir. Şekil 4.17'de kişi kütlesinin %60'ını öne verdiği durumda ve düz yolda motorların ürettiği tork bilgileri gösterilmiştir.



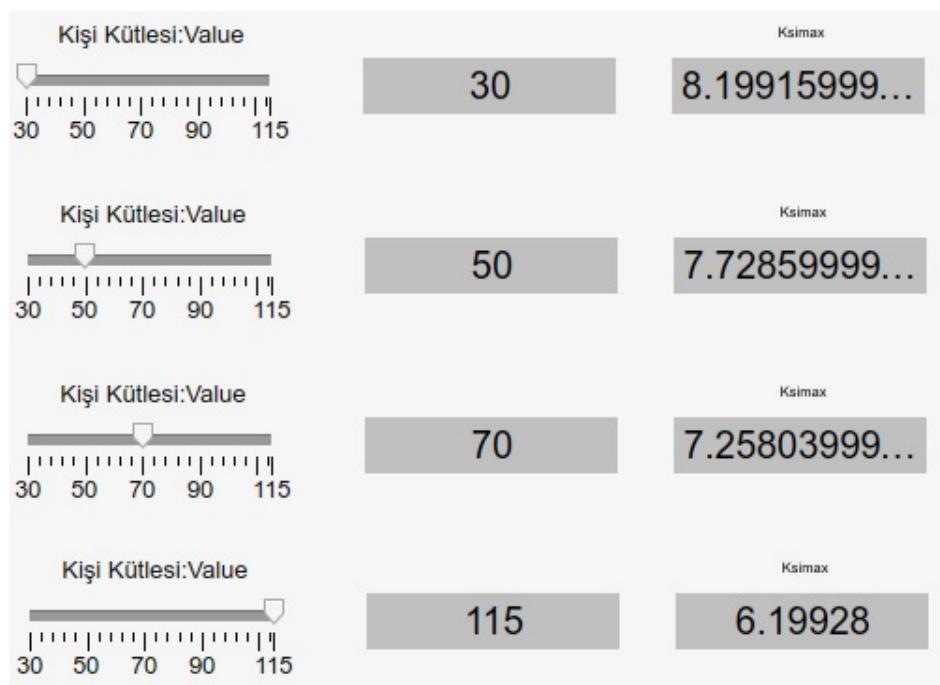
Şekil 4.17 Kütlesinin %60'ını öne ve yokuş açısı 0 derece iken üretilen kuvvet ve torklar.

Şekil 4.18'de ise kişi kütlesinin yine %60'ını öne verdiğiinde ve %5'lük bir yol eğimi olduğu yolda üretmiş olduğu tork bilgileri gösterilmiştir.



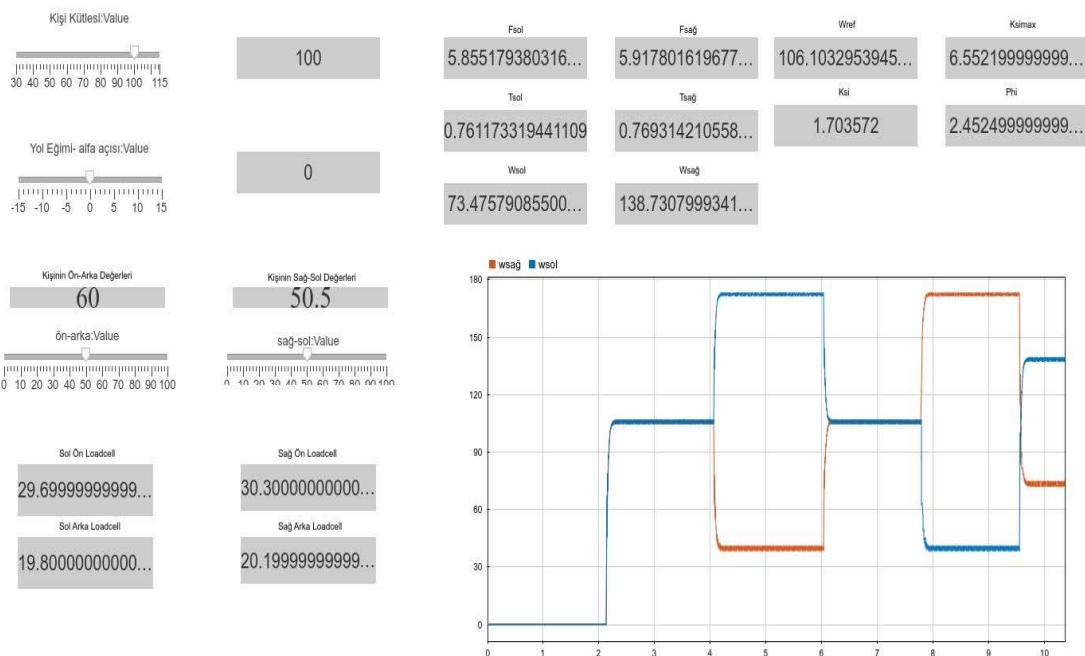
Şekil 4.18 Kütlesinin %60'ını öne ve yokuş açısı 5 derece iken üretilen kuvvet ve torklar.

Görüldüğü üzere Segway sistemi düz yolda giderken gereken kuvvet ve torklar çok düşük iken 5 derecelik eğimli bir yolda ilerlemeye başladığında gereken kuvvet ve torklar ciddi oranda yükselmiştir. Burada en büyük etken yokuş direncinin ilerleyicinin ters yönünde bir kuvvet oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.19'da Segway sistemini kullanan kişi kütlesinin değişimine göre maksimum yunuslama açısının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Kullanıcı kütlesine göre değişim gösteren maksimum yunuslama açısı.

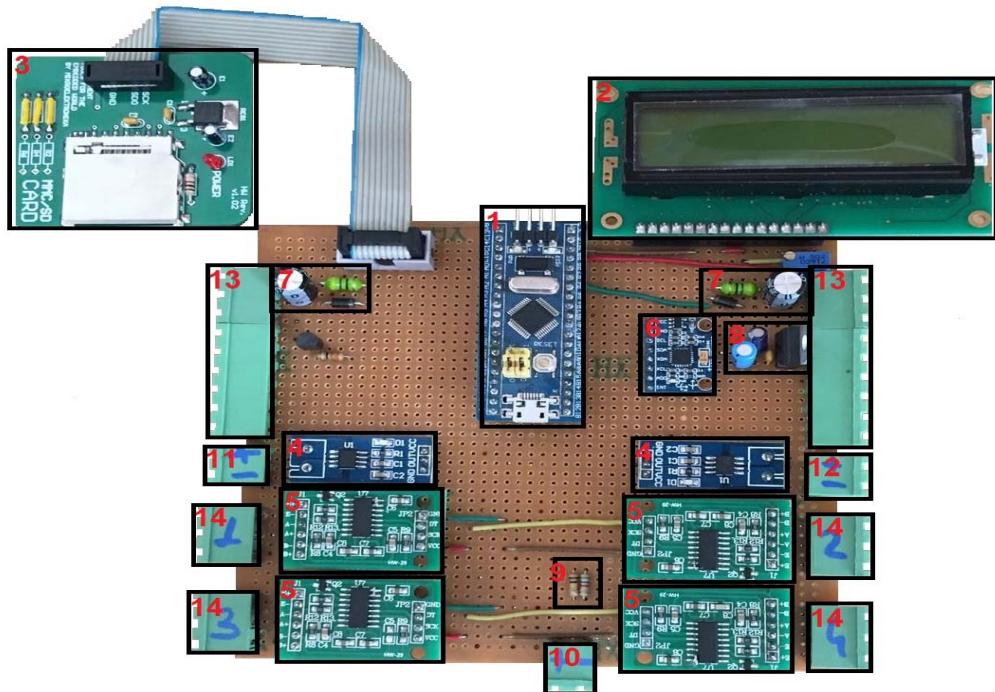
Şekil 4.20'de Segway simülasyon ekranının genel görüntüsü verilmiştir. Yapılan Segway simülasyonunda farklı hızlarda sistemin çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiş ve rpm-zaman grafiği verilmiştir. Genel ekran görüntüsündeki grafiğe bakıldığından sistem çalıştırıldığında ilk iki saniye sabit kalmış sonrasında 106 RPM hızı çıkmıştır. 106 RPM hızda iki saniye düz gitmiş ardından kişi sağ tarafa daha çok yüklenerek sistemin sağ tarafa doğru yönelmesini istemiştir. Bu sebeple sol motor hızı sağ motor hızından daha yüksek olmuş ve sistem sağ tarafa doğru yönelmiştir. Yaklaşık olarak altıncı saniyede düz gitmeye başlayan sistem sekizinci saniyede tersi işlem yaparak sola doğru yönelmiştir.



Şekil 4.20 Segway simülasyon ekranının genel görüntüsü.

4.4. Gerçekleştirilen Sistem

Bu tez çalışmasında, MikroC program ara yüzünde ARM mimarisine sahip olan STM32F103C8T6 model bir mikrodenetleyici kullanılarak Segway'in yazılımı tasarlanmıştır. Sistemin blok diyagramındaki donanımların akış diyagramına uygun olarak çalışması amaçlanmış olup gerekli donanımlar birleştirilerek kontrol kartı oluşturulmuştur. Kontrol kartı Şekil 4.21'de verilmiştir. Kullanılan modüllerin tanıtımı Çizelge 4.3'te verilmiştir. Sisteme enerji verildiğinde Segway öncelikle çoklu sensör kartı üzerinden verileri alarak dik konumda olacak şekilde kendisini dengelemektedir. Herhangi bir kullanıcı tarafından yük hücrelerine baskı yapıldığında tasarlanmış algoritmaya göre motor sürücülerini tetiklemekte ve motorların sürülmeye işlemi gerçekleşmektedir. Ancak olası hataları engellemek adına kullanıcı Segway üzerine bineceği esnada Segway'in hareket etmesini engellemek için kullanıcının 4 yük hücresine de baskı yapması gerekmektedir.

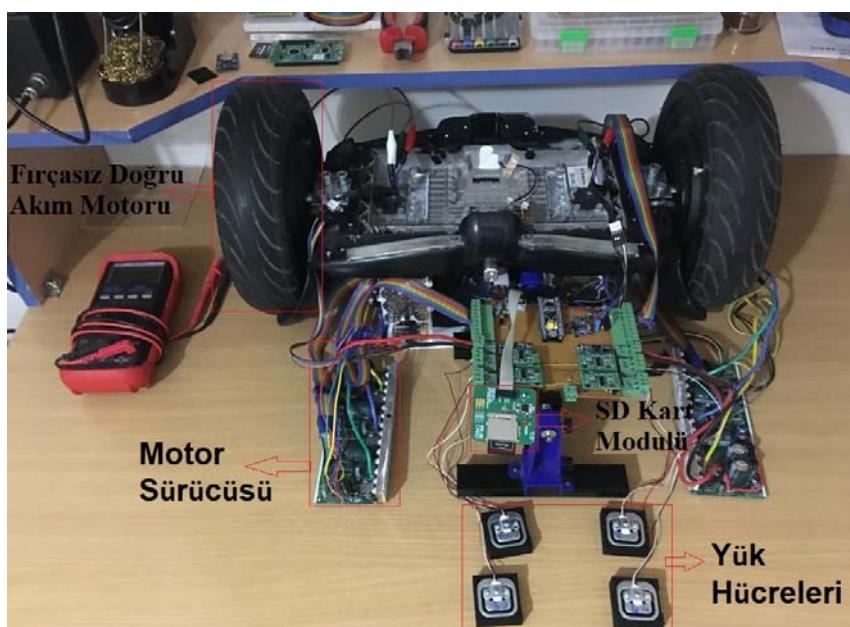


Sekil 4.21 Tasarlanan Segway sisteminin kontrol kartı.

Çizelge 4.3 Kontrol kartı üzerindeki modüllerin/soketlerin tanıtımı.

Numara	Açıklama
1	STM32F103C8T6 Mikrodenetleyici
2	2x16 LCD ekran
3	SD kart okuyucu modülü
4	ACS712-30 A akım modülü
5	HX711 Modülü
6	MPU5060 IMU
7	PWM'ler için doğrultucu LC devresi
8	5V Voltaj regülatörü
9	Batarya seviye kontrol ünitesi
10	Ana enerji girişi
11	Sol motor sürücü besleme soketi
12	Sağ motor sürücü besleme soketi
13	Motor sürücülere giden soketler
14	Yük hücresi soketleri

Eğer 4 yük hücresine de baskı yapılmamışsa motor sürücülerini kontrol kartı tarafından tetiklenmemektedir. Kullanılan mikro denetleyicinin ADC çözünürlüğü 12 bittir. Segway'in kullanım hassasiyeti, hayatı bir öneme sahip olduğu için 24 bitlik bir ADC çözünürlüğe sahip HX711 modülü kullanılmıştır. Böylelikle sistemin daha hassas kontrol edilmesi sağlanmıştır. Yük hücresi temelli Segway sisteminin görüntüsü Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22 Gerçekleştirilen Sistem.

Sistem verilerini anlık olarak takip edilmesi için kontrol kartı üzerinde bulunan LCD ekrana istenilen bilgiler yazdırılmaktadır. Aynı şekilde Segway kullanımı bittiğten sonra bu veriler üzerinde herhangi bir inceleme yapılabilmesi için veriler, SD kart modülü ile kayıt altına alınmaktadır. SD karta kayıt altına alınan veriler ilk veriden son veriye doğru aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Yük hücresi 1'den gelen veri, Yük Hücresi 2'den gelen veri, Yük hücresi 3'ten gelen veri, Yük hücresi 4'ten gelen veri,
- Sol motorun anlık hızı, Sağ motorun anlık hızı,
- Sol motorun çektığı akım, Sağ motorun çektiği akım,
- Jiroskop'un x ekseni, Jiroskop'un y ekseni, Jiroskop'un z ekseni,
- Batarya voltaj gerilimi olmak üzere 12 farklı veri kaydı yapılmaktadır.

Yük hücrelerinin üzerine uygulanan ağırlığı doğru bir şekilde ölçüp ölçümedikleri Shimpo marka FGJN – 50 model kuvvet ölçer cihazı ile test edilmiştir. 8.3 kg kütlesindeki sabit yük kullanılarak her bir yük hücresi için 10 saniye aralıklarla 20 adet ölçüm alınmış ve bu ölçüm sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Sol ön bölümde bulunan yük hücresi 1'de ± 300 g sapma, sağ ön bölümde bulunan yük hücresi 2'de ± 100 g sapma, sol arka bölümde bulunan yük hücresi 3'te ± 200 g sapma ve sağ arka bölümde bulunan yük hücresi 4'te de ± 200 g sapma ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerin tekrarlama testi süresince tutarlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4 10 saniye aralıklarla ölçülen yük hücresi ölçüm değerleri.

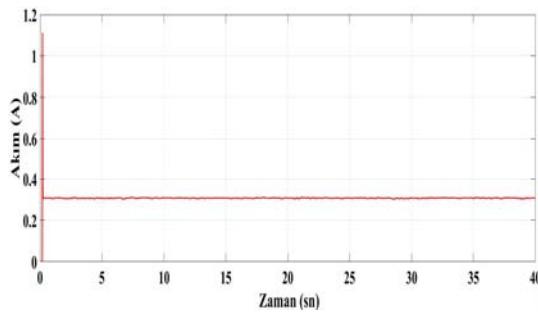
Örnek Sayısı	Referans Kg	Yük Hücresi 1	Yük Hücresi 2	Yük Hücresi 3	Yük Hücresi 4
1	8,30	8,20	8,40	8,50	8,20
2	8,30	8,20	8,40	8,50	8,30
3	8,30	8,50	8,30	8,40	8,10
4	8,30	8,60	8,30	8,40	8,10
5	8,30	8,20	8,30	8,40	8,10
6	8,30	8,10	8,30	8,40	8,40
7	8,30	8,30	8,40	8,40	8,40
8	8,30	8,10	8,30	8,40	8,40
9	8,30	8,30	8,40	8,40	8,10
10	8,30	8,40	8,40	8,40	8,30
11	8,30	8,20	8,30	8,30	8,20
12	8,30	8,20	8,30	8,30	8,20
13	8,30	8,20	8,40	8,40	8,30
14	8,30	8,30	8,50	8,30	8,30
15	8,30	8,20	8,40	8,40	8,30
16	8,30	8,20	8,40	8,30	8,40
17	8,30	8,30	8,40	8,20	8,30
18	8,30	8,20	8,30	8,30	8,40
19	8,30	8,30	8,30	8,40	8,50
20	8,30	8,30	8,20	8,30	8,30

Yük hücrelerinin farklı ağırlık değerlerindeki ölçüm performansı Shimpo marka FGJN – 50 model cihaz ile test edilmiştir. Her bir yük hücresine sırasıyla 5kg'dan 40kg'a kadar 5kg artışlarla yük uygulanmış ve her bir ölçüm arasında 10s zaman verilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.5'te görülmektedir. Yapılan ölçüm sonuçları irdelendiğinde yük hücresi 1'de ± 430 g sapma ve verilen yük ile ölçülen yük arasındaki korelasyon ise 0,99 bulunmuştur. Yük hücresi 2'de ± 330 g sapma ve verilen yük ile ölçülen yük arasındaki korelasyon ise 0,99 bulunmuştur. Yük hücresi 3'de ± 650 g sapma ve verilen yük ile ölçülen yük arasındaki korelasyon ise 0,99 bulunmuştur. Yük hücresi 4'de ± 410 g sapma ve verilen yük ile ölçülen yük arasındaki korelasyon ise 0,99 bulunmuştur. Elde edilen ölçümler gerçekleştirilen sistemin yük hücrelerinden gelen verileri doğru bir şekilde ölcerek sisteme aktarabildiğini göstermektedir.

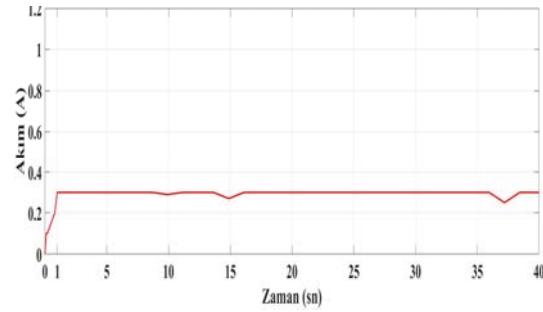
Çizelge 4.5 Farklı kütleyeler referans alınarak ölçülen yük hücresi ölçüm değerleri.

Örnek Sayısı	Referans Kg	Yük Hücresi 1	Yük Hücresi 2	Yük Hücresi 3	Yük Hücresi 4
1	5,00	5,10	4,90	4,90	5,00
2	10,00	10,11	10,18	10,15	10,03
3	15,00	15,29	15,33	14,98	15,30
4	20,00	20,40	20,12	20,05	19,96
5	25,00	25,43	25,26	25,02	25,07
6	30,00	29,96	29,98	30,30	30,16
7	35,00	35,42	35,19	34,8	35,22
8	40,00	40,31	39,71	40,65	40,41

Gerçekleştirilen sistem güvenlik önlemleri dikkate alınarak boş yükte çalıştırılmıştır. Simülasyon ile gerçekleştirilen sistemin karşılaştırması yapılabilmesi için simülasyonda da kayıp kuvvetlerini karşılaşacak şekilde kuvvet oluşturulması sağlanarak simülasyonun da boş yükte çalıştırılması gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda ve gerçekleştirilen uygulamada sol FDAM'ın çektiği akım grafikleri sırasıyla Şekil 4.23 'te verilmiştir.



a) Simülasyondan alınan



b) Gerçekleştirilen sistemden alınan

Şekil 4.23 FDAM akım bilgisi.

Gerçekleştirilen sisteme 100 kg kütleli bir kullanıcı tarafından çeşitli yüzdelerde kütlesini ön tarafa verdiğinde FDAM'ların hızlarındaki değişimler TT T-ECHNI-C marka DT6236B model dijital takometre ile ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde ön – arka yük dağılımı eşit olduğunda motorlar durmaktadır. Ön yük hücrelerdeki kütlelerin arka yük hücrelerdeki kütlelere oranına göre motor dönüş hızları da değişmektedir. Her bir %1'lik yük farkı için motorlarda ortalama 7.5RPM'lık dönüş hızı sağlanmaktadır.

Çizelge 4.6 100 kg kütleli bir kullanıcı tarafından çeşitli yüzdelerde kütlesini ön tarafa verdiğinde 115 RPM de çalışan FDAM'ların hızlarındaki değişimler.

Kişi Külesi	Ön Yük Hücreleri Yüzdesi	Arka Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Motor Hızı (RPM)	Sol Motor Hızı (RPM)
100 kg	50	50	0	0
100 kg	55	45	149,5	149,8
100 kg	58	42	194,9	195,8
100 kg	63	37	274,9	275,1
100 kg	67	33	346,7	347,0
100 kg	70	30	408,1	409,0

Çizelge 4.7'de ise kütlesinin yüzde altısını öne veren bir kullanıcının sağ ve sol taraftaki yük hücrelerine uyguladığı baskıyla göre sağ ve sol motorların dönüş hızları verilmiştir.

Çizelge 4.7 100 kg kütleli kullanıcının %60 kütlesini ön tarafa verirken sağ ve sol yük hücrelerine uyguladığı baskıya göre sağ ve sol motorların dönüş hızları.

Kişi Kütlesi	Ön Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Yük Hücreleri Yüzdesi	Sol Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Motor Hızı (RPM)	Sol Motor Hızı (RPM)
100 kg	60	50	50	219,5	219,7
100 kg	60	52	48	219,5	221,2
100 kg	60	55	45	219,5	225,0
100 kg	60	57	43	219,5	228,6
100 kg	60	60	40	219,5	231,2
100 kg	60	65	35	219,5	240,0

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu alanda literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle sistemlerin simülasyonu üzerine odaklandığı görülmektedir. Sistemin kontrolünde çoğunlukla jiroskop ve ivmeölçer sensör kullanılmaktadır (Küçük 2010, Önkol 2018, Çelik 2018, Polat 2018, Jeong ve Takahashi 2007, Butler ve Bright 2008 Sasaki vd. 2005). Yapılan bu çalışma da ise literatürdeki çalışmalarda kullanılan sensörden farklı olan yük hücresi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yük hücresi temelli Segway'in matematiksel modellenmesi, simülasyonu ve gerçek zamanlı uygulaması yapılmıştır. Kullanıcının kütle bilgisine göre Segway'i kullanacak olan kişiye özgü yunuslama açısına göre sistemin kontrolü sağlanmaktadır. Böylelikle kullanıcının maksimum yunuslama açısını geçmeyecek şekilde motorları sürmesi sağlanarak kullanıcının araçtan düşme tehlikesi azaltılmıştır. Sistemin algoritması tasarlarken kullanıcının Segway üzerine binerken oluşabilecek kazaları engellemek için dört yük hücresine baskı uygulamadan motorların tetiklenmesi engellenmektedir. Böylelikle kullanıcı Segway üzerine biniş esnasında motorlar aktif olup kullanıcıyı düşürme tehlikesi azaltılmıştır. Bu uygulama da direksiyon açısı yük hücrelerine oluşturulan baskı ile çıkarılmakta olup ekstradan direksiyon açısını kontrol edebilmek için herhangi bir donanıma ihtiyaç yoktur.

Yapılan sistemin literatürdeki sistemlere göre avantajları aşağıda verilmiştir.

- Yük hücresi temelli olduğu için sistemin anlık olarak dinamik modeli güncellenebilmektedir.
- Sistemde direksiyon açısı için ekstradan herhangi bir donanım kullanmadan yük hücrelerinde oluşan ağırlık oranlarıyla direksiyon açısı çıkarılabilmektedir.
- Her bir yük hücresine baskı yapılmadan motorların tetiklenmeleri engellenerek kullanıcının araçtan düşme tehlikesi azaltılmıştır.
- 24 bitlik ADC kullanarak sistemin hassasiyeti artırılmıştır.
- 12 adet farklı veri SD kart üzerine kayıt edilmekte olup bu veriler üzerinde aracın kullanımı sonrası inceleme yapılabilmektedir.

Bu araştırma sonucunda karşılaşılan problemlerden biri motor sürücülerinin hazır

kullanılmasıdır. Sistemin daha stabil ve daha hızlı bir şekilde tepki verebilmesi için gerekli tepki süresi kullanılan motor sürücüsünde yeterli değildir. Tepki süresinin son derece önemli olduğu bu gibi uygulamalarda sisteme hâkim olabilmek için motor sürücüsünün de tasarlanması avantaj sağlayacaktır. İlerleyen çalışmalarda sistemin daha iyi çalışması için yapılabilecek bazı iyileştirmeler aşağıda önerilmiştir.

- Sistemin motor sürücülerinin tepki süresi önemli olduğu için motor sürücülerinin hazır kullanılması yerine ihtiyaca göre tasarlanması,
- Sistemin daha stabil çalışabilmesi için donanımlardan gelen verilerin kalman vb. filtrelerden geçirilmesi,
- Sistem kullanımı esnasında verilerin gösterileceği bir uygulama (telefon veya bilgisayar) yapılarak verilerin anlık izlenmesi.

Sonuç olarak ister ulaşım aracı isterse otonom olarak görev yapan robotların (yük indirme, kaldırma) ağırlık merkezlerinin korunması gerekmektedir. Önerilen yük hücresi temelli Segway kontrolü jiroskop ve ivme sensörlerine alternatif olabileceği düşünülmektedir. Böylece oluşabilecek olan hataların düşürebileceği öngörmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Altun Y, 2008, Hiyerarşik Kayan Kip Kontrolün Ters Sarkaç Sistemlerine Uygulanması, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Balıkesir.
- Aydoğdu Ö, Bayer M, 2008, PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı, Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya.
- Bayraktar H C, 2014, Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seminer Tezi, 79s, İstanbul.
- Becker A T, 2008, Mobile Robot Motion-Planning Using Wireless Signals for Localization, Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Electrical and Computer Engineering, Master of Science, USA.
- Burkert M, Groll T, Lai T, McCoy T, Smith D, 2004, Segway Design Project, Project Report, Grand Valley State University the Padnos School of Engineering, USA.
- Burdette S, 2007, A Zilog ZNEO based Self-Balancing Robot with PID Control, Project Report, The George Washington University, USA.
- Butler L J, Bright G, 2008, Feedback Control of a Self-balancing Materials Handling Robot, 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, 274-278,
- Charles E, Forrest Jr, 2006, A Neural Network Control System for the Segway Robotic Mobility Platform, North Carolina State University, Thesis of Master.
- Chee Y O, Abidin M S Z, 2006, Design and Development of Two Wheeled Autonomous Balancing Robot, Student Conference on Research and Development, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 169-172.
- Chi G, Hausbach J, Hunter B, 2005, Segbot, Senior Design Project, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Chiu C H, Peng Y F, 2006, Design and Implement of the Self-Dynamic Controller for Two-Wheel Transporter, 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vancouver, BC, Canada, 480-483.

- Celik Y, 2018, Nesne Takibi Yapan Denge Robot Tasarımı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86s, Kahramanmaraş.
- Ding F, Huang J, Wang Y, Matsuno T, Fukuda T, Sekiyama K, 2010, Modeling and control of a novel narrow vehicle, Robotics and Biometrics (ROBIO), 2010 IEEE International Conference, 1130-1135.
- Ertuğrul İ, 2015, Bir Ters Sarkaç Sisteminde Kullanılan Genel Kontrol Algoritmalarının Karşılaştırılması, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, İstanbul.
- Goher K M, Tokhi M O, 2010, Development, Modeling and Control of a Novel Design of Two-Wheeled Machines, Cyber Journals Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC), December Edition.
- Gong Y, Hartley R, Da X, Hereid A, Harib O, Huang J K, Grizzle J, 2018, Feedback Control of a Cassie Bipedal Robot: Walking, Standing, and Riding a Segway, 1809.07279
- Grepl R, 2009, Balancing Wheeled Robot: Effective Modelling Sensory Processing and Simplified Control, Engineering Mechanics, 16, 141–154.
- Grasser F, D'arrigo A, Colombi S, Rufer A, 2002, Joe: A Mobile, Inverted Pendulum, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 49, 107-114.
- Ha Y S, Yuta S, 1996, Trajectory Tracking Control for Navigation of The Inverse Pendulum Type Self-Contained Mobile Robot, Robotics and Autonomous Systems, 17, 65-80.
- Hu T, Zhang H, Dai X, Xai X, Liu R, Qiu B, 2007, Design and Implementation of Self-Balancing Coaxial Two Wheel Robot Based on HSIC, Proceeding of SPIE, 6794, 1-9.
- Huai J, Qin Y, Pang F, Chen Z, 2019, Segway DRIVE Benchmark: Place Recognition and SLAM Data Collected by A Fleet of Delivery Robots, 1907.03424.
- Huang C N, 2010, The Development of Self-Balancing Controller for One-Wheeled Vehicles, Scientific Research Journals of Engineering, 2, 212-219.

Jean H J, Wang C K, 2009, Design and Implementation of a Balancing Controller for Two-Wheeled Vehicles Using a Cost-Effective MCU, Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Baoding, China, 3329-3334.

Jeong S, Takahashi T, 2007, Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing and Sitting Motions, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego CA USA, 1932-1937.

Kamen D L, Ambrogi R R, Duggan R J, Field J D, Heinzmann R K, Amesbury B, Langenfeld C C, 2001, U.S. Patent No. 6,302,230. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Kim Y, Kim S H, Kwak Y K, 2006, Improving Driving Ability for a Two-Wheeled Inverted-Pendulum-Type Autonomous Vehicle, Proceedings of the IMechE Part D Journal of Automobile Engineering, 220, 165-175.

Küçük D, 2010, Design Of Two Wheeled Twin Rotored Hybrid Robotic Platform, Atilim University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, The Degree of Master of Science, 137p, İstanbul.

Li J, Gao X, Huang Q, Du Q, Duan X, 2007, Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China, 1614-1619.

Lin S C, Tsai C C, 2009, Development of a Self-Balancing Human Transportation Vehicle for the Teaching of Feedback Control, IEEE Transaction on Education, 52, 157-168.

Morantes J, Espitia D, Morales O, Jiménez R, Aviles O, 2018, Control System for a Segway, International Journal of Applied Engineering Research, 13, 13767-13771.

Nagarajan U, Mampetta A, Kantor G A, Hollis R L, 2009, State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Japan, 998-1003.

- Nawawi S W, Ahmad M N, Osman J H S, 2008, Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, World Academy of Science, Engineering and Technology, 39, 214-220.
- Oryschuk P, Salerno A, Al-Husseini A M, Angeles J, 2009, Experimental Validation of an Underactuated Two-Wheeled Mobile Robot, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 14, 252-257.
- Önkol M, 2018, İki tekerlekli hareketli platform üzerindeki bir robot kolu modellenmesi ve kontrolü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 142s, Ankara.
- Pathak K, Franch J, Agrawal S K, 2005, Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization, IEEE Transactions on Robotics, 21, 505-513.
- Polat B, 2018, Denge robotu tasarımları ve modellenmesi / Balancing robot design and modeling, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, Elazığ.
- Pourmand A, Liao J, Pines J M, Mazer-Amirshahi M, 2018, Segway® personal transporter-related injuries: a systematic literature review and implications for acute and emergency care, The Journal of emergency medicine, 54, 630-635.
- Salerno A, Angeles J, 2004, The Control of Semi- Autonomous Two-Wheeled Robots Undergoing Large Pay Load-Variations, Proceedings of the 2004 IEEE international Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, 1740-1745.
- Salerno A, Angeles J, 2007, A New Family of Two-Wheeled Mobile Robots: Modeling and Controllability, IEEE Transaction on Robotics, 23, 169-173.
- Sasaki M, Yanagihara N, Matsumoto O, Komoriya K, 2005, Steering Control of the Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform (PMP), IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1697.
- Shiroma N, Matsumoto O, Tani K, 1999, Cooperative behavior of a mechanically unstable mobile robot for object transportation, JSME International Journal Series C, 42, 965-973.

Takita Y, Date H, Shimazu H, 2009, Competition of Two-wheel Inverted Pendulum Type Robot Vehicle on MCR Course, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St Louis, USA, 5579-5584.

Tirmant H, Baloh M, Vermeiren L, Guerra T M, Parent M, 2002b2, An Alternative Two Wheeled Vehicle for an Automated Urban Transportation System, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 594-603.

Umay Y, 2018, İki Tekerlekli Kendini Dengeleyen Mobil Bir Aracın Kontrolü, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Elazığ.

Vallius T, Röning J, 2007, Embedded object concept: case balancing two-wheeled robot. In Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision, 6764, 676405 International Society for Optics and Photonics.

Yamafuji K, Kawamura T, 1988, Study on the Postural and Driving Control of a Coaxial Bicycle, Transactions of the JSME, Series C, 54, 1114-1121.

Yedamale P, 2003, Brushless DC (FDAM) motor fundamentals, Microchip Technology Inc, 20, 3-15.

Internet Kaynakları

- 1- <https://www.Segway.com.tr/>, 27.03.2020
- 2- <https://www.getyourguide.com.tr/s/?q=Segway&customerSearch=1&p=1>, 21.02.2020
- 3- <https://www.git-security.com/topstories/management/Segway-inc-gliding-safely-provide-safety>, 21.02.2020
- 4- <http://kisi.deu.edu.tr//mustafa.karaoglan/Sunu%203%20Hareket%20Diren%c3%a7le ri.pdf>, 27.02.2020
- 5- <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/fircasiz-dc-motorlar-3835/>, 06.04.2020

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammed Mustafa KELEK
Doğum Yeri ve Tarihi : Çumra – 01.01.1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : +9 0507 286 83 52 / mmustafakelek@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Selçuklu Cumhuriyet Lisesi (2007 – 2011)
Lisans : Selçuk Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, (2011– 2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2018-2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Baytech Elektronik (2016 –2017)
: Afyon Kocatepe Üniversitesi (2018 – Devam Ediyor)

Yayınlar

Kelek M M, Aslan M F, Durdu A, 2016, Real-Time Target Tracking Using Fast Object Detection, International Conference on Engineering and Natural Science.

Oğuz Y, Şahin M, Kelek M M, 2018, Ergonomic and Physiological Aspects of Dynamics Lighting Based Interior Space Fiction, 3rd international congress on engineering, architecture and design.

Şahin M, Oğuz Y, KELEK M M, 2018, Natural Lighting and Daylight Factor in Buildings, 3rd international congress on engineering, architecture and design.

Katırcıoğlu F, Kelek M M, Şen M, Koyuncu İ, Oğuz Y, 2018, FPGA-Based Design of Gaussian Membership Function for Real-Time Fuzzy Logic Applications, V. International Multidisciplinary Congress of Eurasia.

Şahin M, Oğuz Y, Kelek M M, Özer T, 2018, Examination of Semi Direct Lighting Type in Indoor Lighting under the Color Selection, 3rd International Conference on

- Engineering Technology and Applied Sciences. Skopje, Macedonia 17-21 July.
- Şahin M, Oğuz Y, Özer T, Kelek M M, 2018, Integration and Application of Solar Energy in Urban Illumination, 3rd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, Skopje, Macedonia 17-21 July.
- Kelek M M, Özer T, Oğuz Y, Şahin M, 2018, DsPic33f Series Microprocessor Based Single-Phase Inverter Design and Implementation, International Journal of Scientific & Engineering Research, 9, 77-80.
- Özer T, Kelek M M, Oğuz Y, Kivrak S, Şahin M, 2018, Double Axis Solar Tracking System Design and Implementation, International Journal of Scientific & Engineering Research, 9, 66-71.
- Kelek M M, Çelik İ, Fidan U, Oğuz Y, 2019, The Simulation Of Mathematical Model Of Outer Rotor BLDC Motor, 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, Samsun, Turkey, 22-24.
- Cetin H, Durdu A, Aslan M F, Kelek M M, 2019, Q-Learning Based Real Time Path Planning for Mobile Robots, International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), 4, e-ISSN: 2456 – 6470
- Özer T, Kivrak S, Oğuz Y, Kelek M M, 2020, STM32f103C8 Mikroişlemcisi Kullanılarak CAN Haberleşme Protokolü Tabanlı Veri Toplama Sistemi Uygulaması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 3, 27-31.

EKLER

EK 1. Maxwell programından elde edilen motor bilgileri

BRUSHLESS PERMANENT MAGNET DC MOTOR DESIGN	
1. GENERAL DATA	
Rated Output Power (kW)	0.35
Rated Voltage (V)	54.8
Number of Poles	30
Given Rated Speed (rpm)	400
Frictional Loss (W)	5
Windage Loss (W)	5
Rotor Position	Outer
Type of Load	Constant Power
Type of Circuit	Y3
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees	120
One-Transistor Voltage Drop (V)	2
One-Diode Voltage Drop (V)	2
Operating Temperature (C)	75
Maximum Current for CCC (A)	0
Minimum Current for CCC (A)	0
2. STATOR DATA	
Number of Stator Slots	27
Outer Diameter of Stator (mm)	114.8
Inner Diameter of Stator (mm)	60
Type of Stator Slot	1
Stator Slot hs0 (mm)	0.9
Stator Slot hs2 (mm)	16.3
Stator Slot bs0 (mm)	1.9
Stator Slot bs1 (mm)	7.82
Stator Slot bs2 (mm)	5.39
Top Tooth Width (mm)	4.46891

EK 1 (Devam). Maxwell programından elde edilen motor bilgileri

Bottom Tooth Width (mm)	3.09785
Skew Width (Number of Slots)	0
Length of Stator Core (mm)	30
Stacking Factor of Stator Core	0.95
Type of Steel	Steel_1010
Slot Insulation Thickness (mm)	0
Layer Insulation Thickness (mm)	0
End Length Adjustment (mm)	0
Number of Parallel Branches	1
Number of Conductors per Slot	68
Type of Coils	21
Average Coil Pitch	1
Number of Wires per Conductor	6
Wire Diameter (mm)	0.511
Wire Wrap Thickness (mm)	0
Slot Area (mm ²)	144.646
Net Slot Area (mm ²)	139.255
Limited Slot Fill Factor (%)	75
Stator Slot Fill Factor (%)	76.5053
Coil Half-Turn Length (mm)	42.1492

3. ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm)	0.1
Outer Diameter (mm)	131.9
Length of Rotor (mm)	30
Stacking Factor of Iron Core	0.95
Type of Steel	steel_1010
Polar Arc Radius (mm)	57.5
Mechanical Pole Embrace	0.95
Electrical Pole Embrace	0.932643
Max. Thickness of Magnet (mm)	3.45
Width of Magnet (mm)	11.4218
Type of Magnet	NdFe30
Type of Rotor	1

EK 1 (Devam). Maxwell programından elde edilen motor bilgileri

Magnetic Shaft	Yes
4. PERMANENT MAGNET DATA	
Residual Flux Density (Tesla)	1.1
Coercive Force (kA/m)	838
Maximum Energy Density (kJ/m ³)	230.45
Relative Recoil Permeability	1.0446
Demagnetized Flux Density (Tesla)	0.656415
Recoil Residual Flux Density (Tesla)	1.1
Recoil Coercive Force (kA/m)	838
5. MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Copper Density (kg/m ³)	8900
Permanent Magnet Density (kg/m ³)	7550
Armature Core Steel Density (kg/m ³)	7872
Rotor Core Steel Density (kg/m ³)	7872
Armature Copper Weight (kg)	0.84749
Permanent Magnet Weight (kg)	0.276246
Armature Core Steel Weight (kg)	0.811688
Rotor Core Steel Weight (kg)	0.44721
Total Net Weight (kg)	2.38263
Armature Core Steel Consumption (kg)	2.44518
Rotor Core Steel Consumption (kg)	1.63758
6. STEADY STATE PARAMETERS	
Stator Winding Factor	0.945214
D-Axis Reactive Inductance L _d (H)	0.000479296
Q-Axis Reactive Inductance L _q (H)	0.000479296
D-Axis Inductance L _{1+Ld} (H)	0.00402244
Q-Axis Inductance L _{1+Lq} (H)	0.00402244
Armature Leakage Inductance L ₁ (H)	0.00354314
Zero-Sequence Inductance L ₀ (H)	0.00287732
Armature Phase Resistance R ₁ (ohm)	0.454901

EK 1 (Devam). Maxwell programından elde edilen motor bilgileri

Armature Phase Resistance at 20C (ohm)	0.374193
D-Axis Time Constant (s)	0.00105363
Q-Axis Time Constant (s)	0.00105363
Ideal Back-EMF Constant KE (Vs/rad)	1.46098
Start Torque Constant KT (Nm/A)	1.39147
Rated Torque Constant KT (Nm/A)	1.80984

7. NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla)	2.14014
Stator-Yoke Flux Density (Tesla)	0.121316
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla)	0.839765
Air-Gap Flux Density (Tesla)	0.706821
Magnet Flux Density (Tesla)	0.711469
Stator-Teeth By-Pass Factor	0.0503332
Stator-Yoke By-Pass Factor	7.88122e-005
Rotor-Yoke By-Pass Factor	5.52386e-005
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T)	951.623
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T)	0.180533
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T)	3.26556
Air-Gap Ampere Turns (A.T)	66.0708
Magnet Ampere Turns (A.T)	-1021.17
Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T)	625.75
Leakage-Flux Factor	1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.689119
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke	0.710066
No-Load Speed (rpm)	334.114
Cogging Torque (Nm)	0.0336897

8. FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A)	9.63239
Root-Mean-Square Armature Current (A)	9.62007
Armature Thermal Load (A ² /mm ³)	382.873
Specific Electric Loading (A/mm)	48.9733

EK 1 (Devam). Maxwell programından elde edilen motor bilgileri

Armature Current Density (A/mm ²)	7.81799
Frictional and Windage Loss (W)	2.98289
Iron-Core Loss (W)	0.000296144
Armature Copper Loss (W)	126.298
Transistor Loss (W)	43.4989
Diode Loss (W)	4.96951
Total Loss (W)	177.749
Output Power (W)	350.106
Input Power (W)	527.855
Efficiency (%)	66.3262
Rated Speed (rpm)	193.411
Rated Torque (N.m)	17.3459
Locked-Rotor Torque (N.m)	77.5193
Locked-Rotor Current (A)	55.796

9. WINDING ARRANGEMENT

3-phase, 2-layer winding can be arranged in 9 slots	AXACZCBYB
Angle per slot (elec. degrees)	200
Phase-A axis (elec. degrees)	120
First slot center (elec. degrees)	0

10. TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding	
Number of Turns	306
Parallel Branches	1
Terminal Resistance (ohm)	0.454901
End Leakage Inductance (H)	1.15224e-005
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm)	30
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla)	1.1
Equivalent Hc (kA/m)	838
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²)	0.00665165

EK 2. Zıt EMK denklemlerinde kullanılan matlab fonksiyonu

```
function y=zit_emk_fonksiyonu(u)
y=0;
if (u>270) && (u<=330)
    y=-1;
elseif ((u>330) && (u<=360))
    y=0;
elseif ((u>=0) && (u<=30))
    y=0;
elseif (u>30) && (u<=90)
    y=1;
elseif (u>90) && (u<=150)
    y=1;
elseif (u>150) && (u<=210)
    y=0;
elseif (u>210) && (u<=270)
    y=-1;
end
end
```

EK 3. Tez için Yapılan Yayınlar – 1

1- The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC Motor

The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC Motor

M. Mustafa KELEK^{1*}, İbrahim ÇELİK², Uğur FİDAN³ and Yüksel OĞUZ¹

¹Electrical and Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey

²Mechatronic Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey

³Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey

*Corresponding author: mmustafakelek@aku.edu.tr

*Speaker: mmustafakelek@aku.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral

Abstract – In this study, mathematical modeling of outer rotor brushless direct current motor (BLCD) is performed. Brushless direct current motor is highly preferred in industrial applications when compared the other motor types with considering advantages and disadvantages. Producing higher torque with smaller dimensions, being easily controllable and developing high efficiency electronic materials can be given such an example of these advantages. In this study, an outer rotor brushless DC motor which was used in the laboratory is modeled. This motor hasn't currently information parameters. For this reason, first of all, the metric measurements, phase winding orders are obtained for the motor parameters. With the motor parameters that we have, the motor was created and analyzed in Maxwell program environment. And then the parameters (torque constant, back EMF constant, phase resistance, etc.) were obtained required for the simulation. Mathematical model was completed with the obtained parameters in Matlab / Simulink environment. So, Torque characteristics, motor speed and trapezoidal back-EMF were determined. The motor currents matched with the Maxwell and Matlab / Simulink programs. So the accuracy of the simulation modeling has been confirmed.

Keywords – Brushless Direct Current Motor, BLDC, Simulation Analysis, Matlab/Simulink, Maxwell.

I. INTRODUCTION

Brushless Direct Current Motors (BLDC) are a special electrical machine that includes the features of the synchronous machine. BLDC motors are preferred in the industry because of their high efficiency, high torque and robust construction. They are especially used in aerospace, medical, computer technologies, industrial automation, military applications and robotics.

Tibor et al. simulated the mathematical model of the BLDC motor and showed the results via Matlab / Gui [3]. Jeon et al. proposed a new BLDC motor simulation model with an almost true Electromagnetic Force (EMF) waveform to reduce simulation error [1]. Patel and Pandey have created the PID model of a BLDC motor with the use of Matlab / Simulink [6]. Cai et al. proposed a control strategy for the BLDC used in the Electric Power Steering (EPS) system and analyzed the simulation model of this system [7]. Karapunar et al. modelled a BLDC motor in Matlab / Simulink program. In this study, they presented a cascade controller design including current, velocity and position cycles [8]. Vinatha et al. designed the simulation in the Matlab / Simulink program by controlling the speed and current of the BLDC motor. They made the evaluation of the model by performing various simulation studies [9]. Kürkçü et al. have modeled and applied a brushless DC Motor belonging to a military system under variable environmental dynamic conditions via Matlab/Simulink [10].

In this study, the mathematical model and simulation of a BLDC motor used in the laboratory is applied. The parameters required for the simulation (stator diameter, number of magnets, number of turns, air gaps, etc.) are taken from the motor. By using measured parameters, BLDC motor parameters (K_b (Back-EMF Constant), K_t (Torque Constant),

R_s (Phase Resistance), L (Phase Inductance), J (Inertia Moment) etc.) required for mathematical model is determined by Maxwell program. The motor is simulated in Matlab/Simulink program by using the obtained motor parameters. As a result of the simulation, data related to motor phase currents, rotor speed, back EMF and motor torque are obtained.

II. MATERIALS AND METHOD

BLDC motors are divided into two as Inner and Outer according to their rotor structure. In this study, Outer rotor model is used. In Outer rotor models, the rotor of the motor is on the outside. The body of the motor rotates and the fixed part remains inside. Figure 1 shows the outer rotor BLDC motor structure.

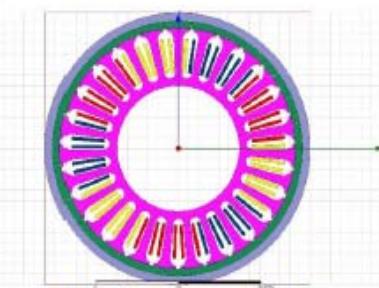


Fig. 1 The outer rotor BLDC motor structure

BLDC motors are not affected by changes in mains frequency since they operate with DC voltage. As the structure is electronic, the efficiency is high. Since electrical conduction is not transmitted by any brush, they do not form an arc due to friction [4]. Advantages and disadvantages of BLDC motors compared to other motor types are listed below.

EK 3 (Devam). Tez için Yapılan Yayınlar – 1

Kelek et al., The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC Motor, ISAS WINTER-2019, Samsun, Turkey

Advantages of BLDC motor compared to other motor types [5]:

- ✓ Torque/Volume is very high for BLDC motors.
- ✓ They have high efficiency.
- ✓ Reliable. They work quietly.
- ✓ They do not form arc.
- ✓ They do not need excitation current.
- ✓ High speeds can be achieved.
- ✓ There is no coal dust because they are brushless.

Disadvantages of BLDC motor compared to other motor types;

- ✓ Their prices are higher than other motor types because of the magnet shelter inside.
- ✓ The rotor position must be known in order to trigger the phase which can generate torque.
- ✓ The control circuits are more complex than the control circuits of other motors.

A. BLDC Motor Structure

In order to drive BLDC motors, an inverter structure that can trigger the phases correctly and Hall Effect sensors or an encoder to determine the rotor position are required. Position information is taken from the hall effect sensors in the motor. Table 1 shows the physical parameters of the 27/30 BLDC motor used in the study.

Table 1. the physical parameters of the 27/30 BLDC motor

Parameters	Value
Pole Number/ Magnet Number	27/30
Stator Outer Diameter	114.8 mm
Stator Inner Diameter	60 mm
Rotor Outer Diameter	129.9 mm
Rotor Inner Diameter	115 mm
Package Length	30 mm
Connection Type	Y3

B. Mathematical Model of BLDC Motor

The phase variable approach is generally preferred in terms of simplicity in BLDC motors. The source can be applied as a sinusoidal, square wave, trapezoidal or other wave as long as the peak voltage does not exceed the maximum voltage limit of the motor. Electrical and mechanical equations of BLDC motor are given below. Equations of phase voltage values are given in Equations 1, 2 and 3.

$$V_{as} = R \cdot i_{as} + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$V_{bs} = R \cdot i_{bs} + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$V_{cs} = R \cdot i_{cs} + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

Where, L: Phase Inductance ($L = L_a = L_b = L_c$), M: Mutual Inductance, R: Phase Resistance ($R = R_a = R_b = R_c$), i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : Phase Currents, V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Phase Voltages and e_a, e_b, e_c : Back-EMF.

The torque of the BLDC motor is mainly influenced by the waveform of the back EMF ([1] - [3]). The opposite voltage that occurs in the stator windings when the motor is working is called the Back-EMF. The Back-EMF depends on the magnetic flux, speed and position parameters. Equations 4, 5

and 6 formulate the back-EMF voltages that occur in each phase.

$$e_a = K_e \cdot f(\theta_e) \cdot w_m \quad (4)$$

$$e_b = K_e \cdot f(\theta_e - (2\pi/3)) \cdot w_m \quad (5)$$

$$e_c = K_e \cdot f(\theta_e + (2\pi/3)) \cdot w_m \quad (6)$$

Where, K_e : Back-EMF Constant, w_m : Mechanical Angular Speed and θ_e : Electric Motor Angle. The trapezoidal EMF generator function $f(\theta_e)$ is given in Equation 7.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta_e \leq 30, \\ 1 & 30 < \theta_e \leq 90, \\ 1 & 90 < \theta_e \leq 150, \\ 0 & 150 < \theta_e \leq 210, \\ -1 & 210 < \theta_e \leq 270, \\ -1 & 270 < \theta_e \leq 330, \\ 0 & 330 < \theta_e \leq 360, \end{cases} \quad (7)$$

The electromagnetic torque values of each phase are expressed in Equations 9, 10 and 11. Total electromagnetic torque is given in Equations 8 and 12.

$$T_a = (e_a \cdot I_a + e_b \cdot I_b + e_c \cdot I_c) / w_m \quad (8)$$

$$T_a = K_t \cdot f(\theta) \cdot I_a \quad (9)$$

$$T_b = K_t \cdot f(\theta - 2\pi/3) \cdot I_b \quad (10)$$

$$T_c = K_t \cdot f(\theta + 2\pi/3) \cdot I_c \quad (11)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (12)$$

Where, K_t : Torque Constant. The formula for mechanical torque is given in Equation 13.

$$T_m = T_{load} + J \cdot \frac{dw_m}{dt} + \beta \cdot w_m \quad (13)$$

Where, β the friction coefficient and J is the inertia moment. Phase voltages can be calculated as Equations 14 and 15 by using $V_{ab} = V_a - V_b$ and $E_{ab} = E_a - E_b$ since it can be modeled more easily from phase voltage equations.

$$V_{ab} = V_a - V_b = R_s(I_a - I_b) + (L - M) \frac{d}{dt}(I_a - I_b) + E_{ab} \quad (14)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = R_s(I_b - I_c) + (L - M) \frac{d}{dt}(I_b - I_c) + E_{bc} \quad (15)$$

If the mutual inductance is ignored and $I_a + I_b + I_c = 0$, the flow equations are given in Equation 16, 17 and 18.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L} i_a + \frac{2}{3L} (V_{ab} - E_{ab}) + \frac{1}{3L} (V_{bc} - E_{bc}) \quad (16)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L} i_b - \frac{1}{3L} (V_{ab} - E_{ab}) + \frac{1}{3L} (V_{bc} - E_{bc}) \quad (17)$$

$$I_c = -(I_a + I_b) \quad (18)$$

C. Maxwell Program

The Maxwell program is a software package that solves problems in the electromagnetic field using Maxwell's equations. In this study, parameters required for simulation of BLDC motor are obtained by using Maxwell software package. The design of the motor is made in this program from the beginning. It's parameters needed in this process are obtained from the motor.

This Parameters;

EK 3 (Devam). Tez için Yapılan Yayınlar – 1

Kelek et al., The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC Motor, ISAS WINTER-2019, Samsun, Turkey

- ✓ Pole Number:30
- ✓ Slot Number:27
- ✓ Turn Number:34
- ✓ Stator Inner/Outer Diameter:60 mm / 114,8 mm
- ✓ Rotor Inner/Outer Diameter:115 mm / 129,9 mm
- ✓ Magnet Thickness:3,45 mm
- ✓ Package Length:30 mm
- ✓ Connection Type: Star connection.

After the parameter measurements, the motor is designed in Maxwell program. Figure 2 shows the phase sequence used in this design.

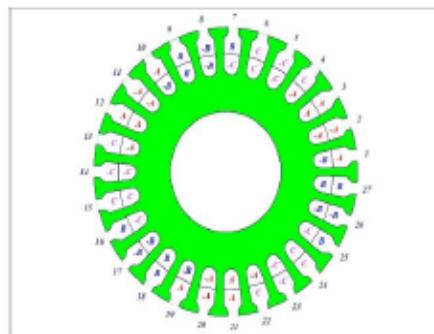


Fig. 2 Phase Sequence of Maxwell Motor

As a result of the design, the parameters required for simulation were obtained. These parameters are given in Table 2.

Table 2. Parameters Obtained from Maxwell Program

Parameters	Value
K_e (Vs/rad)	1.46
K_t (Nm/A)	1.39
J (kg.m ²)	6.651e ⁻³
L (H)	3.456e ⁻³
R_s (ohm)	0.454

D. Simulation of BLDC Motor

Matlab/Simulink program is used to simulate the mathematical model of the BLDC motor. Figure 3 shows the BLDC block and the window for the parameters to be entered. The mathematical model of the system is extracted and expressed as a block diagram in Simulink program. As a result of the simulation, mechanical angular velocity (w_m), electrical angular velocity (w_e), phase currents (I_a, I_b, I_c) and phase electromagnetic voltages (E_a, E_b, E_c) can be calculated.

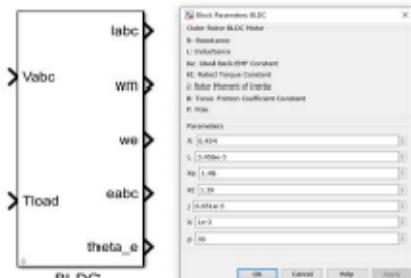


Fig. 3 BLDC Motor General Block Diagram and Parameter Input Window

As shown in the BLDC block, the load torque and voltage values of each phase are given as input and the phase currents, mechanical angular velocity, electrical angular velocity, electromagnetic voltage and electrical angle are given as output. The BLDC motor block (Figure 4) contains blocks with current equations, torque equations, and opposite EMF equations. For the system to operate at full speed at nominal speed, the load is selected to be approximately 7.80 Nm. Thus, the maximum torque of the motor is determined.

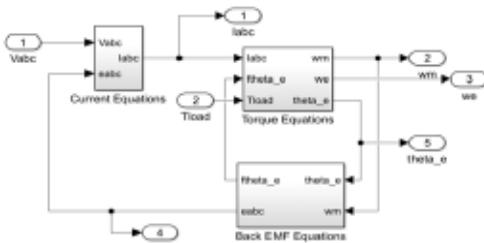


Fig. 4 Current, Torque and Opposite EMF Equation Blocks

III. RESULTS

As a result of this study, a mathematical model of an outer rotor BLDC motor with 350W and 320RPM speed is applied and simulated. In the Maxwell and Matlab/Simulink programs, the currents at full load are observed. In the Matlab / Simulink program, the maximum current of each phase is observed as 13.65A and the effective value is calculated as 9.65A from the formula $I_{max} / \sqrt{2}$. In Maxwell program, the maximum current of each phase is 13.86A, and the effective value is 9.79A. It has been proved that the simulation works correctly with an error of 1.51% from the obtained current values. The current graph for each phase calculated in Matlab / Simulink is shown in Figure 5. There are 120 degree phase differences between the phases.

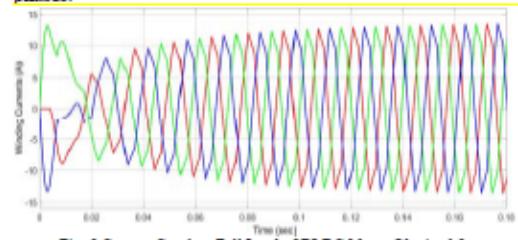


Fig. 5 Current Graph at Full Load of BLDC Motor Obtained from Matlab/Simulink

In Figure 6, the current graph obtained from Maxwell program which corresponds to the same load value is given. As seen in both figures, the data obtained from Maxwell and Matlab/Simulink support each other.

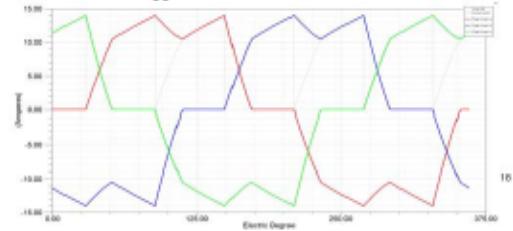


Fig. 6 Current Graph at Full Load of BLDC Motor Obtained from Maxwell Program

EK 3 (Devam). Tez için Yapılan Yayınlar – 1

Kalek et al., *The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC Motor*, ISAS WINTER-2019, Samsun, Turkey

IV. CONCLUSION

In this study, a brushless direct current motor used in the laboratory is simulated. 350W and 320 RPM speed design of the motor is made in Maxwell program. Thanks to this design, the necessary parameter information is obtained in the simulation. In the Matlab/Simulink program, the mathematical model of the BLDC motor is simulated. Maxwell and Matlab/Simulink programs are compared at full load currents. The approximate equality of the currents indicate the accuracy of the simulation.

The mechanical and electrical properties of the motor are determined by using the physical properties of the BLDC motor. Like these models can be used to control many applications such as robot, electric vehicle, and industrial environment. These model parameters and simulation study are the infrastructure for future applications.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by Afyon Kocatepe University Scientific Research Project under 19.FEN.BİL.16.

REFERENCES

- [1] Jeon, Y. S., et al. "A new simulation model of BLDC motor with real back EMF waveform." COMPEL 2000. 7th Workshop on Computers in Power Electronics. Proceedings (Cat. No. 00TH8535). IEEE, 2000.
- [2] Xiaofeng, Zhang, and Lu Zhengyu. "A new BLDC motor drives method based on BUCK converter for torque ripple reduction." 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. Vol. 3. IEEE, 2006.
- [3] Tibor, Balogh, Vilim Fedak, and Frantisek Durovsky. "Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI." 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2011.
- [4] Bayraktar, Hüseyin Cem. "Yabancı Uyartımlı İle Fırçasız Dc Motorların Hız Ve Tork Karakteristiklerinin Karşlaştırılması". Diss. İstanbul Aydin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [5] Aydoğdu, Omer, and Mete Bayer. "PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı." Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya (2008).
- [6] Patel, V. K. S., & Pandey, A. K. (2013). Modeling and performance analysis of PID controlled BLDC motor and different schemes of PWM controlled BLDC motor. International Journal of Scientific and Research Publications, 3(4), 1-14.
- [7] Cai, C., Zhang, H., Lin, J., & Gao, Y. (2010, March). Modeling and simulation of BLDC motor in electric power steering. In 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (pp. 1-4). IEEE.
- [8] Karapınar, U., Eren, Z., Şahin, M., & Kanburoğlu, F. (2013, April). Cascaded controller algorithm design for a brushless DC motor with Matlab/Simulink and MCU implementation. In 2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-8). IEEE.
- [9] Vinatha, U., Pola, S., & Vittal, K. P. (2008, November). Simulation of four quadrant operation & speed control of BLDC motor on MATLAB/SIMULINK. In TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference (pp. 1-6). IEEE.
- [10] Kurkun, B., Çelik, M., Çetin, S., & Özsoy, İ. Gedümeli Bir Sistem için Fırçasız DC Motorun Modellenmesi, Simülasyonu ve Uygulanması. TORK2013-Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, 26-28.