

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ELEKTRONİK DİFERANSİYEL DENETLEYİCİ TASARIMI
VE PERFORMANS ANALİZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜMEYRA EREN

EKİM 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ ELEKTRONİK DİFERANSİYEL DENETLEYİCİ TASARIMI
VE PERFORMANS ANALİZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sümevra EREN

DANIŞMAN: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

ZONGULDAK

Ekim 2019

KABUL:

Sümeýra EREN tarafından hazırlanan “Elektrikli Araç Elektronik Diferansiyel Denetleyici Tasarımı ve Performans Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 31/10/2019

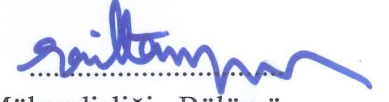
Danışman: Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü



Üye: Prof. Dr. Raif BAYIR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Seda KARADENİZ KARTAL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../20....



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Sümeyra EREN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇ ELEKTRONİK DİFERANSİYEL DENETLEYİCİ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Sümevra EREN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Ekim 2019, 73 sayfa

Fosil kaynaklı enerji kaynaklarının kısıtlı oluşu ve yakın bir gelecekte bitecek olması sebebiyle ülkeler alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Enerji tüketimi sebebiyle oluşan çevre kirliliğinde büyük paya sahip olan ulaşım sektörü alternatif enerjiler üzerine çalışmaların başlatılması için temel olmuş, elektrikli ve hibrid araçlar üzerine yoğun çalışmalar başlamıştır. Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda elektronik diferansiyel konusuna dikkat çekmek hedeflenmiş, denetim yaklaşımlarında performans kıyaslaması yaparak bilimsel altyapıya katkı sağlamıştır.

Elektrikli araçlarda tekerleklere yerleştirilmiş fırçasız doğru akım motorunun (Brushless Direct Current - BLDC) uygun sürücü ile denetlenmesi, belirlenen sensörler yardımı ile kapalı çevrim oluşturarak tasarlanacak elektronik diferansiyel ile güvenli sürüşün yakalanması amaçlanmaktadır. Bu motorları denetleyen sürücü devreleri ve motor hız bilgisi için hız sensörleri ile akım bilgisi için akım sensörleri kullanılmaktadır. Motor sürücüler, sensörler ve doğru akım kaynağı bir haberleşme kartı ile haberleştirilerek, düzenek gerçekleştirilip test edilmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

Düzenek tasarlanırken, güvenli sürüş algoritmaları üzerine odaklanmak amacıyla hazır BLDC motor sürücü kullanılmıştır. Elektrikli araçta birden fazla fırçasız doğru akım motoru kullanılması durumu düşünüldüğünde güvenlik katsayısını arttırmak ve maksimum sürüş performansını sağlamak için her bir motora ayrı bir denetleyici ünitesi kullanılması uygun görülmüştür. Denetleyici ünitelerinin birbiri ile haberleşmesiyle motorlar eşit yüklenmiş ve elektronik diferansiyel sisteminin denetlenmesi sağlanmıştır. Motorlardan alınan akım, hız bilgilerden elde edilen PID katsayıları aracın yük durumuna göre seçilmiştir.

Motorun çektiği akıma göre yük durumunu belirlenmiş, yüke uygun PID seçimi benzetimde bulanık mantık ile, deneysel verilerde de if-than algoritmasıyla seçilmiştir. Elde edilen deneysel verilerde, önerilen yüke göre PID katsayılarının belirlenmesiyle referans hıza ulaşmanın, motor devri bazında ortalama sapma değerlerinin sabit bir PID katsayısı kullanımına göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, Elektronik diferansiyel, Motor denetleyici, Motor sürücü, BLDC motor, BLDC motor sürücü, Adaptif PID, Bulanık PID

Bilim Kodu: 608.03.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ELECTRONIC DIFFERENTIAL CONTROLLER DESIGN FOR THE ELECTRICAL VEHICLES AND PERFORMANCE ANALYSIS

Sümeyra EREN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rifat HACIOĞLU

October 2019, 73 pages

Limited sources and depletion of fossil fuels have led to find alternative energy sources of countries. Energy consumption and transport sector, which has the largest share in environmental pollution is the main factor in these studies and intensive work was started on electric and hybrid vehicles. This thesis has been selected to draw attention to the importance of electronic differential, to contribute in the creation of a scientific infrastructure.

It is aimed to controlling the brushless dc motor placed on the back side wheels of the electric vehicle with proper driver and the closed loop is provided by an electronic differential to be designed by determined sensors. In the thesis, BLDC motor is used. To get this aim, motor driver and a communication card which will provide to communicate between all parts are used. A control card is implemented and tested with two BLDC motor and sensor sets such as current and speed sensor.

ABSTRACT (continued)

When designing the system, ready-made BLDC motor drivers were used to focus on safe driving algorithms. Considering the use of more than one BLDC motor on electric vehicle, it is considered appropriate to use a separate control unit for each motor in order to increase the safety coefficient and provide maximum driving performance. Motor drivers communicate with each other to ensure equal loading of motors and control of traction systems such as electronic differentials. This control is provided by current and speed information obtained from the motors by the relevant sensors. In the design, a motor driver is used for each motor and a control card to communication with a motor drivers, sensors and motors. In system design; numerical methods, PID control are used. According to motor load, PID coefficient are selected by the fuzzy logic for simulation results, for experimental results if-then algorithm are used to select suitable PID coefficient.

The load status is determined according to the current drawn by the motor, and PID selection for the load is provided. It was observed that reaching the reference speed by determining PID coefficients by using proposed selection is more successful than stabil PID usage of average deviation values on the basis of engine speed.

Keywords: Electrical vehicles, Electronic differential, BLDC motor, Motor control, Motor driver, BLDC motor, BLDC motor driver, Adaptive PID, Fuzzy PID

Science Code: 608.03.01

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezım boyunca bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU'na, yardımları için Erkan EREN'e ve çalışma arkadaşlarıma, beni her zaman destekleyen aileme, sabrı için de oğluma teşekkürlerimi sunarım.





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE TEKNOLOJİLERİ	5
2.1 ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM ÇALIŞMALARI	5
2.2 ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE TARİHSEL GELİŞİMİ	8
2.3 ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ.....	9
2.3.1 Tümü Elektrikli Araç (TEA)	9
2.3.2 Hibrid Elektrikli Araç (HEA).....	11
2.3.3 Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (YEA).....	11
2.4 TEA'LARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	12
2.5 ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ	13
2.5.1 Enerji Depolama Sistemleri.....	13
2.5.2 Güç Denetim Sistemleri	14
2.5.3 Elektrik Motorları.....	16
BÖLÜM 3 BLDC MOTOR VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANIMI.....	21

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.1 BLDC MOTORUN ÇALIŞMA PRENSİBİ	21
3.2 PID (ORANSAL- INTEGRAL-TÜREVSEL) DENETLEYİCİ.....	25
3.3 BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ.....	30
3.4 ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BLDC MOTOR KULLANIMI	31
3.5 BLDC MOTOR KULLANIMININ AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	32
3.6 BLDC MOTOR DENETİM TOPOLOJİLERİ	33
3.7 BLDC MOTORLU ELEKTRİKLİ ARAÇTA ELEKTRONİK DİFERANSİYEL	34
3.8 TASARLANAN DİFERANSİYEL SİSTEMDE YAPILAN ÇALIŞMALAR	35
BÖLÜM 4 ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA	39
4.1 MATERYAL VE METOT.....	39
4.2 ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM SİSTEMİ DÜZENEGİ.....	40
4.3 PID VE BULANIK PID BENZETİM SONUÇLARI.....	44
4.4 FARKLI YÜK DURUMLARINDA PID VE SEÇİM PID DENEYSEL SONUÇLAR	56
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
EK AÇIKLAMALAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Elektrikli Araç.....	9
Şekil 2.2 Tümü ile Elektrikli Araç Blok Şeması.....	10
Şekil 2.3 Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması, Seri Hibrit (a) Paralel Hibrit açıklaması (b) Seri-Paralel Hibrit (c) Kompleks Hibrit (d).....	11
Şekil 2.4 Yakıt Hücreli Elektrikli Araç Blok Şeması.....	12
Şekil 2.5 Doğrultucu Blok Şeması.....	15
Şekil 2.6 Akü Şarj Sistemi.....	15
Şekil 2.7 Fırçasız DC Motor Tek Faz Eşdeğer Devresi.....	17
Şekil 3.1 BLDC Motor Kesidi ve Rotor Stator Yerleşimi.....	22
Şekil 3.2 BLDC Motor Faz Enerjilendirme Sırası.....	23
Şekil 3.3 BLDC Motor Sürücü Güç Kısmı Blok Şeması.....	24
Şekil 3.4 PID Blok Şeması.....	25
Şekil 3.5 Ziegler - Nichols Açık Çevrim Reaksiyon Eğrisi.....	27
Şekil 3.6 Birim Basamak Cevabı.....	29
Şekil 3.7 System Identification Araç Kutusu Kullanımı.....	29
Şekil 3.8 Bulanık Sistem Temel Birimleri.....	31
Şekil 3.9 Bulanık Mantık Denetleyici ile Motor Denetim Benzetim Blok Diyagramı.....	31
Şekil 3.10 HUB Motor Detayı.....	32
Şekil 3.11 Arkadan İtişli Araçta Mekanik Diferansiyel.....	35
Şekil 3.12 Araç Bileşen Yerleşimi.....	36
Şekil 3.13 İç Dış Tekerlek Hız Farkı.....	36
Şekil 4.1 Araç Blok Şeması.....	40
Şekil 4.2 İzmit Körfez Pisti.....	42
Şekil 4.3 Referans Yol Hız Grafiği.....	42
Şekil 4.4 Sistem Düzeneginin Fotoğrafı.....	43
Şekil 4.5 Yükleme Mekanizmalı Sistem Düzeneginin Ön ve Arka Görünüşü.....	44
Şekil 4.6 Denetleyici sistemi benzetim blok şema.....	45
Şekil 4.7 PID tuner ile katsayıların hesaplanması.....	45
Şekil 4.8 Motor Akımı Bulanık PID1 Kümeleri Üyelik Fonksiyonları.....	46
Şekil 4.9 PID 1 Seçeneklerini Temsil Eden Çıkış Üyelik Fonksiyonları.....	46
Şekil 4.10 MATLAB Programıyla Yapılmış Örnek Durulaştırma İşlemi.....	47
Şekil 4.11 Bulanık PID 2 Giriş Çıkış Üyelik Tanımlaması.....	48
Şekil 4.12 Bulanık PID 2 Giriş Üyelik Fonksiyonları.....	48
Şekil 4.13 Bulanık PID 2 Çıkış Üyelik Fonksiyonları.....	49
Şekil 4.14 Bulanık PID 2 Denetleyici Blok Şeması.....	49
Şekil 4.15 Yüksüz Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.16 %50 Yük Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.....	51
Şekil 4.17 %100 Yük Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.....	51
Şekil 4.18 %100 Yük Durumda Benzetim Motor Gerilim Akım Güç Değişimleri.....	52
Şekil 4.19 Bulanık PID 2 Denetleyici Katsayıları Değişimi.....	53
Şekil 4.20 PID Denetleyici ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri.	54
Şekil 4.21 Bulanık PID 1 ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri. ..	54
Şekil 4.22 Bulanık PID 2 ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri. ..	55
Şekil 4.23 Yüksüz Durum Secim PID ile Hız Değişimi.	57
Şekil 4.24 %50 Yükte Sabit Katsayılı PID İle Hız Değişimi.....	59
Şekil 4.25 %50 Yükte Secim PID ile Hız Değişimi.....	59
Şekil 4.26 %100 Yükte Sabit Katsayılı PID İle Hız Değişimi.....	60
Şekil 4.27 %100 Yükte Secim PID İle Hız Değişimi.	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Motorun Anahtarlama Sırası.....	24
Çizelge 3.2 PID Denetleyicinin Sisteme Etkileri.....	27
Çizelge 3.3 Ziegler – Nichols Method Katsayılarının Tespit Formülleri.....	28
Çizelge 4.1 Yol Similasyon Tablosu.....	41
Çizelge 4.2 Elektronik Diferansiyel Yok İken Motor 1 ve Motor 2 Benzetim Sonuçları.....	55
Çizelge 4.3 Elektronik Diferansiyel Var İken Motor 1 Ve Motor 2 Benzetim Sonuçları.....	56
Çizelge 4.4 Yük Değişimlerine göre PID ve Secim PID için Hata ve Enerji Kayıpları.....	58



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK A: Materyal Listesi	67
EK B: Fırçasız DC Motor - Emax CF2822 1200KV Brushless Teknik Özellikler	69
EK C: 30A ESC BLDC Motor Sürücü Teknik Özellikleri	70
EK D: Kızılötesi Hız Sensörü Teknik Özellikleri	71





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

V_a	: Kaynak Gerilimi
R_p	: Statorun Direnci
i_a, i_b, i_c	: Faz Akımları
L_p	: Statorun Endüktansı
e_a	: Zıt EMK
K_m	: Tork Sabiti
K_f	: Sönümlenme Sabiti
J	: Toplam Atalet Momenti
T_L	: Yük Değişimi
i_{dc}	: Hat Akımı
k_e	: Zıt EMK Sabiti
ϕ_m	: Rotor Pozisyonu
$g_{a,b,c}$: Normalizasyon Katsayısı
T_{em}	: 3 Faza ait Tork
$T_{em a,b,c}$: Faza Ait Tork
$V_ç$: Çıkış Gerilimi
V_g	: Giriş Gerilimi
$u(t)$: Denetleyici Çıkış Sinyali
$e(t)$: Hata Miktarı
$r(t)$: Örnekleme Referans Hızı
$w(t)$: Motor Çıkış Hızı
v_0	: Araç Hızı
$v_{1,2}$: Motor 1 ve 2 Hızı
$r_{1,2}$: İç ve Dış Tekerlek Yol Yarıçapımı
N	: Örnek Sayısı
E^2	: Devir Sapması (Karesel Hata)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

Back-EMF	: Zıt Elektromotor Kuvvet
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım Motoru)
D	: Görev Periyodu
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
EA	: Elektrikli Araç
HEA	: Hibrid Elektrikli Araç
HES	: Hall Effect Sensor (Durum sensörü)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	: Insulated Gate Controlled Thyristor
İYM	: İçten Yanmalı Motorlar
K_p	: Oransal Denetleyici Katsayısı
K_i	: İntegral Denetleyici Katsayısı
K_d	: Türevsel Denetleyici Katsayısı
MCT	: Mos Controlled Thyristor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PID	: Oransal İntegral Türev Denetleyici
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor –Daimi Mıknatıslı Senkron Motor
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
S	: Referans Hızdan Sapma
T	: Örnekleme Zamanı
TEA	: Tümüyle Elektrikli Araç
YEA	: Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde motorlu araç sayısının hızla artması hava kirliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum insan sağlığını tehdit eden sınırlara ulaşmıştır. Petrol rezervlerinin yakın bir gelecekte bitecek olması alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacı gündeme getirmiş ve alternatif enerjilerle çalışan araçların gelişimine sebep olmuştur [1]. Ayrıca yaygın olarak kullanılan petrol rezervlerinin azalırken fiyatının artması da bu süreci hızlandırmaktadır [2]. Bu ve benzeri sebeplerle, otomotiv alanında yeni teknolojilerin kullanılmasına, mevcut sistemlerin iyileştirilmesine, alternatif enerji ile çalışan tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda elektrikli araçların yeniden inşasına başlanarak, günümüze uygun hale getirilmeye başlanmıştır.

Elektrik motorlarının araçlarda kullanımına 1800'lü yıllarda başlanmıştır. Fakat 1900'lü yılların başlarında ağırlık güç oranlarının az olması ve enerji elde ettikleri petrolün yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle içten yanmalı motorlar (İYM) otomobil sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3]. Batarya kapasitelerinin yetersiz olması nedeniyle elektrikli araç birçok açıdan üstün olmasına rağmen 1970'lere kadar geri planda kalmıştır. 1970'li yıllarda baş gösteren petrol krizi petrol fiyatının artmasına sebep olmuş ve araç firmaları tahrik teknolojisine göre elektrikli araçlara dair çalışmalarına başlanmıştır.

Elektrikli araçlar (EA) sahip oldukları tahrik teknolojisine göre üç farklı teknolojide sınıflandırılmaktadır. Bunlar hibrid elektrikli araçlar (HEA), yakıt hücresel elektrikli araçlar (YEA) ve tümüyle elektrikli olarak tasarlanmış araçlardır (TEA).

HEA'lar, içten yanmalı motorlar ile elektrik motorunun birlikte tahrik edildiği araçlardır [4]. HEA'larda elektrik enerjisi farklı yöntemlerle depo edilir. Depolanan enerjinin elektrik motorunda kullanılmasıyla, hem egzoz gazları açısından, hem de yakıt tüketimi açısından, içten yanmalı motora sahip mevcut araçlara göre üstünlükler sağlanmaktadır [5].

Tümüyle elektrikli olarak dizayn edilmiş araçlar uzun süreli sürüşe izin vermemesi, bataryalarının ağır ve verimlerinin düşük olması ile maliyetinin fazla olması gibi sebeplerden dolayı HEA'ları ön plana çıkarmaktadır. HEA'larda bulunan İYM sadece aracı tahrik etmek amacıyla kullanılmamaktadır. Aynı zamanda içten yanmalı motora sahip bir araçta ısı enerjisi olarak kaybedilen frenleme enerjisi ile elektrik motoru tahrik edilebilmekte böylece generatör olarak çalışması sağlanmaktadır. Ortaya çıkan enerji akülerde depolanmaktadır [6].

Yakıt hücreli elektrikli araçlar tümü ile elektrikli araçların uzun süreli sürüş sağlayamaması ve bataryaların uzun sürede şarj edilebilmesi sebebiyle öne çıkan bir araç tipidir [7]. Yakıt hücreli EA'lar, içten yanmalı motora sahip mevcut araçlara göre enerji bakımından daha verimli ve çevre dostu araçtır. Günümüzde kullanılan içten yanmalı motora sahip mevcut araçların egsoz emisyonları çevre kirliliğine sebep olmasından ötürü, yakıt hücreli EA'lar çevre dostu araç olarak tanımlanırlar. Yakıt olarak hidrojen kullanıldığından emisyon olarak çevre dostu su ortaya çıkmaktadır [8]. Menzil açısından YEA'lar diğer EA'lar ile karşılaştırıldığında ise, TEA'lar ve HEA'lar arasında bir menzile sahiptir. Hidrojenin depolanması ve yakıt hücre teknolojisinin pahalı olması bu aracın en önemli sıkıntısıdır [9]. Bu sıkıntılardan dolayı yakın gelecekte yaygın olarak kullanılmaları mümkün olmayan ancak uzun vadeli bir çözümdür.

Sıfır emisyonu sahip TEA'lar çevreye duyarlı araç olmaları nedeniyle fosil yakıtlı araçlara alternatif olarak gösterilmektedirler. Bu araçların ön plana çıkan özelliklerinden birisi de şarj işleminde aracın kolayca şebekeye bağlanıp batarya sisteminin şarj edilebilmesidir. Böylece elektrik olan her yerde bataryalar şarj edilebilmektedir. Araçların yaygın olarak kullanılmasını engelleyen etkenlerin başında uzun süreli sürüş sağlayamaması ve yüksek akü maliyetleridir [10]. TEA'ların menzilleri batarya teknolojisiyle artmaktadır [11]. İlerleyen batarya teknolojisi sayesinde batarya maliyetlerinin azalması öngörülmektedir. Bu gelişmelerle TEA'lar istenilen özelliklere kavuşmakta ve popülerlikleri, tercih edilebilirlikleri artmaktadır.

Tümüyle elektrikli bir araç temelde bir batarya, denetleyici kartı, elektrik motoru ve hız vb. algılayıcıdan oluşmaktadır. Elektrikli araçta tahrik kuvveti elektrik motorundan alınmaktadır. Elektrikli araç genel bir anlatımla batarya grubu, motor denetleyici sistemi, elektrik motoru ve mekanik ya da elektronik diferansiyelden oluşur. Elektrikli aracın hareketi elektrik motoruyla sağlamaktadır. Bu sistemde elektronik denetleyici sistemi motora verilecek akımı ve akım yönünü belirlemektedir. Elektrik motoru dönme hareketini difransiyeye iletirken, tekerleklerin

dönmesi sağlanmaktadır. Diferansiyel kutusu olarak anılan kısım mekanik ya da elektronik olabilmektedir.

Bu tez çalışması, bir ya da daha fazla BLDC motorunun kullanıldığı tümüyle elektrikli bir aracın motor denetimi için elektronik diferansiyel algoritması ve sürüş senaryosu geliştirme üzerinedir. Bu çalışmada iki BLDC motor ve bu motorları kontrol etmek için iki sürücü kartı, motorların hız bilgisi için iki enkoder, akım bilgisi için de iki akım sensörü ve haberleşmenin sağlandığı bir adet programlanabilir denetleyici kartı kullanılmaktadır. Motorun çektiği akıma göre yük durumu belirlenmekte ve yüke uygun bulanık mantık yöntemi ile PID seçimi yapılarak verimlilik ve performans arttırılmıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde, elektrikli araçlara kısa bir vurgu yapılarak, elektrikli araç gereksinimleri üzerinde durulacaktır. İkinci bölümde, literatür araştırmalarına değinilecektir. Üçüncü bölümde popülerliği gün geçtikçe artan EA'lar hakkında genel bilgiler verilecektir. EA'larda kullanılan sistemlerinden bahsedilerek, elektrikli aracı oluşturan temel yapılara değinilecektir. BLDC motor hakkında bilgi verilerek, kontrol yöntemlerine değinilip, elektrikli araçlarda BLDC motorun kullanımından, bu tip motoru kullanmanın getireceği fayda ve zararlardan bahsedilip, elektronik diferansiyele değilinerek, benzetim anlatılacak ve benzetime göre tasarlanan deney düzenekli sistem açıklanacaktır. Sonra benzetim ve deneysel veriler açıklanacaktır. Son kısımda ise, değerlendirme yapılarak, enerji verimliliği kıyaslanıp, tez çalışmasında karşılaşılan sorunlara ilişkin çözümlere değinilecektir.

BÖLÜM 2

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE TEKNOLOJİLERİ

Bu bölümde elektrikli araç denetim yaklaşımları üzerine yapılan akademik çalışmalar özetlenecek, elektrikli araçların günümüze kadar olan gelişimine kısa değinilerek, elektrikli araçların çalışması, türleri gibi genel konulardan bahsedilecektir. Tümüyle elektrikli araçların avantaj ve dezavantajlarına değinilerek, elektrikli araç bileşenlerinden kısaca bahsedilecektir.

2.1 ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM ÇALIŞMALARI

Elektrikli araçlarda yaygın olarak elektronik diferansiyel kullanılır. Literatürde elektronik diferansiyel üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır.

Merve Yıldırım ve arkadaşlarının, ön tekerleklere yerleştirilmiş HUB motor kullanılan bir elektrikli araç için elektronik diferansiyel modellemişlerdir. Ön tekerlek hızları, Codesys yazılım paketi kullanılarak Ackermann-Jeantand modelinden elde edilen denklemlerle tahmin edilmiş, ardından, elektronik diferansiyel system simülasyonu Matlab / Simulink tarafından yapılmıştır. Araç hızının ve direksiyon açısının değişimine göre, Codesys tarafından tahmin edilen ön tekerlek hızları Simulink sonuçları ile doğrulanmıştır. Modellenen elektronik diferansiyel sisteminin teker motora sahip araçlar için uygun olduğu gözlenmiştir [12].

Abdelfatah Nasri ve arkadaşları tüm tekerleklerinde indüksiyon motoru olan elektrikli aracın tahrik sistemi üzerine çalışmışlardır. Her tekerin patinaja girdiği durumda aracın davranışı incelenmiş, PI denetleyici kullanarak MATLAB / Simulink'te simüle edilmiştir. Tasarım performansının, değişen yol eğimlerinde olumsuz olarak etkilenmediğini belirtmişlerdir [13].

Melih Gürmeriç tasarladığı elektronik diferansiyel çalışmasında 2 farklı sürüş senaryosu için 2 farklı benzetim yapmış, oluşturulan senaryolara göre motorların hız, akım, gerilim ve tork farklılıklarını gözlemlemiştir. Tasarlanan sistem virajlarda tekerleklerin kaymadan döndüğü durumlarda yeterlidir. Bunun aksi durumlarda yetersiz kalmaktadır [14].

Anish Bahri ve arkadaşları aracın arkasına konumlandırılmış iki adet BLDC motorlu araca elektronik diferansiyel dizayn etmiş, motor kontrolünde Novel Wavelet yaklaşımını kullanmışlardır, denetleyici olarak PID denetleyici tercih etmişlerdir. Oluşturulan model MATLAB’da simüle edilip, motor hızlarındaki değişimler gözlemlenmiştir [15].

Hakan Kahveci ve arkadaşları yaptıkları çalışmada arka tekerleklere uygulanmış iki BLDC motorlu araç için elektronik diferansiyel tasarlamıştır. Motorların kontrolü için vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bulanık mantık PI denetleyici uygulanmıştır. Elektronik diferansiyel tasarımında, tekerleklerin hızlarını hesaplamak için Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Sistem MATLAB / Simulink programında simüle edilmiştir, elektronik diferansiyel uygulamasında bulanık mantık PI verilerinin daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir [16].

Krishnakumar ve Jeevanandhan yaptığı çalışmada fırçasız doğru akım motoruna sahip ticari araç için dört adet yarı iletken anahtara sahip düşük maliyetli sürücü tasarlamışlardır. İstenilen dinamik ve statik hız-moment özelliklerini üretmek için yeni bir akım kontrollü PWM şeması tasarlanmış ve başarı ile uygulanmışlardır [17].

Qi Huang ve arkadaşları elektrikli aracın denetimi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada kullanılan farklı motor tiplerini ve kontrol metodlarını incelemişlerdir. Dijital sinyal işleme (DSP) ile fırçalı DC motor kontrol üzerine uygulama yaparak çalışmalarını doğrulamışlardır [18].

Zkariah ve Yadaiah daha iyi performans elde etmek için darbe genişlik modülasyonu kontrol stratejisi Aduc812 mikro denetleyicisi kullanılarak uygulamış, ekonomik ve yüksek hızlı sürücü devresi sunulmuştur. Sunulan deneysel sonuçlar oluşturulan düzeneğin daha iyi performans gösterebileceğini kanıtlamıştır [19].

Guillermo A. Magall’an ve arkadaşları elektrikli taşıt ön modeli oluşturmuş, elektronik diferansiyel denetimi yapmıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken Ackermann geometrisinden yararlanılmıştır. Çalışmada dijital sinyal işleme ile 2 adet evirici üzerinden kontrol edilen 6kW’lık Asenkron Motor kullanılmıştır. Motorların kontrolünde vektör kontrol, PI denetleyici kullanılmıştır. Taşıt ivmelendirilerek, eğimli yolda manevra kabiliyeti simülasyon aracılığı ile incelenmiştir. Benzetim sonuçlarında arka iki tekerleğin hız değişimleri ve motorunların stator akımlarındaki değişimler gözlemlenmiştir [20].

P. He ve arkadaşları HUB motor kullanılarak hazırlanmış elektrikli araç için dinamik çekiş ve yön kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Yön kontrol için ileri yönlü kontrol ve durum geri beslemeli kontrol kullanılmıştır. Önerilen kontrol stratejileri araç üzerinde gerçekleştirilerek kıyaslanmıştır [21].

H. Fujimoto ve arkadaşları iki HUB motorun kullanıldığı elektrikli araçta yol tahmini yapmışlar ve hareketi iki bozucu etmen ile gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada hız, kayma açısı gibi bilgilere ihtiyaç duyulmamaktadır. Kapalı çevrim denetleyici teorik olarak analiz edilerek deneysel olarak doğrulanmıştır [22].

S. Sakai ve arkadaşları, dört tekerleği birbirinden bağımsız HUB motor olan elektrikli aracın kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada dinamik moment kontrolü simüle edilmiştir. Simülasyonda kaygan yoldaki sürüş probleminin yol sürtünmesinin azlığından olduğu tespit edilmiştir. Bu tesbit kayma saptama metodu çekiş kontrol sistemi tarafından gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, bu metodun aracın hız bilgisine gereksinim duymadan kayan tekerleği tespit ettiğini göstermiştir [23].

Bir başka çalışmada, 4 HUB motorlu elektrikli araç için elektronik diferansiyel tasarlanmıştır. Doğrudan moment denetimi yapılmıştır. Elektronik diferansiyel tasarlanırken direksiyon açısına dikkat edilmiştir. Tekerlek hız hesabında Ackermann geometrisi kullanılmıştır. Oluşturulan model MATLAB/Simulinkte simüle edilmiş, moment kontrolü incelenmiştir [24].

Başka bir çalışmada, aracın arka tekerleklerine yerleştirilmiş asenkron motora sahip taşıt için elektronik diferansiyel tasarlanmıştır. Motorların denetimi için vektör kontrol yöntemi tercih edilmiş, oluşturulan modelde MATLAB / Simulink benzetiminde sağ ve sol tekerleklerin dönüş anında kayma oranları gözlemlenmiştir. Tasarlanan elektronik diferansiyel ile taşıtın virajlarda stabil davranması sağlanmıştır [25].

PID uygulamalı elektronik diferansiyel çalışmasına örnek teşkil etmek amacıyla bu konu üzerine çalışma tercih edilmiş, yolun durumuna göre belirlenecek PID denetleyici katsayılarının bulanık mantık ile seçilerek enerji verimliliği ve güvenli sürüşün elde edilmesi amaçlanmıştır.

2.2 ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Elektrikli araç, hareketin sağlanması için elektrik motorunun kullanıldığı, bataryalardan ya da diğer enerji depolama aygıtlarında elde ettiği elektiriği hareket enerjisine çevirerek ulaşımı sağlayan araçlardır. Araçlar, içten yanmalı veya elektrikli motora sahip olmalarına göre 2'ye ayrılmaktadır. Fosil yakıtları ile çalışan içten yanmalı motor olan geleneksel araçlar ile elektrik motoruna sahip elektrikli araçlardır. Elektrikli araçlar da kendi içinde ikiye ayrılır. Birincisi hem içten yanmalı motoru hem de elektrik motoru olan hibrid araçlar iken diğeri ise sadece elektrik motoruna sahip tümüyle elektrikli olarak tasarlanmış araçtır.

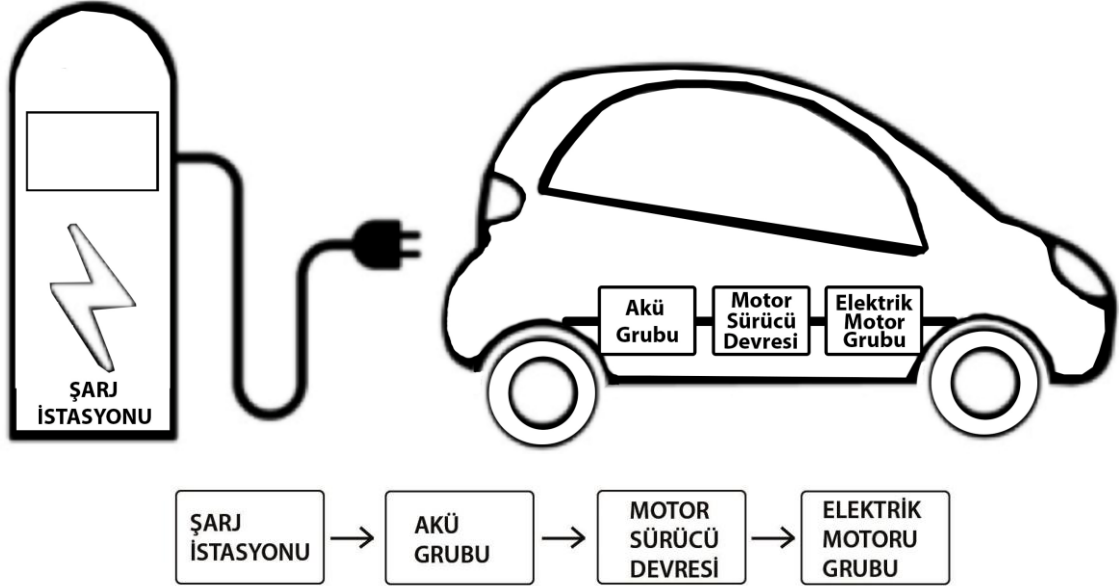
Buhar makinesinin icadıyla gelişen sanayi, üretim, tarım, ulaşım alanlarında da gelişimi hızlandırmıştır. Bu hızlı gelişim, insanların ulaşım ihtiyaçlarının çözümü için de geçerli olmuştur. Böylece farklı enerji kaynakları ile çalışan ulaşım araçları geliştirilmiştir. 19'ncü yüzyılın sonunda elektrik ve manyetik alanın keşfiyle elektrik ile çalışan ilk motorlu araçlar üretilmiş olup, fosil yakıtlarla çalışan ilk otomobiller de hemen hemen aynı yıllarda üretilmiştir. Fosil yakıtlı araçların üretildiği ilk yıllarda elektrikli araçların menzil ve batarya problemleri sebebiyle içten yanmalı motora sahip araç teknolojisi hızla gelişmiş olup, elektrik ile çalışan motorlu araç teknolojisi güç elektroniği ve bataryalar alanında yapılan gelişmelere kadar durmuştur [5].

Fosil yakıtların kullanımıyla oluşan karbondioksit, nitrojen oksitler gibi kirletici gazların atmosfere salınmasıyla atmosfer ısısında düzenli bir artış gözlemlenmiş ve sera etkisi ile iklimlerin değiştiği gözlemlenmiştir [26].

Ülkelerin gelecekte sorun yaşamamaları için başlattığı temiz enerji arayışları, küresel ısınma tehdidi ve fosil yakıtların kısıtlı oluşu sebebiyle hızlanmıştır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak, sıfır emisyonlu araçlar geliştirebilmek 1960'lı yıllardan itibaren için çeşitli fikirler ortaya atılmıştır. Batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin yeteri kadar gelişmiş olmaması nedeniyle, mevcut içten yanmalı araçların verimliliğinin artırılması fikri öne çıkmış, hibrid (melez) araçlar devri başlamıştır. Hibrid araçların gelişimine paralel olarak elektrikli motorla kontrol edilen tümüyle elektrikli araçlar da üretilmeye başlanmıştır. General Motors, Toyota, Chevrolet, Tesla, Renault, Venturi gibi önde gelen markaların seri üretim elektrikli araçları yollara çıkmıştır.

2.3 ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ

Elektrikli bir aracın temel bileşenleri elektrik motoru, hız vb. algılayıcılar, enerji depolama birimi ve elektronik diferansiyelin de sağlandığı motor denetleyici devresidir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere hareket elektrik motorundan alınmaktadır. Bu sebeple elektrikli araçlar çevre dostu, zararlı gaz emisyonları yok sayılan araçlardandır [27].

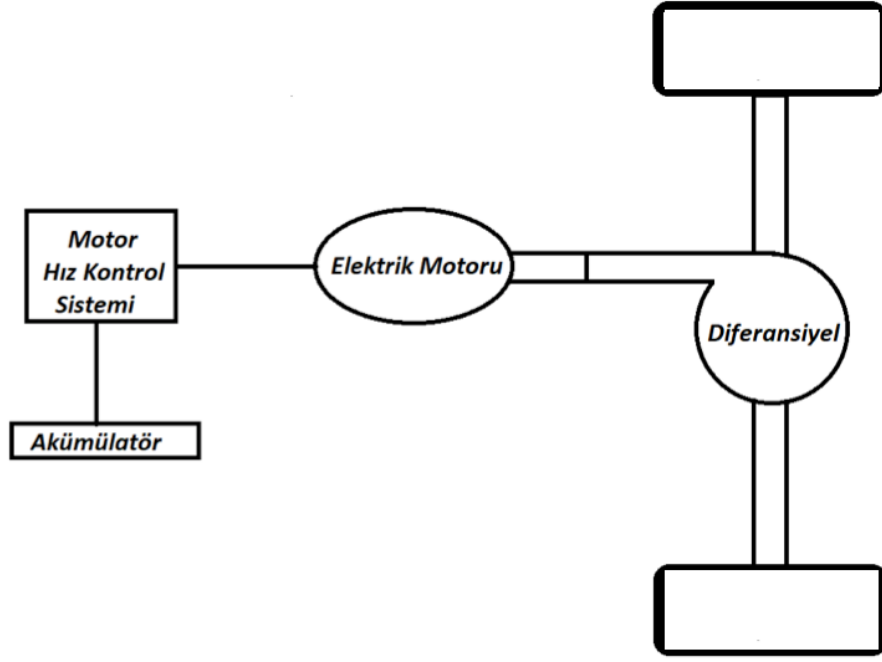


Şekil 2.1 Elektrikli Araç.

Elektrikli araçlar, enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistemi elemanlarının birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihlerine göre tanımlanmıştır. Elektrikli araç teknolojisinde yaygın olarak kullanılan konfigürasyonlar üç başlık altında sıralanmaktadır.

2.3.1 Tümü Elektrikli Araç (TEA)

Depolanan ya da üretilen tüm itici gücü elektrik olarak kullanan araçlar olan tümü ile elektrikli araçlar, birincil enerji kaynağına ek olarak yardımcı güç kaynakları da içermektedirler. Bu yardımcı güç kaynakları yokuş tırmanma ya da ivmelenme sırasında anlık yüksek güç ihtiyacına cevap verebilmektedir. Aracın yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması uzun süreli sürüş sağlarken, yüksek güç yoğunluğu ise ivmelenme ya da yokuş tırmanma gibi anlık yüksek güç ihtiyacını karşılar. Şekil 2.2’de Tümü ile Elektrikli Araç Blok Şeması verilmektedir. TEA’lar elektrik motorunun tahriki için gerekli olan enerjiyi bataryalardan elde etmekte ve elektronik diferansiyel yardımı ile optimum sürüş konforu sunmaktadır.



Şekil 2.2 Tümü ile Elektrikli Araç Blok Şeması.

TEA'ların güç ihtiyacı şarj edilebilir bataryalarında depolanmış olan elektrik enerjisi ile sağlamaktadır. Motor denetleyici ve elektronik diferansiyel gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak elektrik motoruna gidecek enerjiyi düzenlemektedir. TEA'lar içten yanmalı araçlara göre % 46 daha verimlidir. Bir başka deyişle elektrikli araç, bataryaların şarjı için prizden çekilen enerjinin % 46'sını tekerleklerde kullanılabilir hale dönüştürmektedir. İçten yanmalı motorlara sahip araçlarda yakıtın % 18–25'i kadarı tahrik için tekerlerinde kullanılabilen enerjiye dönüşmektedir.

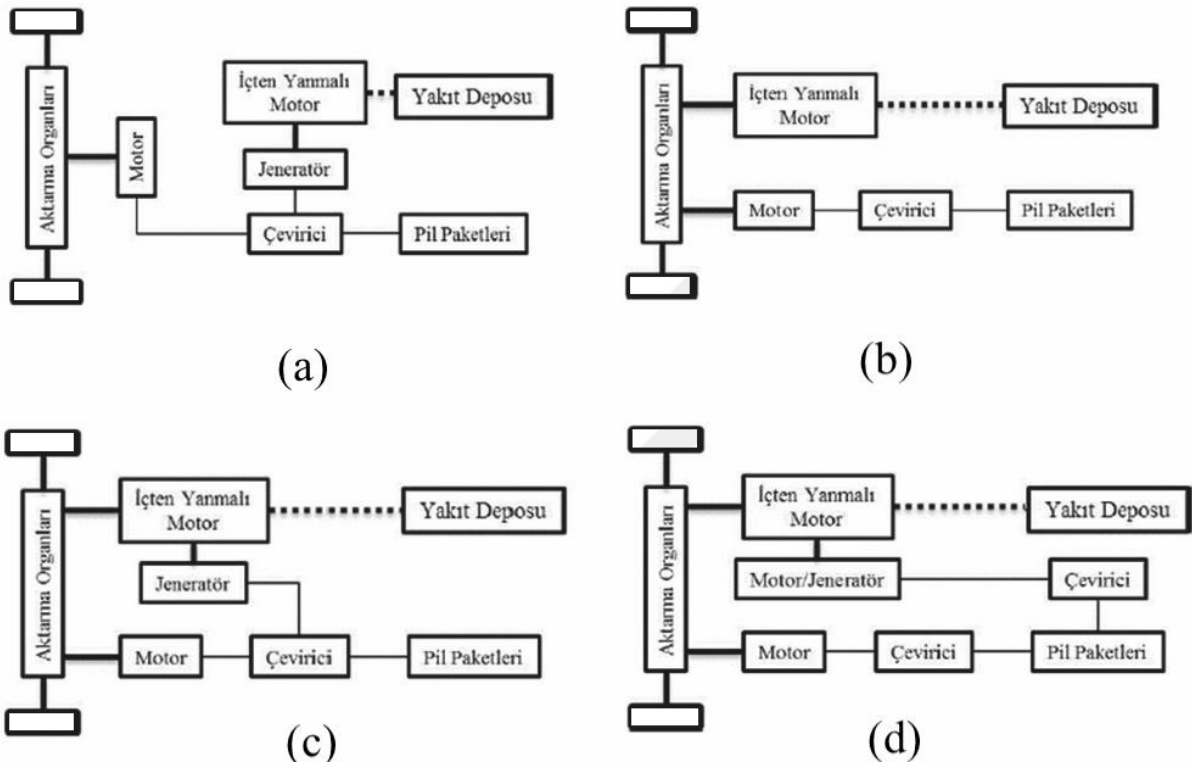
Tümü ile elektrikli araçlarda beklenen özellikler;

- Kalkış, yokuş tırmanma gibi durumlar için düşük hızlarda yüksek moment sağlama,
- Normal sürüş esnasında ihtiyaç duyulan yüksek hızlarda yüksek güç sağlama,
- Sabit moment ve sabit güç bölgelerini içeren çok geniş hız aralığı sunma,
- Anlık güç ve moment ihtiyacına hızlı cevap verebilme,
- Geri kazanımlı frenlemede yüksek verim imkanı sunmasıdır.

Elektrikli araçta tahrik sistemi, sürücü beklentisine, aracın kısıtlarına ve enerji kaynaklarına bağlı olarak seçilir. İvmelenme, tırmanma kabiliyeti, yüksek hız, frenleme ve menzil özellikleri sürücü beklentilerine örnek iken, araç çeşidi, ağırlığı, taşıdığı yük de araç kısıtlarına, akü, yakıt pili, volanlar da enerji kaynaklarına örnek olarak sayılabilir.

2.3.2 Hibrid Elektrikli Araç (HEA)

Hibrid elektrikli araç, en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği iki ya da daha fazla enerji deposuna sahip, hem içten yanmalı motorun, hem de elektrik motorunun kullanıldığı araç olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.3'te HEA sektöründe kullanılan hibrid elektrikli araç çeşitleri blok şema olarak verilmektedir. Hibrid elektrikli araçlar, İYM, transmisyon, elektrik motoru, yakıt deposu, bataryalar gibi alt elemanlardan oluşur.



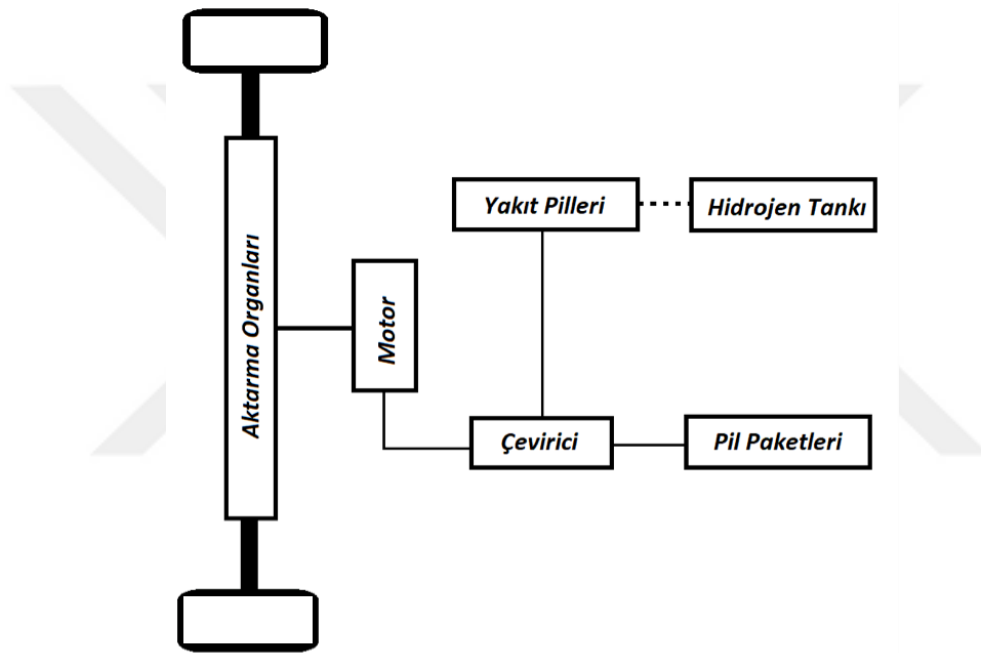
Şekil 2.3 Hibrid Elektrikli Araç Blok Şeması, Seri Hibrit (a) Paralel Hibrit açıklaması (b) Seri-Paralel Hibrit (c) Kompleks Hibrit (d)

Bir hibrid elektrikli araç, enerji dönüşüm sistemi, enerji depolama sistemi, güç kontrol ünitesi ve motordan oluşmaktadır. Bataryalar en çok kullanılan enerji depolama birimi olmasına rağmen, diğer enerji depolama alanlarında da çalışmalar sürmektedir. Otto motorlar, dizel motorlar, gaz türbinleri ve yakıt pilleri hibrid güç ünitelerindedir [28].

2.3.3 Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (YEA)

Yakıt hücreli elektrikli araç; yakıt depolama sistemi, yakıt hücresi kontrol ünitesi, güç kontrol ünitesi ve elektrik motoru v.b tahrik sisteminden meydana gelmektedir. Şekil 2.4'te yakıt

hücreli elektirikli araç blok şeması verilmektedir. Yakıt pilleri yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek, yakıt depolama sisteminde depolanan hidrojeni direkt olarak kullanmasıyla çalışır. Bir birim yakıt pilinin çıkış gerilimi 0,7 V mertebesindedir. Bu nedenle birkaç birim yakıt pili seri bağlanıp çıkış gerilimi artırılır. Yakıt pili ve elektrik motoru arasında gerilim değerinin yükseltilmesi için DC/DC çeviricisine, AC motor için DC/AC eviricisine, kontrol için mikroişlemci vb. dijital sinyal işlemcisine, rejeneratif frenlemede kullanılmak üzere bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt pilli elektrikli bir araçta süperkapasitörler bataryalar yerine kullanılmaktadır. Ancak, süperkapasitörlerin bataryaların yerini alması için daha çok geliştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.4 Yakıt Hücreli Elektrikli Araç Blok Şeması.

2.4 TEA'LARIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Elektrikli araçların başlıca avantajları;

- Zararlı emisyon açığa çıkmadığı için çevre dostu,
- İçten yanmalı motorlara göre oldukça sessiz çalışması,
- Yakıt ve bakım maliyetleri içten yanmalı araçlara göre daha düşük olmasıdır.

Elektrikli araçta güç, enerji depolama sistemi olan bataryalardan elde edildiğinden, TEA'larda çevreye zararlı emisyon açığa çıkmaz. Bataryaların şarj edilmesi için gerekli elektriğin

üretmesinde az miktarda çevreye zarar verici emisyonların açığa çıktığı gözlemse de bu miktar göz ardı edilmektedir.

- Bitmiş bataryaların yüksek geri dönüşüm maliyetleri ile kimyasal tehlike içermesi,
- Ağır bataryalar sebebiyle kısıtlı menzile sahip oluşu,
- Yüksek batarya maliyetleri ve uzun şarj süresi TEA'ların dezavantajlarındandır.

Petrol fiyatlarındaki artış ve kısıtlı fosil kaynakları sebebiyle TEA'ların kullanımının artması beklenmektedir. Ancak TEA henüz gelişmekte olan bataryalar gibi kritik parçaların nispeten sık yenilenmesi bu araçların kullanım maliyetini de arttırmaktadır. İçten yanmalı motora sahip aracın deposu birkaç dakikada doldurulmasına rağmen, bir TEA'nın bataryasının tamamıyla şarj olması nispeten uzun zaman gerektirmektedir. Bazı yüksek hızlı şarj cihazları kısa sürede bataryaları %80 kadar dolulukta şarj edebilse de henüz yaygın olarak kullanılmamaktadırlar.

2.5 ELEKTRİKLİ ARAÇ SİSTEMLERİ

Elektrikli araçlarda güç üretim sistemleri, enerji depolama sistemleri, güç kontrol sistemleri gibi çeşitli alt sistemler kullanılmaktadır. Bu bölümde bu konulardan kısaca bahsedilecektir.

2.5.1 Enerji Depolama Sistemleri

Elektrikli araç uygulamalarında kritik bileşenlerden olan bataryaların yüksek güce, enerjiye ve uzun süre kullanıma sahip olması beklenmektedir. Enerji kaynağının birim kütlede depolanan enerji miktarı enerji yoğunluğunu gösterir, enerji kaynağının birim kütlede verdiği güç ise özgül güç olarak ifade edilmektedir.

Çalışma sıcaklığı batarya tipinin belirlenmesinde önemli bir faktördür [3]. Sodyum-sülfür, sodyum nikel klorür, lityum – demir sülfür gibi daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bataryalar için özel sistemlerin kurulmasına ihtiyaç duyulur [3]. Batarya ömrü elektrikli araçlarda önemli faktörlerdendir. Bir bataryanın yaklaşık olarak 3-4 yıllık bir kullanım ömrüne karşılık gelen 1000 çevrim ömre sahip olması beklenmektedir. Bir çok bataryada derin deşarj bataryanın hem enerji hem de güç yoğunluğunu bir miktar azaltmaktadır [3]. Bu nedenle bir bataryanın performansı düştükçe ömrü de azalmaktadır.

Günümüzde EA'lar maliyet açısından değerlendirildiğinde, en az maliyetli bataryanın kurşun-asit olduğu görülmektedir. Enerji yoğunluğu oldukça düşük olan kurşun-asit bataryalar, nikel kadmiyum, nikel metal hidrür, lityum iyon bataryaların gelişimine sebep olmuş ve bu yeni tip bataryalar yüksek enerji yoğunluğu sunmuşlardır. Yüksek sıcaklık bataryalarından olan sodyum sülfür bataryalar elektrikli araçlarda kullanım alanı bulmaktadırlar.

2.5.2 Güç Denetim Sistemleri

Güç elektroniği devreleri elektrikli araçlarda önemli yer tutan bileşenlerdendir. MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Insulated gate bipolar transistor), IGCT (Insulated gate controlled thyristor) ve MCT (mos controlled thyristor) gibi yarı iletken malzemelerin gelişmesi ile elektronik alanında önemli ilerlemeler elde edilmiştir. Tahrik sisteminin denetimi, üretilen AC gerilimin DC'ye çevrilmesi, yakıt pilinin çıkış geriliminin düzenlenmesi, akü şarjının sağlanması güç denetimi aşamalarıdır.

Elektrikli araçlarda kullanılan güç kontrol sistemleri, klasik güç elektroniği devrelerinden oluşmaktadır. Bu devreler;

- Doğrultucular (AC / DC)
- Konvertörler (DC / DC)
- Eviriciler (DC/AC) olarak sıralanabilir.

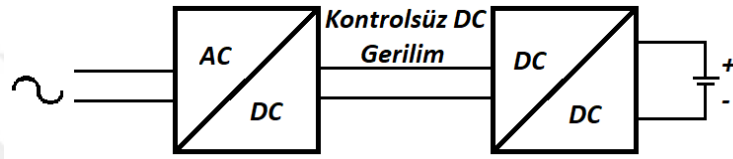
Motor sürücü, motorun yön, hız gibi özelliklerinin frekans vb. değişkenlerle oynanmasıyla denetlenmesini sağlayan elektronik devrelerdir. Frekans, genlik vb değişkenlerle hız ve yön kontrol edilir. BDLC motorların kontrolünde sensörlü ya da sensörsüz Back EMF gibi yöntemler kullanılırken, dalga şekilleri olarak trapezoidal, sinusoidal dalga kullanılır [29].

Alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesinde doğrultucular kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te doğrultucu blok şeması görülmektedir. Kontrollü ve kontrolsüz olarak 2 gruba ayrılan doğrultucular çıkış gerilimine göre isimlendirilmektedir. Kontrolsüz doğrultucu olarak anılan doğrultucularda çıkış gerilimi kontrol edilmemekte ve ortalama çıkış gerilimi AC kaynaktaki gerilim değişimlerinden ve yükten etkilenmektedir. Yarı iletken anahtarların anahtarlama açılarının kontrol edilmesiyle sabit çıkış gerilimi elde edilerek kontrollü doğrultucular yapılmıştır.



Şekil 2.5 Doğrultucu Blok Şeması.

Doğrultucuların, TEA'larda kullanım alanı akü şarj devreleridir. Akülerin şarj edilmesinde kullanılan akü şarj sisteminin parçası olan doğrultucu devreleri, şebeke gerilimi kontrolsüz doğrultucu ile doğrultur, sonra da bir DC/DC çevirici ile uygun şarj algoritması kullanılarak aküleri şarj eder. Şekil 2.6'da akü şarj sisteminin blok şeması verilmektedir.



Şekil 2.6 Akü Şarj Sistemi.

DC - DC çevirici olarak da tanımlanan konvertörler, regüle edilmemiş DC gerilimin, kontrollü olarak sabit DC gerilime dönüştürülmesinde kullanılırlar. Regüle edilmemiş DC gerilim kaynağı olan aküler ve yakıt pillerindeki gerilim kontrollü olarak DC gerilime dönüştürülür.

Çeviriciler, yarı iletken anahtarların bir periyot içerisinde aktif ve pasif olması ile ortalama giriş geriliminden farklı bir çıkış gerilimi elde edilmesi prensibine göre çalışırlar. Sabit bir anahtarlama frekansında, yarı iletken anahtarın iletim veya kesim süresinin ayarlanması en yaygın denetim yöntemidir. Yarı iletken anahtarın iletim veya kesim süresinin anahtarlama periyoduna oranının değiştirilmesi ile oluşturulan darbe genişlik modülasyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde çıkış geriliminden geri besleme alınır ve istenilen gerilim bir referans işaretle karşılaştırılır. Karşılaştırmada elde edilen fark hata işaretidir. Aralarındaki fark yani hata işareti bir güçlendiriciden geçirildikten sonra, frekansı anahtarlama frekansına eşit olan testere dişli dalga ile kıyaslanır. Kontrol işaretinin, testere dişli dalgadan yüksek olduğu süre boyunca yarı iletken anahtar kontrol işareti üretir.

Elektrikli araçlarda DC/DC çevirici yani konvertörler farklı DC gerilim seviyesine sahip sistemlerin birbirine akuple edilmesinde ve DC motorun denetiminde kullanılırlar. Çıkış

gerilimlerinin yüke ve bazı diğer koşullara göre değişim göstermesi sebebiyle akü veya yakıt pili ideal gerilim kaynakları olarak kabul edilmezler.

DC giriş voltajının AC voltaja çevrildiği güç elektroniği devrelerine eviriciler denilmektedir. İdeal eviricinin çıkış gerilimi sinüzoidal dalga şeklinde olması beklenir. Ancak uygulamada ideal evirici ile tam olarak karşılaşılmaz ve çıkış gerilimi tam olarak sinüzoidal değildir ve bir miktar harmonikler içerir. Yüksek hızlı yarı iletken anahtarların farklı anahtarlama teknikleri kullanılmasıyla çıkış gerilimindeki harmonikler azaltılmaktadır. Çıkışı kare dalga olan eviriciler de bu harmonikleri yok etmekte kullanılmaktadır. Sinüzoidal PWM, histerisiz bant PWM ve uzay vektörü PWM anahtarlama için kullanılan PWM tekniklerinden bazılarıdır.

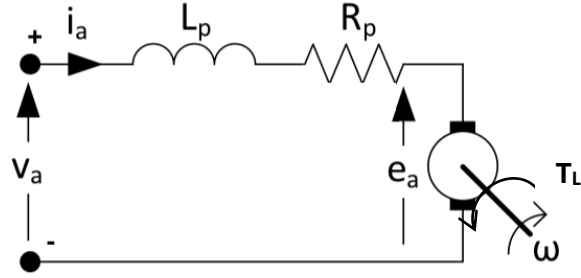
2.5.3 Elektrik Motorları

Güç elektroniği ve yarı iletken malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle, elektrikli araç sistemleri her geçen gün gelişme göstermektedir. Bugüne kadar farklı elektrik motorları TEA'larda ve HEA'larda denenmiştir. Bunlardan yaygın olarak kullanılanlar şunlardır; AC indüksiyon motoru, fırçasız DC motor, fırçalı DC motor, kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) [29]. Elektrikli araçta motor seçilirken motorun denetim kolaylığı, verimi, bakım kolaylığı ve maliyeti ile ömrü gibi etkenler dikkate alınır. Denetim sisteminden hızlı tepki vermesi ve dalgalanmaların az olması beklenir. Bu bölümde, elektrikli araçlarda kullanılan dört tip motor kısaca ele alınacaktır.

Fırçalı doğru akım motorlarında güç kaynağındaki enerjinin DC olması ve denetiminin kolay olması sebebiyle DC motorların kullanımı elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Fırçalı DC motorlarda seri, şönt ve yabancı uyarımlı olmak üzere 3 tip sargı vardır [29]. Zayıflamış manyetik alanda besleme geriliminin azalması ve bu sebeple zıt-EMK'nın azalması, hızın artma eğilimi gibi sebeplerden dolayı şönt motor denetimi zordur. Yabancı uyarımlı doğru akım motoru herhangi bir açısal hızda istenilen torku elde etmek için manyetik akı ve besleme geriliminden birinin bağımsız olarak denetimine izin verir [29].

Fırçalı DC motorların ömürlerinin kısa olması ve sık bakım gerektirmesi dezavantajlarındandır. Bu sebeple fırçasız DC motorlar geliştirilmiştir. Fırçasız DC motorlarda rotorda dönen daimi mıknatıs kullanılırken, motor gövdesinde sabit elektro mıknatıslar kullanılır. Şekil 2.7'de Fırçasız motor tek faz eşdeğer devresi görülmektedir.

Motor sürücü sayesinde DC AC'ye dönüştürülür. Bu tasarım motorun dışından dönen rotor kısmına güç transferini ortadan kaldırdığı için fırçalı motorlara göre daha basittir. Fırçasız DC motorlar uzun ömür, az bakım ihtiyacı, yüksek verimlilik ve yüksek performans sebebiyle fırçalı DC motorlara göre daha avantajlıdır. Dezavantajları ise yüksek başlangıç maliyeti ile daha karmaşık motor denetimine sahip olmalarıdır [6].



Şekil 2.7 Fırçasız DC Motor Tek Faz Eşdeğer Devresi.

A fazı için eşdeğer devre, Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Armatür bobininin elektriksel eşdeğeri, gerilim kaynağı V_a ile seri bağlı R_p rezistansı ile seri bağlı L_p endüktansı ve seri endüklenen motor gerilimi ile tarif edilir. Bu voltaj zıt EMK (Back EMF) olarak adlandırılır. Fırçasız DC motor tek faz eşdeğer devresi eşitlik 2.1 ve 2.2'deki matematiksel ifadeler ile modellenir ki bu ifade de V_a kaynak gerilimini, e_a zıt EMK'yı, i_a akımı, w motor hızını, T_L yük değişimini ifade ederken, R_p statorun direncini, L_p statorun endüktansını, J toplam atalet momentini, K_f sönümleme sabitini, K_m tork sabitini temsil etmektedir [29].

$$V_a(t) = (R_p \cdot i_a(t)) + L_p \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (2.1)$$

$$K_m i_a(t) = (K_f \cdot w(t)) + J \frac{dw}{dt} + T_L(t) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.1 - 2.2 kullanılarak BLDC motorun 3 fazına ait voltaj denklemi eşitlik 2.3'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p & 0 & 0 \\ 0 & R_p & 0 \\ 0 & 0 & R_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_p & 0 & 0 \\ 0 & L_p & 0 \\ 0 & 0 & L_p \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

BLDC motorun 3 fazına ait tork denklemi eşitlik 2.4'te, her faza ait tork denklemi eşitlik 2.5, 2.6, 2.7'de, motorun fazları ile ilişkili tork denklemi de eşitlik 2.8'de gösterilmektedir.

$$T_{em} = k_e \cdot i_{dc} \quad (2.4)$$

$$T_{em,a} = k_e \cdot i_a \cdot g_a(\phi_m) \quad (2.5)$$

$$T_{em,b} = k_e \cdot i_b \cdot g_b(\phi_m) \quad (2.6)$$

$$T_{em,c} = k_e \cdot i_c \cdot g_c(\phi_m) \quad (2.7)$$

$$T_{em} = T_{em,a} + T_{em,b} + T_{em,c} \quad (2.8)$$

Burada i_{dc} hat akımını, ϕ_m rotor pozisyonu, i_a , i_b , i_c faz akımlarını, k_e zıt EMK sabitini temsil eder. g_a , g_b , g_c zıt EMK şekil fonksiyonlarını mekanik dönme hızına normalize eder.

Genellikle BLDC motor rotor, stator, denetleyici ve pozisyon sensöründen oluşmaktadır. BLDC motorda, elektro mıknatıslar hareket etmez. Bunun yerine, sürekli mıknatısların bulunduğu rotor dönerken sargıların olduğu stator sabit kalır. Fırçasız doğru akım motorunda, durum değişkenlerine göre kontrol için konum sensörleri de kullanılmaktadır [30].

AC indüksiyon motorunda ise dönme iki manyetik alanın birbiri ile etkileşimi ile sağlanır. Elektrik motor tasarımında manyetik alan içindeki iletkenlerin yerleşimi dikkate alınır. Motor sargısı birçok iletkenle meydana gelir. Sargıdan geçen akıma ve manyetik alan şiddetine bağlı olarak sargıda kuvvet oluşturulur. Yüksek tork eldesi için sargılardan yüksek akım geçmelidir, böylece yüksek dönme momenti elde edilir [30].

Döner bir transformatör olarak kabul edilen indüksiyon motorunda, transformatörün statoru olarak adlandırılan birincil sargısına gerilim uygulanırsa sargılardan akım akar, dönen kısmı rotor olarak adlandırılan ikincil sargıda ise gerilim indüklenir. Birinci manyetik alan statorda meydana getirilir ve ikinci manyetik alan rotorda indüklenir. Bu iki manyetik alanın etkileşimi ile motorda dönme hareketi elde edilir [29].

Rotorun hızı stator etrafında dönen manyetik alanın hızı tarafından belirlenir. Rotor, statorun hızında dönmek ister. Teorik olarak rotor hızının stator hızına eşitlendiği hıza senkron hız denir. Ancak motor yüklendiğinde iki manyetik alan arasında fark oluşur. Statorun manyetik alan hızını gecikmeli olarak takip eden rotor sebebiyle indüksiyon motorlarına asenkron motor da denir [29].

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda manyetik alan uyartım sargılarının yerine mıknatıs kullanılan motorlardır. Bu tip tasarımda uyartım sargısı olmadığından rotor bakır kayıpları, uyarma devresi bakım gereksinimleri ortadan kalkar. Sürekli mıknatıslı (SM) motorlar genellikle 2 gruba ayrılırlar.

- SM Senkron motorlar: Asenkron motorlardaki gibi düzenli olarak dönen stator manyetik alanına sahiptir.
- Kare Dalga SM motorlar: Fırçasız DC motor olarak da adlandırılan bu motorlarda stator sargıları ayırık zamanda kare dalga ile beslenir.

Rotor ve stator arasındaki akı yoğunluğunun artışına uyartım için kullanılan mıknatıslar sebep olur. Akı yoğunluğunun artışı, güç yoğunluğu (W/kg) ve eylemsizliğe göre moment (Nm/kgm²) artışına da sebep olur [29].

Ferrit, samaryum kobalt (SmCo) ve neodmiyum-demir boron (NdFeB) olmak üzere 3 tip mıknatıs sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılır. Yüksek ısı ve yük koşulları, mıknatısların özelliklerini kaybetmelerine neden olabilmektedir. Bunu için SM makina tasarımında mıknatıs korunmasına yönelik uygun önlemler alınır.

Kayma açısı hesaplanmaması nedeniyle sürekli mıknatıslı motor denetimi asenkron motora göre daha kolaydır. Kafesiz yapıdaki rotor elektriksel cevap süresinin azalmasını sağlar. Ancak daha düşük zaman sabitine sahip asenkron motorun cevap süresi daha kısadır. Aynı güç oranı dikkate alındığında, asenkron motor sürekli mıknatıslı motora göre daha büyüktür. Rotor bakır kayıpları olmaması sürekli mıknatıslı motorlara avantaj sağlamaktadır. Buna karşın asenkron motor fiyat açısından SM motora üstünlük sağlamaktadır.

Sürekli mıknatıslı senkron motorun hız denetiminde yaygın olarak vektör kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Motor senkron hızda döndüğünden vektör denetimin uygulanması kolaylaşmaktadır. Ancak senkron motor hız denetiminde yüksek çözünürlüklü pozisyon sensörü kullanılmalıdır [29].

Fırçasız doğru akım motor hız denetimi ise daha kolaydır. Fazlara uygulanan gerilimler kare dalga şeklindedir ve konum belirlemek için yalnızca 3 adet akım sensörü kullanmak yeterlidir. Üç fazlı kare dalga evirici ile hız denetimi sağlanır [29].



BÖLÜM 3

BLDC MOTOR VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANIMI

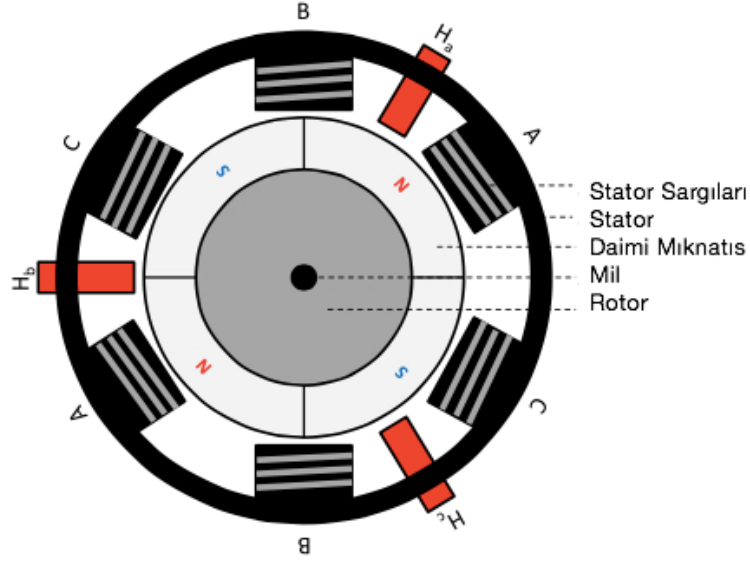
Bu bölümde bir fırçasız DC motor ele alınacaktır. BLDC motorun çalışma prensipleri, modellenmesi, araçlarda kullanımı, bu tip motoru kullanmanın getirdiği avantaj ve dezavantajları üzerinde durulacaktır. Burada sistemde kullanılan bulanık mantığa da kısaca değinilecektir.

3.1 BLDC MOTORUN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Fırçasız motor, fırça ve komütatöre sahip bir doğru akım (DA) servo motoruna benzer performans elde etmek için, fırça ve komütatör takımının mekanik sınırlamalarını ortadan kaldırmak amacıyla komütasyon işlemi elektronik olarak yerine getirilecek şekilde tasarlanmıştır [31].

Motor rotor ve stator kısımlarından oluşur. Stator kısmında faz sargıları ve rotor yatakları vardır. Bu motorun rotor kısmında güçlü doğal kalıcı mıknatıs kullanılmakta olup, manyetik akım kaynağıdır. Fırçasız doğru akım motorunda (BLDC) stator ve rotorun yeri değişmiştir. Bu yapısı sebebiyle içi dışına çevrilmiş DC motor gibidir de denilmektedir. Şekil 3.1’de BLDC motor kesidi ile stator ve rotor yerleşimi verilmektedir [31].

BLDC motorda fırça ve kollektör bulunmaz, bu yüzden bu motorlara fırçasız doğru akım motoru denir. Komütasyon işlemi, doğru akım makinalarında endüvi sargılarında akım yönünü değiştirme işlemidir. BLDC motorda fırça ve komütatörün yerini yarı iletken anahtarlar almıştır. Motorun otomatik olarak çalışması için konum sensörü ve inveröre ihtiyaç vardır. İnvörtör konum sensöründen gelen bilgiye göre komütasyonu sağlamak için kullanılır. Otomatik çalışma, tetikleme sinyallerine göre çıkış üreten invertor ile sıralı olarak stator sargılarının enerjilendirilmesi ile sağlanır [31].



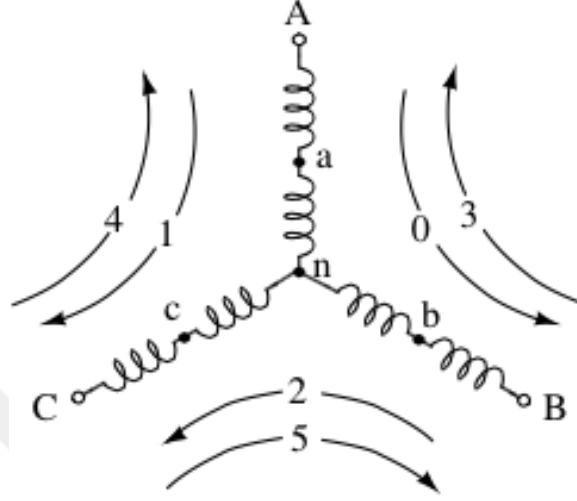
Şekil 3.1 BLDC Motor Kesidi ve Rotor Stator Yerleşimi.

Fırçasız DC motorun, dönen bölümü endüvi olarak da adlandırılan rotoru sabit mıknatıstan, duran kısım olarak anılan stator ise bobin sargılardan meydana gelmektedir. Yapı olarak, AC senkron motora benzer. Stator tarafından elde edilen manyetik alan ile rotor tarafından oluşturulan manyetik alan aynı frekansta döner. Fırçasız DC motorların AC motordan farkı, sargılarını enerjilendirirken endüvi yerlerinin bilmesi gerekliliğidir. Rotordaki mıknatısların konumunu belirlemek için, durum sensörleri ya da optik sensör adı verilen etkili sensörler veya faz akımlarının kontrolü ile gerçekleştirilmektedir [31].

Sabit mıknatıslı endüvinin kutup sayısı genellikle iki ile sekiz arasında değişmektedir. Endüviden istenen manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak malzeme seçimi yapılır. Genellikle ferritten yapılan Neobidyum-Ferrit-Boron, Neobidyum vb. alaşımlardan yapılan mıknatıslar kullanılmaktadır.

Fırçasız DC motorda rotor tipleri; endüvi milin üzerine yerleştirilmiş kalıcı mıknatıs, endüvinin gövdesine yerleştirilmiş kalıcı mıknatıs, endüvi oyuklarına yerleştirilmiş kalıcı mıknatıstır. Fırçasız DC motorda endüktör sıkıştırılan ince çelik plakaların meydana getirdiği yarıklara sarılan sargılardan meydana gelmektedir. Bir yada birkaç bobin birbirini kesecek biçimde bağlanarak, endüktörün etrafına dağıtılmaktadır. Şekil 3.2’de faz enerjilendirme sırası gösterilmektedir. Endüktöre sargılar genellikle yıldız bağlı biçimde sarılmaktadır. Yıldız bağlantı her üç sargıyı tek bir merkezde bağlar. Gerilim açıkta kalan uçlardan verilmektedir. Fırçasız DC motorlarda, birinci sargıya (+) alternans, ikinci sargıya (-) (GND)

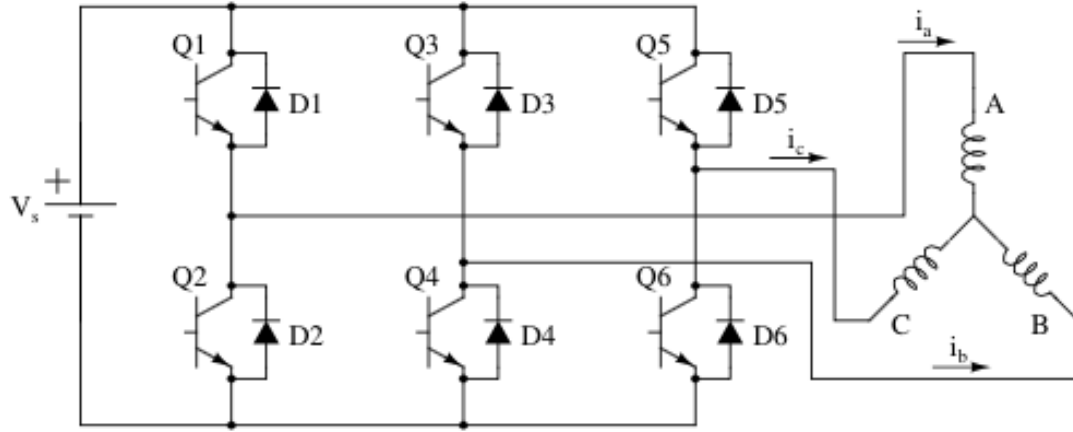
alternans verilir ve çalıştırılır. Üçgen sargı enerjisizdir, yani boşta. Bu prensibe göre; yıldız bağlantıda iki sargı seri olduğundan manyetik alan şiddetlidir. Bu da yüksek tork, düşük hız sağlar ve gerilim yüksek, akım düşük olur [31].



Şekil 3.2 BLDC Motor Faz Enerjilendirme Sırası.

Fırçasız DC motorlarda sargılara enerji iletimi elektronik anahtarlarla gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.3’de BLDC motor sürücü güç kısmına ait blok şema verilmektedir. Fırçasız DC motorun hızını ve dönüş yönünü ayarlamak için kullanılan sürücü devresinde Mosfed, IGBT gibi yarı iletkenler tercih edilmektedir [31].

Motor sürücü güç kısmında kullanılan yarı iletkenler uygun sırayla ilettime veya kesime geçerek motoru kontrol etmektedir. İvertördeki 6 transistörden 2 tanesi aynı anda aktif olacak şekilde biri yüksek, diğeri düşük taraf olacak şekilde tetiklenir. Çizelge 3.1’de motorun anahtarlama sırası görülmektedir. Motorun A fazıyla Q1’den pozitif akım, motorun B fazıyla da Q4’den negatif akım geçer. C fazı boşta. Rotorun belirli açılarda dönmesiyle yeni faz aktif duruma gelmeli, aktif fazlardan birisi kesime geçmelidir. Böylece motorun dönmesi sağlanır.



Şekil 3.3 BLDC Motor Sürücü Güç Kısmı Blok Şeması.

Çizelge 3.1 Motorun Anahtarlama Sırası.

Anahtarlama Aralığı	Sıra No	Sensör Durumu			Anahtar Kapalılık		Faz Akımları		
		Hes1	Hes2	Hes3			A	B	C
0° - 60°	0	1	0	0	Q1	Q4	+	-	Off
60° - 120°	1	1	1	0	Q1	Q6	+	Off	-
120° - 180°	2	0	1	0	Q3	Q6	Off	+	-
180° - 240°	3	0	1	1	Q3	Q2	-	+	Off
240° - 300°	4	0	0	1	Q5	Q2	-	Off	+
300° - 360°	5	1	0	1	Q5	Q4	Off	-	+

Darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation – PWM), darbe genişliklerinin kontrol edilerek, çıkışta üretilmesi istenen analog elektriksel sinyalin elde edilmesi tekniğidir. Doğru akım devrelerinde gerilim değeri olarak ortalama gerilim değeri ele alınır. Bu nedenle yarı iletken anahtarın iletimde ya da kesimde kalma süresi değiştirilmesi ile ortalama gerilim değeri değiştirilir. PWM olarak adlandırılan bu yöntemde çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasındaki oran görev periyodu (D) olarak ifade edilir. Anahtarın iletimde kalma süresinin, anahtarın iletimde ve kesimde kalma süresinin toplamına oranı şeklinde de ifade edilen görev periyodu eşitlik 3.1 ile elde edilmektedir.

$$D = V_{\check{c}} / V_g = t_{on} / (t_{on} + t_{off}) \quad (3.1)$$

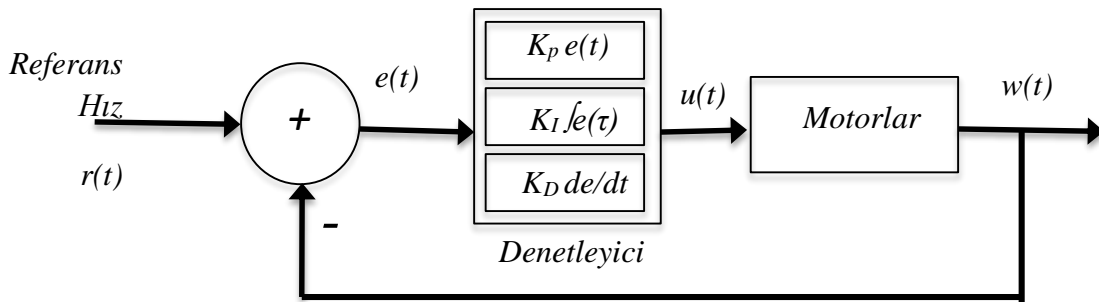
Eşitlik 3.1’de, $V_{\check{c}}$ çıkış gerilimi, V_g giriş gerilimidir. t_{on} anahtarların iletimde olduğu süre, t_{off} anahtarların kesimde olduğu süredir.

PWM yöntemi, minimum kayıp oluşurken hızlı şekilde gerilim kontrol edilir. Motor hız kontrolünde PWM çalışma oranının kontrolü için P, PI, PID, Fuzzy vb. kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında PID denetleyici yaklaşımı kullanılmıştır.

3.2 PID (ORANSAL- INTEGRAL-TÜREVSEL) DENETLEYİCİ

PID denetim yaklaşımı, geri beslemenin etkin biçimde kullanıldığı üretime yönelik faaliyet gösteren alanda kullanılan en yaygın ve bilinen geri beslemeli denetim şeklidir. Uygulamanın kolay olmasının yanı sıra anlaşılır ve güvenilir algoritması ile mükemmel performans eldesi sağlamaktadır. Dinamik özellikleri ile sanayideki uygulamalarda en çok tercih edilen denetim tipi olarak öne çıkmaktadır [32].

P ile temsil edilen oransal kazanç, anlık hata değerinin belirli bir katıyla çıkışı denetleyen değişkendir. Toplamsal etkiye sahip I integral değişkeni, mevcut hata ile önceki hataların toplamıyla çıkışa etki eden değişkendir. Değişim miktarı yani D türevsel etkiye sebep olur. Bu da mevcut hatanın bir önceki hata değişim miktarıyla çıkışa etki eden değeridir. Sistemin çıkışı bu üç değişkenin etkisiyle denetlenir [32]. Şekil 3.4’de PID blok şema gösterilmektedir. Bu geri beslemede hata sifira yaklaştıkça P ve D’nin etkisi azalır. P hatanın bir katı olduğundan hata yok olmaya yaklaşır, hata değişimi azaldıkça türevsel değişken D de azalır, sistem çıkışı integral etkisi altına girer ve sistem integrale denetim altına alınır. Integralin devrede olması gerçek değer set edilen değere gelene kadar harcadığı sürede girişten aldığı örneklerin toplanmasıyla oluşan kontrol değeridir.



Şekil 3.4 PID Blok Şeması.

İzleme hatası olan $e(t)$, istenilen giriş değeri olan $r(t)$ ile çıkış değeri $w(t)$ ile arasındaki farktır. $e(t)$, izleme hata sinyali PID denetleyiciye gönderilir ve denetleyici bu hata sinyalinin hem türevini hem de integralini hesaplar. Denetleyiciden geçen $u(t)$ sinyali; oransal kazanç

(K_P) ile hata değeri çarpımına, integral kazancı (K_I) ile hatanın integrali, türevsel kazanç (K_D) ile çarpımlarının toplamına eşittir. Denetleyiciden geçen sinayali eşitlik 3.2 ve eşitlik 3.3'te ile elde edilir.

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$$K_I = \frac{1}{T_i}, K_D = T_d \quad (3.3)$$

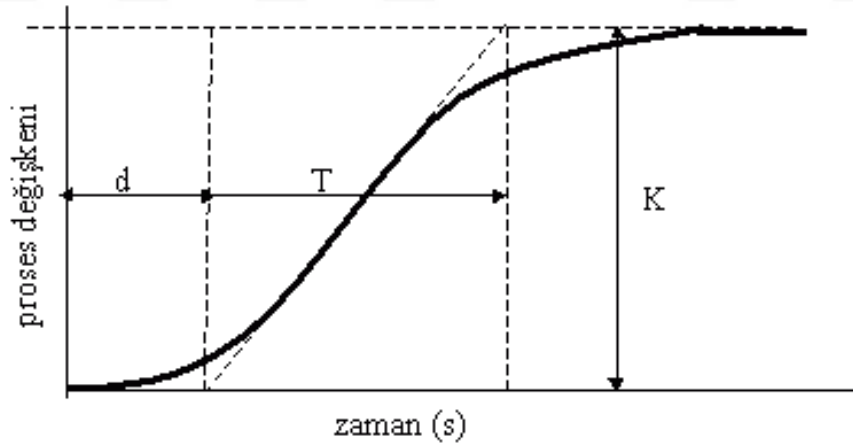
Denetleyiciden geçen v sinyali denetlenen sisteme gönderilir ve yeni çıkış elde edilir. Çıkış sinyali algılayıcıya geri besleme ile gönderilerek yeni hata sinyali bulunur. Denetleyici yeni hata sinyaline aynı işlemleri uygular ve bu işlem istenilen çıkış sinyali elde edene dek devam eder.

PID denetleyicide kullanılan katsayıların değerleri bazı sonuçlara sebep olur. Örneğin, oransal denetleyici katsayısı (K_P) anlık hata düzeltmesi sağlarken örnekleme zamanından bağımsız şekilde işler. Yüksek oransal denetleyici katsayısı düşük hız hatası ile dinamik bir cevap elde edilmesini sağlarken, kararsızlığa ve osilasyona sebep olur. İntegral denetleyici katsayısının (K_I) kararlı hal hatasının çıkarılmasına etkisi vardır. Yüksek K_I değeriyle hızlı hata düzeltmesi ve iyi dinamik cevap elde edilirken, aşım ve kararsızlık elde edilir. Türevsel denetleyici katsayısı (K_D) sistem kararlılığının artmasını sağlar, geçici tepkiyi düzeltir. Sonuç olarak katsayıları tek tek ele alırsak öncelikle oransal kontrol katsayısı K_P 'nin etkisini anlamak gerekir. PID formülünde integral katsayısı için ∞ , türevsel katsayı için 0 konursa formülde sadece oransal kontrol kalır. Sadece oransal denetleyicinin kullanıldığı sistemde ancak kararlı sistem kontrol edilebilir. Performansı sınırlı olup, sürekli hal hatasını yok edememektedir. Oransal kontrol edilen sistemlerde kazanç yükselirken, hata azalır, sistemin osilasyonu artar. Sürekli hal hatasını yok etmek için oransal kontrole integral katsayısı ilave edilir. Böylece sistem PI tipi kontrol halini alır. PI tipi kontrolle, oluşan sürekli hal hatası düzeltilir. İntegral işlemi hatanın anlık değeri yerine bir zaman aralığındaki hataların toplamını ele alır. Bu sebeple oransal kontrole göre daha yavaş reaksiyon verir. PI tipi kontrolöre türev işlemi eklenirse PID kontrolör elde edilmiş olur. Türev katsayısının artmasıyla osilasyon periyodu artar. Türev katsayısı artmaya devam ederse sönüm azalır, osilasyon çoğalır [32]. Çizelge 3.2'de kontrolör tiplerinin sisteme etkileri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 PID Denetleyicinin Sisteme Etkileri.

Kontrolör Tipi	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	En Büyük Aşım	Sürekli Hal Hatası
Oransal K_P	Azalır	Az Artar	Artar	Azalır
İntegral K_I	Az Azalır	Artar	Artar	Çok Azalır
Türev K_D	Az Değişir	Azalır	Azalır	Önemsiz

Sistemin istenilen şekilde çalışması için PID parametrelerinin ayarlanması gerekmektedir. Bunun için Ziegler – Nichols ve Cohen – Coon gibi farklı metodlar kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın Ziegler - Nichols metodudur. Tespitte iki farklı Ziegler - Nichols metodu kullanılır. Osilasyon metodu ve reaksiyon eğrisi metodu ile katsayılar hesaplanır. Osilasyon yönteminde sistemi osilasyona girdirmek için sürekli artan giriş verilir. Bu da sisteme zarar verebilmektedir. Bu sebeple bu yöntem katsayı tespitinde çok tercih edilmez. Diğer yöntem olan reaksiyon eğrisinde açık çevrim fonksiyonunun, birim basamak fonksiyonuna verdiği grafik cevabı üzerinde değerler bulunur. Şekil 3.5’de Ziegler - Nichols açık çevrim reaksiyon eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte T zaman sabitini, d zaman gecikmesini, K kazancı göstermektedir.



Şekil 3.5 Ziegler - Nichols Açık Çevrim Reaksiyon Eğrisi.

Şekil 3.6’dan elde edilen T , d ve K değerleri, Çizelge 3.3’te belirtilen Ziegler – Nichols methoduna göre katsayıların tespit formüllerinde kullanılarak ideal PID katsayıları tespit edilir. Bu yaklaşım yükselme ve yerleşme zamanlarında iyileştirme gerçekleştirirken aşım %12 seviyelerine çıkmaktadır. Dolayısıyla düzenleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.3 Ziegler – Nichols Method Katsayılarının Tespit Formülleri.

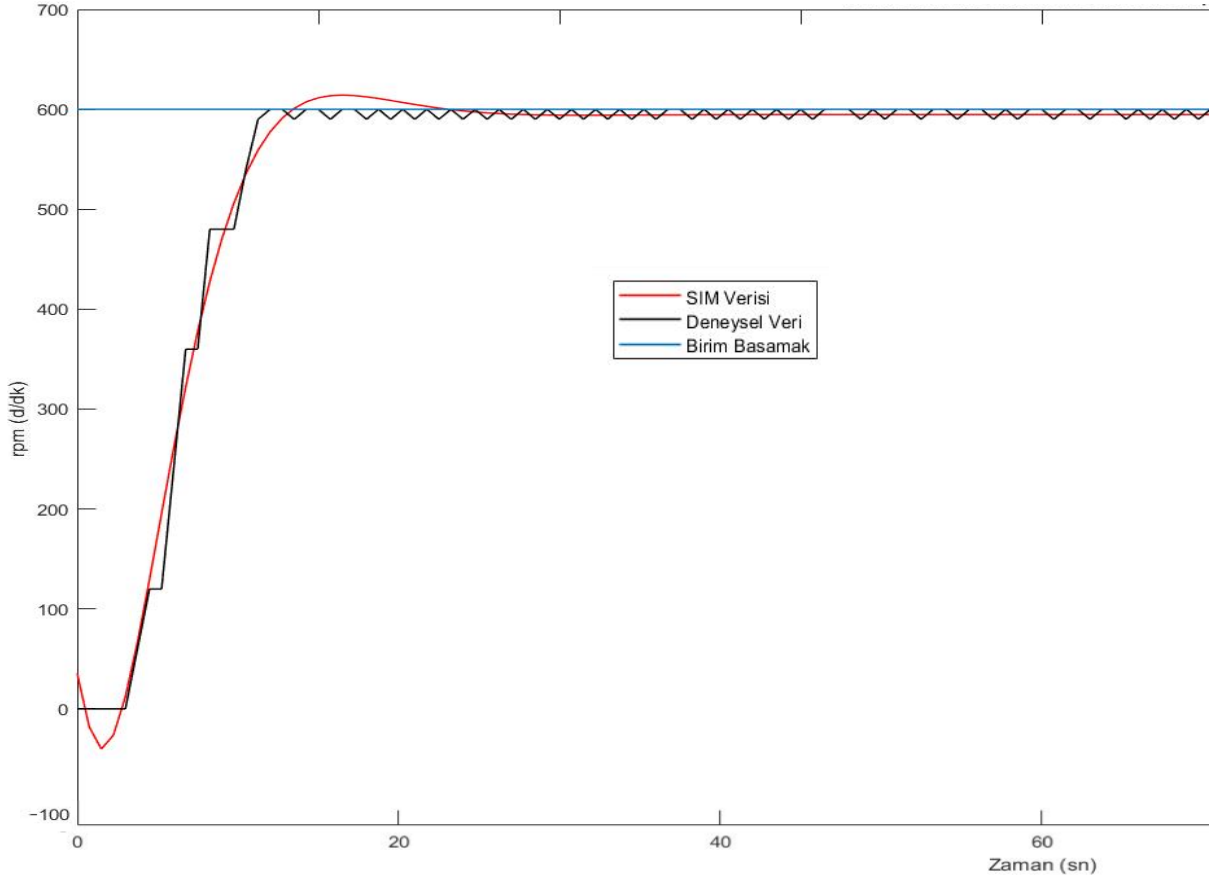
Kontrolör	K_P	K_i ($\frac{1}{T_i}$)	K_D (T_d)
PID	$1.2 \left(\frac{T}{K.d} \right)$	$\frac{1}{2.d}$	0.5 d

Denetlenen sistem modelleme çalışmaları amacı ile deney test düzeneğinde motorlar yüksüz olarak açık çevrim olacak şekilde birim basamak cevabı verileri en küçük kareler yaklaşımı ile belirlenen model derecesine göre parameter kestirimi yapılmakta olup bu çalışmada MATLAB Sistem Tasarım Araç Kutusu (System Identification Toolbox) ile açık çevrim sistem transfer fonksiyonu elde edilebilmektedir. İkinci dereceden en küçük kareler yaklaşımı ile kestirilen transfer fonksiyonu

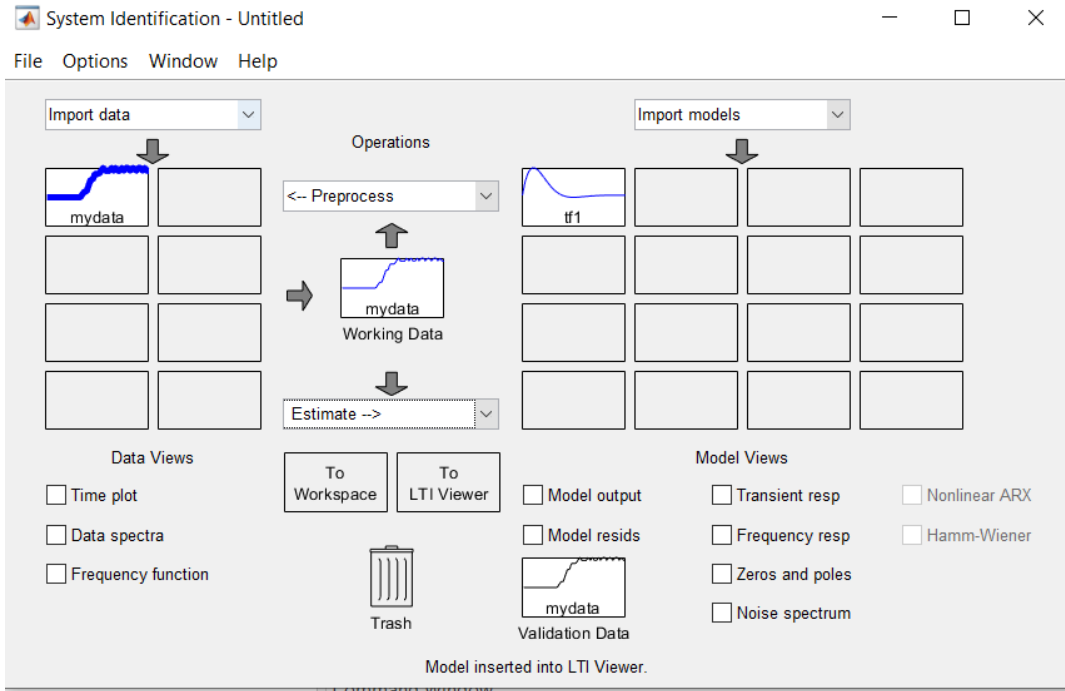
$$H(s) = \frac{526.7}{s^2 + 1.397s + 0.8857} \quad (3.4)$$

kompleks eşlenik kutuplar $p_{1,2} = -0.6985 \pm j0.6307$, olarak bulunmaktadır.

Şekil 3.6’te birim basamak referans işareti tanımlanacak sisteme uygulandığında elde edilen birim basamak cevabına göre kestirilen sistem cevabı görülmektedir. Buna göre yükselme zamanı t_r , 2.3s, yerleşme zamanı t_s , 7s ve en yüksek aşım $M_p \leq 1\%$ seviyesindedir. Kestirilen transfer fonksiyonu deneysel verilerle kıyaslandığında %90,85 doğruluktadır. MATLAB System Identification araç kutusu kullanımı Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.6 Birim Basamak Cevabı.



Şekil 3.7 System Identification Araç Kutusu Kullanımı.

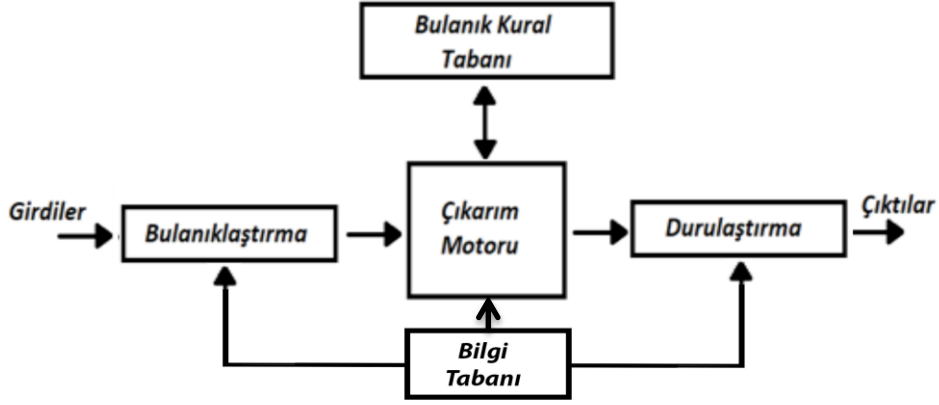
Denetlenen sistemin 2. Derece transfer fonksiyonu kullanılarak elde edilen birim basamak cevabı incelendiğinde $d = 0.6s$, $T = 3.5s$ ve $K = 600$ için Ziegler – Nichols metoduna göre hesaplanan denetleyici katsayıları $K_P = 0.011$, $K_I = 0.83$, $K_D = 0.3$ olarak hesaplanmaktadır. Sistem dinamik tepkisini iyileştiren Ziegler-Nichols yaklaşımı ile birlikte yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım isterlerini düzenleyebilmek için kesitirilen transfer fonksiyonu yardımı ile PID katsayılarının MATLAB PID düzenleyici (PID Tuner) ile belirlenmesi sağlanabilmektedir.

3.3 BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

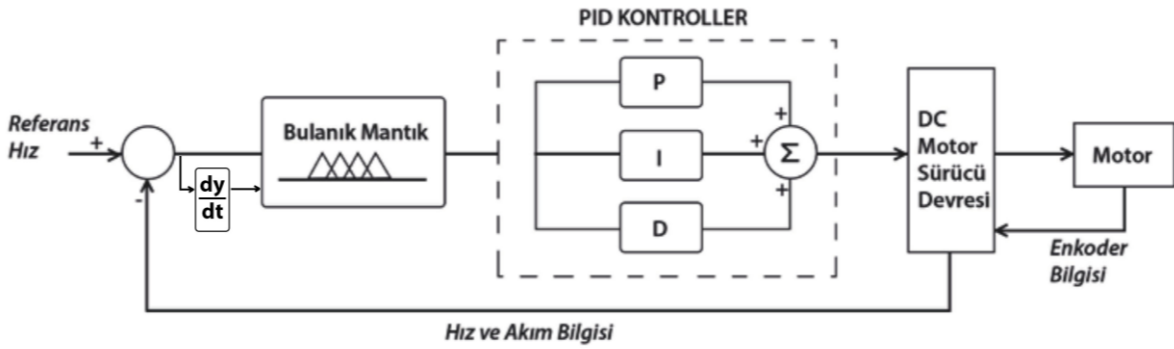
İlk olarak 1965 yılında Prof. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Konu hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çeken, yeni alanlara uygulanan bir konu haline gelmiştir [33]. Literatürde bulanık mantık için şu açıklamalar yapılmaktadır [33],

- Yaşamda karşılaşılan olaylar kesin açıklamalar yapılamayacak kadar karmaşıktır. Bu sebeple bir ve sıfır olarak açıklanamayacağından bulanık olarak tarif edilmelidir. Giriş ve çıkışlar birden fazla üyelik fonksiyonuna dahil edilebilir.
- Tecrübe, ölçüm sonuçları ve fiziksel kanunlardan çıkarılan matematiksel modeller gerçek hayattaki bilgi kaynaklarıdır. Tüm bilgi kaynaklarını kullanmak suretiyle sistem tasarlanır. Tecrübenin ve bilginin sayısallaştırılması önemli bir problemdir.

Bulanık mantık, eğer ve ise kurallarıyla tanımlanmıştır. Kural tabanlı bulanık sistemlerin temel birimleri Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Kural tabanlı çıkarım mekanizmasından oluşan bulanık sistemin yapısı bulanıklaştırıcı ve durulaştırıcı birimlerini içerir. Bulanıklaştırıcı, girdileri üyelik fonksiyonlarını kullanarak bulanık verilere dönüştürmektedir. Bulanık çıkarım motoru bilgi tabanıyla alış verişi halindedir. Bilgi tabanı kural ve veri tabanından oluşmaktadır. Çıkarım motoru karar verme işlemini yaparken, üyelik fonksiyonları ile ilgili bilgileri kural tabanından alır. Farklı girişler için tespit edilmiş çıkış bilgisini kural tabanından alır. Bulanıklaştırıcıdan gelen bulanık girdiler, bilgi tabanında yorumlanıp, bulanık çıktıya dönüştürülür. Denetlenecek sistem kesin sayısal bilgilere ihtiyaç duyacağından durulaştırıcı, devreye girerek bulanık çıktıları sayısal bilgilere dönüştürür.



Şekil 3.8 Bulanık Sistem Temel Birimleri.



Şekil 3.9 Bulanık Mantık Denetleyici ile Motor Denetim Benzetim Blok Diyagramı.

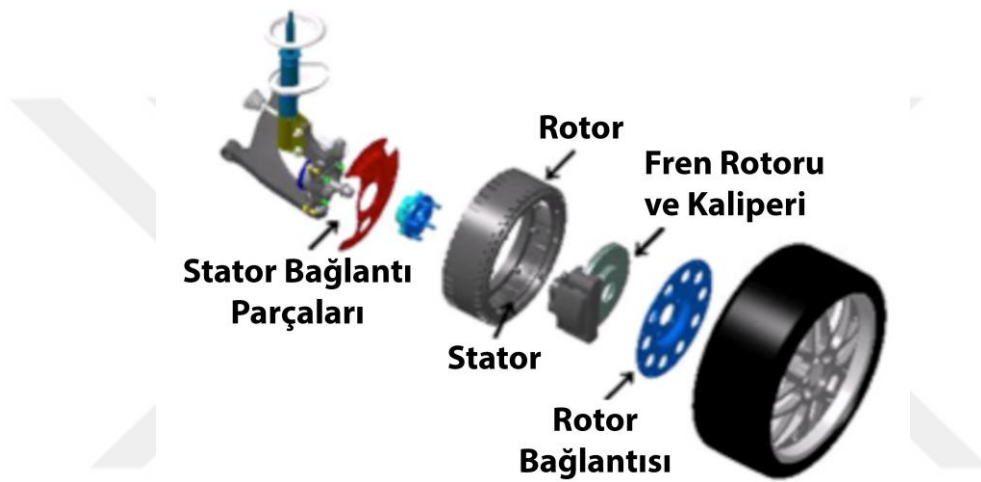
Şekil 3.9'da bulanık mantık denetleyiciye sahip motor denetim sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Bulanık mantığın motoru denetleyebilmesi için hatanın ve hata değişiminin giriş olması gerekmektedir. Fırçasız DC motorun çıkışına bağlanmış enkoderden ölçülen hız değerinin referans değerden çıkarılması ile hata değeri elde edilirken, hata ile hatanın bir önceki değeri arasındaki fark da hata değişimi olarak adlandırılır. Üyelik fonksiyonları sayesinde bu iki giriş bulanıklaştırılır. Bulanıklaştırma işleminden sonra önceden belirlenmiş kurallar dahilinde çıkarım yapılır. Sonrasında durulaştırma sürecinde kontrol sinyali oluşturulur ve motor sürücü ile motor hızı kontrol edilir.

3.4 ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BLDC MOTOR KULLANIMI

Yaygın olarak kullanılan araçlarda, içten yanmalı motor hareket kaynağı olarak kabul edilmektedir. Güç bağlantıları buna göre şekillenir. İçten yanmalı motora sahip araçlarda kullanılan klasik tür şanzıman yakıt performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca mekanik olarak daha karışık yapılara sebep olmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motoru

ile karmaşık yapılar yerini daha basit yapılara bırakır. BLDC motor kullanımı ile bu yapı daha da basitleştirilmiştir.

Elektrikli araçta hareket için gerekli olan, verimi ve gücü yüksek tekerlek tipi (HUB) fırçasız doğru akım motoru da kullanılır. Böylece karmaşık mekanik sistemlere gerek kalmaz. Şekil 3.10'da HUB motor detayı görülmektedir. Rotorun dışta olmasından dolayı mevcut içten yanmalı araçlara da kolayca uygulanabilmektedir. Elektrikli aracın 2 veya 4 tekerleğine karmaşık sistemlere gerek kalmadan uygulama imkanı tanımaktadır.



Şekil 3.10 HUB Motor Detayı.

3.5 BLDC MOTOR KULLANIMININ AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Fırçasız doğru akım motorlarının avantaj ve dezavantajları özetle aşağıdaki gibidir.

Avantajları;

- Elektronik frenleme yapılır ve enerji geri kazanımı sağlanabilir [34].
- Motorların gücü, torku, hızı bağımsız olarak ayarlanabilir [35].
- %95'in üzerinde yüksek verime sahiptir [36].
- Parça sayısı azaldığı için üretim ve bakım maliyetleri azalır [37].
- Dişli çarklar yerine kullanılan elektronik diferansiyel sistemi ile kayıplar azalır, daha az gürültü oluşur. Moment ve hız ilişkisi doğrusaldır [38].
- Şaft, şanzıman, diferansiyel, aks gibi bileşenler olmadığından sade ve hafiftir [36], [38].
- Araçta mekanik parçaların yarattığı kayıplar ortadan kalkar ve sessiz çalışır [36].
- Düşük hızlarda yüksek moment elde edilebilir, daha kısa sürede hızlanır. Maksimum tork

- eldesini, zorlu yol koşullarında daha yüksek ilerleme sağlar [38].
- 4x4, 4x2, 6x6 çekiş sistemleri geçişi daha kolaydır [35].
 - HUB motor yerleşimi ağırlık merkezini yere yaklaştırır, daha dengeli sürüş sağlanır [34].
 - Motorun tekerde kullanılmasıyla araç içinde boş alan elde edilir [22].
 - Fırça ve komütatör yoktur. Daha az bakır kullanılır. Bu sebeple aynı güçteki motorlara göre daha az yer kaplar, hafiftir, daha az bakım gerektirir, ucuzdur [36].
 - Her tekerlektek ABS, çekiş kontrolü ve stabilite gibi özelliklere sahiptir [35].

Dezavantajları;

- Elektrikli araca BLDC motor uygulandığında geleneksel araca göre süspansiyon azalır [34].
- Süspansiyonun azalmasına paralel olarak yol tutuşu da zayıflamaktadır [34].
- Süspansiyon sistemi zayıflayan araçlarda daha fazla darbeye maruz kalan motorların ömrü de düşmektedir [34], [35].
- Sabit mıknatıslı motorlarda zaman geçtikçe manyetik alanlar zayıflar. Bu sebeple tork / çekiş kuvveti uzun süreli kullanımda azalır [25].
- Çalışması için rotor konum bilgisine ihtiyaç duyulur. Durum bilgi sensörü ya da sensörsüz durumlarda ilave algoritmalar gerekmektedir.
- Rotor mıknatısları maliyeti arttırmaktadır.
- Denetim işlemi invertör ile yapılır. Yarı iletkenler maliyeti arttırmaktadır.

3.6 BLDC MOTOR DENETİM TOPOLOJİLERİ

Zıt EMK (Back EMF), sensörlü trapezoidal, sensörsüz trapezoidal ve sinüsoidal vb. topolojiler kullanılarak motor denetlenir. Zıt EMK dalga şekillerine göre veya sargılara uygulanan akımın dalga şekline göre fırçasız motorların genel kabul görmüş iki tipi vardır; yamuk tip (Trapezoidal) veya sinüsoidal tip. Kullanılan sürücü modül trapezoidal olduğu için aşağıda kısaca trapezoidal tip kontrole değinilmiştir.

Sargılara uygulanan akımın yamuk olması sebebiyle trapezoidal tip kontrol adını alan bu de aynı anda sadece iki faz enerjilendirilir. Bir sargı “+” alternansı akımı taşıırken diğeri “-“ alternans akımı taşır. Zıt EMK dalgası yamuk şeklindedir. Zıt EMK’nın dalga şekline göre yarı iletkenlerin anahtarlama sıraları ve süreleri belirlenir.

Güç kaynağı motor sargılarına bağlanmamışken rotor mekanik kuvvetle sabit hızda döndürülürse her bir faz ile nötr arasında yamuk dalga (trapezoidal) şekilli gerilim indüklenir. Rotorun döndürülmesi sonucu sargılarda indüklenen gerilim zıt EMK olarak bilinir. Zıt EMK dalga şekillerine bakılarak invertördeki transistörlerin anahtarlama sırası belirlenir.

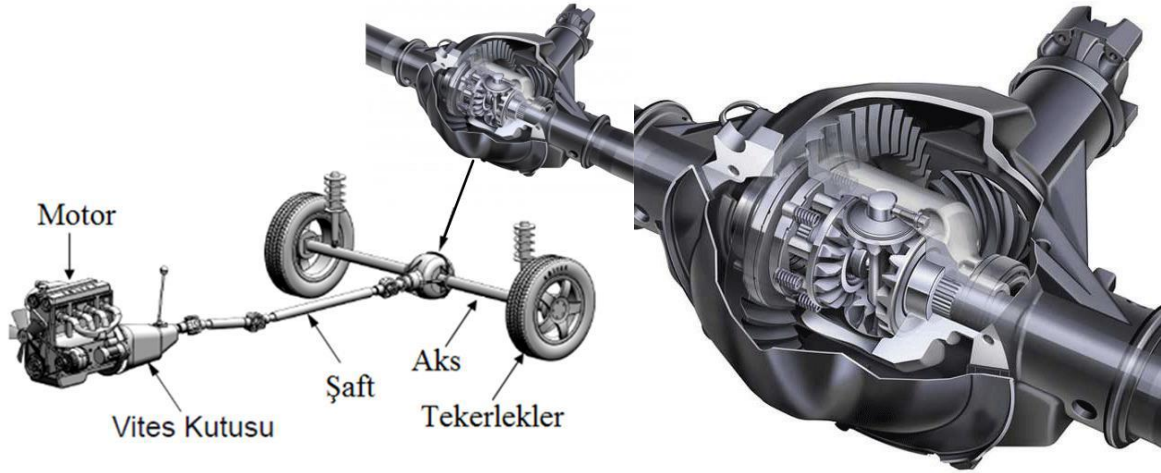
3.7 BLDC MOTORLU ELEKTRİKLİ ARAÇTA ELEKTRONİK DİFERANSİYEL

Günümüzde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motora sahip geleneksel araçlarda büyük bir motor ve hareketi tekerleklere aktaran bir diferansiyel mekanizması bulunur. Bu diferansiyel mekanizması hem büyük bir yer kaplar, hem de ağırdır. Elektrikli araçların motorları bir çok çeşitte ve boyutta olabilmektedir. İçten yanmalı motorlara kıyasla daha rahat kontrol edilmeleri nedeniyle kullanımda esneklik sağlamaktadır. Elektrik motorlarından elde edilen hareket doğrudan araca iletilir. Bu avantaj, aynı zamanda kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Araca doğrudan yerleştirilen bu motorların, tasarlanan elektronik diferansiyel ile geleneksel araçlarda bulunan diferansiyel mekanizmasının yaptığı işlevi yapması gerekmektedir.

Diferansiyel mekanizmasının görevi şafttan gelen hareketin hızını düşürerek momenti arttırmasıdır. Virajlarda iç tekerin yavaş, dış tekerin daha hızlı dönmesi bu mekanizma ile sağlanır. Böylece tekerleklerin patinaja girmeden, aracın da savrulmadan viraj alması sağlanır.

Viraja göre tekerlek devrinin ayarlanması diferansiyel mekanizmasının en önemli görevlerindedir. Araç viraja girdiğinde iç tekerin yavaş, dış tekerin ise hızlı dönmesi istenir. Viraj durumunda dişli mekanizmaları sayesinde yola aktarılan güç düşük momentli tekerleğe göre ayarlanır. Böylece iç tekerlek yavaşlamaya zorlandığından momenti artar. Dış tekerin ise momenti daha az olduğundan, hızlanır. Diferansiyel mekanizması ile tekerlekler momentlerinin tersi oranında hızlarla dönerek, kararlı şekilde viraj alınır.

Mevcut diferansiyel mekanizma, içerisinde birçok dişli sistemin olduğu mekanik hareket sağlayan aktarma organları ile kararlı dönüş sağlayabilen bir mekanizma olarak tasarlanmıştır. Şaft ile aks arasında bulunan bir güç aktarma organı mekanik diferansiyel sistemidir. Şekil 3.11'de 2 tekerlekten tahrikli, arkadan itişli bir araçta mekanik diferansiyel gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Arkadan İtişli Araçta Mekanik Diferansiyel.

Elektronik diferansiyel sistemini anlamak için öncelikle mekanik diferansiyel sisteminin nasıl çalıştığının anlaşılması gerekir. Mekanik sistem moment denetimine dayanan bir sistemdir. Viraj durumunda moment dengesi kurulur. Düşük momente ihtiyaç duyan tekerlek daha çok döndürülür, böylece virajın düzgün şekilde alınması sağlanır.

Elektronik diferansiyel tasarımında mekanik diferansiyele benzer yaklaşım yapılır. Elektronik diferansiyelde tahrik edilecek tekerleklerin momenti ölçülür. Mekanik sistemdeki gibi ters orantılı bir güç dağıtımı ile hız oranı belirlenir. Aracın kararlı bir dönüş yapması sağlanacak şekilde hız ayarlanır.

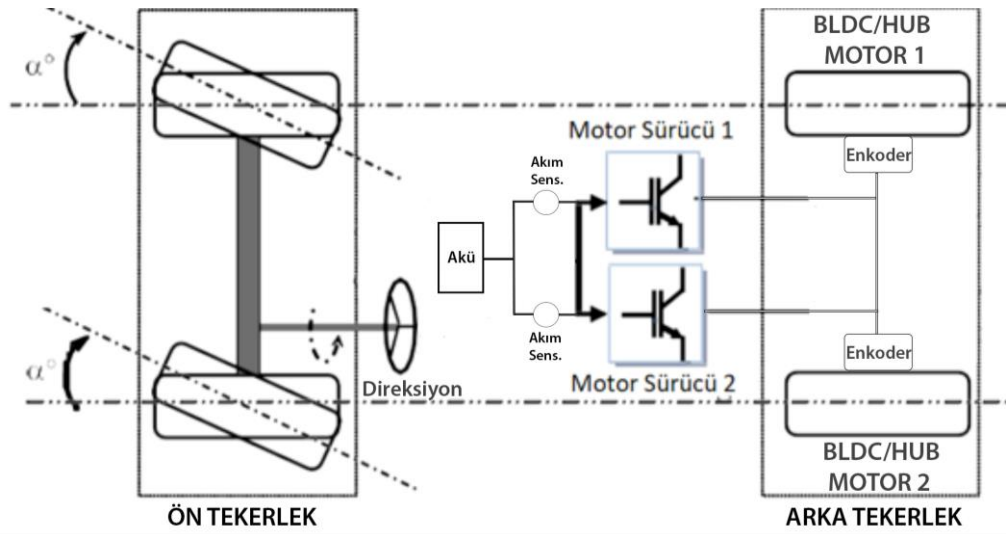
Elektronik diferansiyel sisteminden beklenen virajda vb durumlarda tekerlerinin hız farkını uygun olarak ayarlamasıdır. Rotadan sapmaması, tekerleklerin farklı yol şartlarında doğrultuyu koruması, hız farklarına sebep olan patinaj durumunu tolere edebilmesi beklenir.

3.8 TASARLANAN DİFERANSİYEL SİSTEMDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Elektrikli araçlarda taşıtın virajları sorunsuz alabilmesi için klasik diferansiyelin görevini yapacak elektronik diferansiyel sistemine ihtiyaç duyulur. Elektronik diferansiyel sistemi, iki farklı bağımsız motora sahip elektrikli aracın viraj sırasında iç ve dış tekerleklerinin hızlarının ayarlanmasıyla tahrik motorlarının hızlarını kontrol eden bir sistemdir [39]. Bu tez çalışmasında PID katsayı tayini bulanık mantık kontrolü ile yapılmış ve gömülü sistem elektronik diferansiyel uygulanmıştır. Gömülü sistemin tercih edilmesi daha az kodlama,

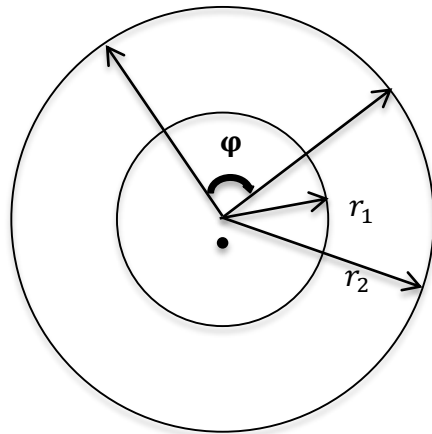
kullanım kolaylığı, pratiklik, esneklik, hızlı kurulum ile zaman tasarrufu ve güvenilirlik gibi bazı avantajlara sahiptir [39].

Tez çalışmasında kullanılan araç bileşen yerleşimi Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Elektronik diferansiyel virajda tekerlekler için gerekli hızları hesaplayarak, tekerlekleri ihtiyacı olan devirde döndürmektedir. Böylece taşıt viraja girdiğinde virajı problemsizce almaktadır. Bu çalışmada, BLDC tip elektrik motoru taşıtın arka tekerleklerinde kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Araç Bileşen Yerleşimi.

Düz yolda ilerleyen bir taşıtın sağ ve sol tekerlekleri neredeyse aynı hızda dönerken, dönüşlerde aldıkları yollar farklıdır [40]. Bu durum Şekil 3.13’de gösterilmekte olup, V_0 araç hızı, V_1 Motor 1 sağ tekerleğin, V_2 Motor 2 sol tekerleğin hızı sırasıyla eşitlik 3.5, 3.6 ve 3.7 ile ifade edilmektedir [40]. Burada ω dönüş açısını, r_1 iç tekerlek yol yarıçapını, r_2 dış tekerlek yol yarıçapını, t süreyi temsil etmektedir.



Şekil 3.13 İç Dış Tekerlek Hız Farkı

$$V_0 = \frac{\pi (r_1+r_2)}{t} \quad (3.5)$$

$$V_1 = V_0 - \frac{\varphi(r_1-r_2)}{t} \quad (3.6)$$

$$V_2 = V_0 + \frac{\varphi(r_1-r_2)}{t} \quad (3.7)$$

Tasarlanan sistemde hesaplamalar için 1/20 oranında küçültülmüş model kullanılmıştır. Tekerlek çapı 0.7075m, araç hızı 80Km/h (600d/dk), iki tekerlek arasındaki mesafe de 1.5m olarak alınmıştır.

Elektronik diferansiyelde asıl üzerinde durulan konu, elektrikli aracın düz yol sürüşünde, yokuş çıkış ve iniş durumlarında, virajda ve patinaj gibi anlarda birbirinden bağımsız iki motorun hızlarının ve akımlarının ayarlanmasıdır. Motorların hızlanma, yavaşlama ve durma tepkileri gözlemlenmiş, motorları referans hıza ulaştırmak için PID denetleyici kullanılmıştır. Burada, aracın sağa ve sola dönüşlerinde, rampa iniş ve çıkışlarında motorun yüklenme değerlerine bağlı olarak farklı PID katsayıları belirlenmekte olup, gidilen rotaya göre en uygun katsayılar motor akımlarına bağlı olarak bulanık mantık ile seçilmektedir.

Aracın kalkış anında herhangi bir motorun patinaja girdiği durumda, patinaja giren motorun devri diğer motorun devrine göre yüksek olup, çektiği akım azdır. Aracın sağa sola dönüşünde dönüş açısına bağlı olarak içteki tekerleğin dönüş hızının azalması, dıştaki tekerleğin dönüş hızının artması sağlanmalıdır. Yani içteki motorun mekanik olarak frenlenmesi söz konusudur.

Motorların yükü eşit paylaşabilmesi için hız ile birlikte akım değerleri de kontrol edilmelidir. Bunu sağlamak için darbe genişlik modülasyonu kullanılmış olup, referans hıza ulaşmada PID denetleyici kullanılmıştır.

Öncelikle açık çevrim tepkisi bulunmuştur. Deneysel olarak ölçülen birim basamak cevabına göre MATLAB programı ile transfer fonksiyonu çıkarılmıştır. Hız denetimi için PID denetleyici kullanılmıştır. Denetleyicide yükselme zamanını iyileştirmek için oransal denetleyici eklenmiş, aşmayı düzenlemek için türevsel denetleyici eklenip, kararlı durum hatasını azaltmak için de integral denetleyici ilave edilmiştir. İstenilen tepki elde edilene

kadar K_P , K_i , K_D ayarlanmıştır. Buna ek olarak motor y¼k¼ne g¼re K_P , K_i , K_D katsayılarının se¼ilmesi i¼in bulanık mantık kullanılmaktadır.

Motorların kalkış anında referans hıza eşit hızlarda ulaşması i¼in, motorların arasındaki hız farkı da dikkate alınmıştır. D¼ř¼k devirde olan motor master kabul edilip, diğer motorun d¼ř¼k devirli motora uyması sağlanarak referans hıza ulaşmaları sağlanmıştır.



BÖLÜM 4

ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, aracın arka tekerlerine yerleştirilmiş BLDC motora sahip tümüyle elektrikli araç kullanılan sistem düzeneği ile simülasyon ve deneysel çalışmalar üzerinde durulmaktadır. Motor sürücülerden ve sensörlerden gelen bilgiler bir denetleyici kart ile işlenerek optimum sürüş elde edilmesi hedeflenmiştir. Öncelikle benzetim yapılmış, elde edilen modele göre sistem tasarlanmış, PID denetleyici uygulanmış, sistemin birim basamak cevabı ile transfer fonksiyonu bulunmuş, K_P , K_I , K_D katsayıları belirlenmiştir. Aracın performansının maksimum olması için gidilen rotaya ve yüke göre seçilmesi gereken PID katsayılarının belirlenmesinde bulanık mantık kullanılmıştır.

4.1 MATERYAL VE METOT

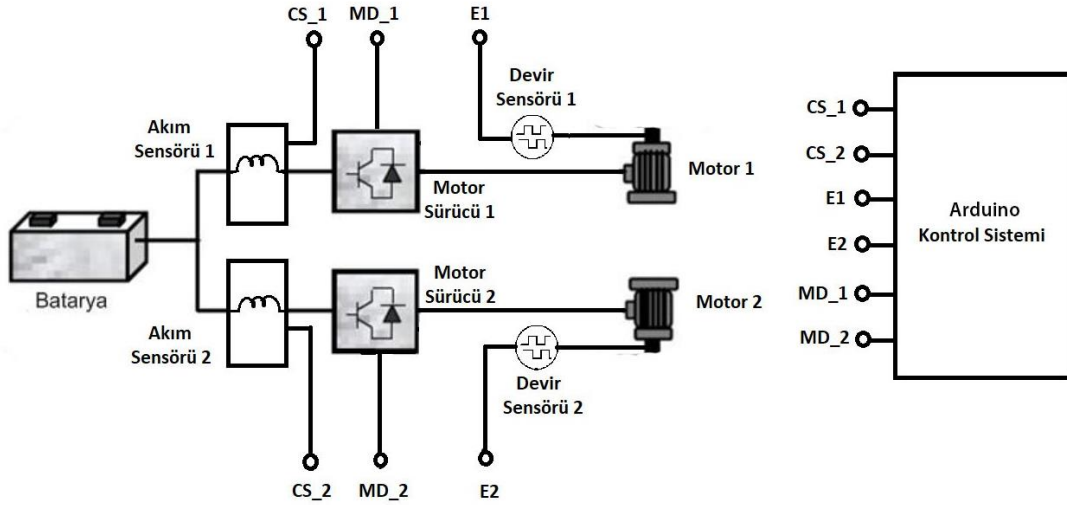
Tez çalışmasında 1/20 oranında küçültülmüş prototip bir deney düzeneği kullanılmıştır. Prototip düzeneğin arka tekerleklerinde birbirinden bağımsız iki fırçasız doğru akım motoru, bu motorları kontrol etmek için iki adet motor sürücüsü, motorların hız bilgisini almak için iki adet enkoderli hız sensörü, akım bilgisini okumak için iki adet akım sensörü kullanılmıştır. Aracın dönüşte, rampa iniş ve çıkışlarda yüklemelerini simule etmek amacıyla ağırlık sensörleri olan yükleme mekanizması kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin fotoğrafları ve özellikleri material listesi olarak ek açıklamalar kısmında Ek A'da, motor devir bilgisi için kullanılan enkoderin, hız sensörünün ve motor sürücüsünün özellikleri de sırasıyla Ek B, Ek C, Ek D'de gösterilmektedir.

Tez çalışmasında belirlenmiş yolda motorların çektikleri akıma bağlı olarak PID tayini bulanık mantık ile yapılmıştır. Öncelikler açık çevrim birim basamak cevabına göre transfer fonksiyonu kestirilmiş sonrasında uygun PID katsayıları belirlenmiş ve bu katsayılar ile yol performansı gözlemlenmiştir. Yola göre değişmeyen PID katsayısı kullanılmındaki veriler ile yola göre bulanık kontrolle PID katsayılarının tayin edildiği durum kıyaslanmıştır.

4.2 ELEKTRİKLİ ARAÇ DENETİM SİSTEMİ DÜZENEGİ

Fırçasız doğru akım motorunun denetiminin sağlanması amacıyla hazır sürücü modülü kullanılmıştır. Kullanılan modülün çalışma prensiplerinin tanınması, BLDC' nin ihtiyaç duyduğu PWM işaretlerinin üretilmesi ve sensör işaretlerinin işlenmesi denetleyici kartı üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de gösterilen araç blok şemasına göre, elektrikli aracın arka tekerleklerine yerleştirilmiş birbirinden bağımsız 2 adet BLDC motor bulunmaktadır. Her bir tekerlek için ayrı bir motor sürücü kullanılmıştır. Her bir motor ve sürücü grubuna ait birer tane enkoder ve akım sensörü bulunmaktadır. Aracın dönüşünü, rampa iniş ve çıkışlarını simule etmek için motor yüklemelerini kontrol etmek amacıyla ağırlık sensörleri kullanılmıştır. Akülerden beslenen doğru akım barasına bağlı motor sürücü devresi sayesinde elektrik motorunun denetimi sağlanmaktadır.



Şekil 4.1 Araç Blok Şeması.

Bu çalışmada BLDC motorun hız denetimi PID denetleyiciyle gerçekleştirilip rotaya ve yüke uygun PID'nin seçimi sağlanmıştır. Kapalı çevrim hız denetimi için orantılı, integral ve türev geri besleme kullanılmıştır. Kapalı çevrim kontrolde pottan gelen değer referans hız olarak alınmış, belirlenen PID denetleyici katsayılarına göre PWM çalışma oranı belirlenmiştir.

PID denetleyici fonksiyonuyla motorun hızı ve referans hız arasındaki hata hesaplanmış, bu hataya kontrolör ile hesaplanan yeni çalışma oranı yüklenerek PWM çıkışı güncellenmiştir. Sistemde tekerlekdeki kaymalar hesaplanarak aracın patinaja girmemesi için devir azaltılmış ve tekerleklerin yola tutunması sağlanmıştır.

Benzetimde farklı sürüş modları ve yollar dikkate alınmıştır. Benzetimde dikkate alınan yol İzmit pisti Şekil 4.2’de gösterilmiştir. 1412 metre uzunluğundaki iç pist referans yol olarak alınmıştır. Pistte farklı çaplarda 4 viraj bulunmakta olup, yaklaşık 300 metresi virajdır. Pistte 5 tane düz yol olarak adlandırılmış kısım bulunmaktadır. Simülasyonda dikkate alınan yollar Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Çizelgede virajlara ait çaplar, yol mesafesi, süresi, hız ve devir bilgileri bulunmaktadır.

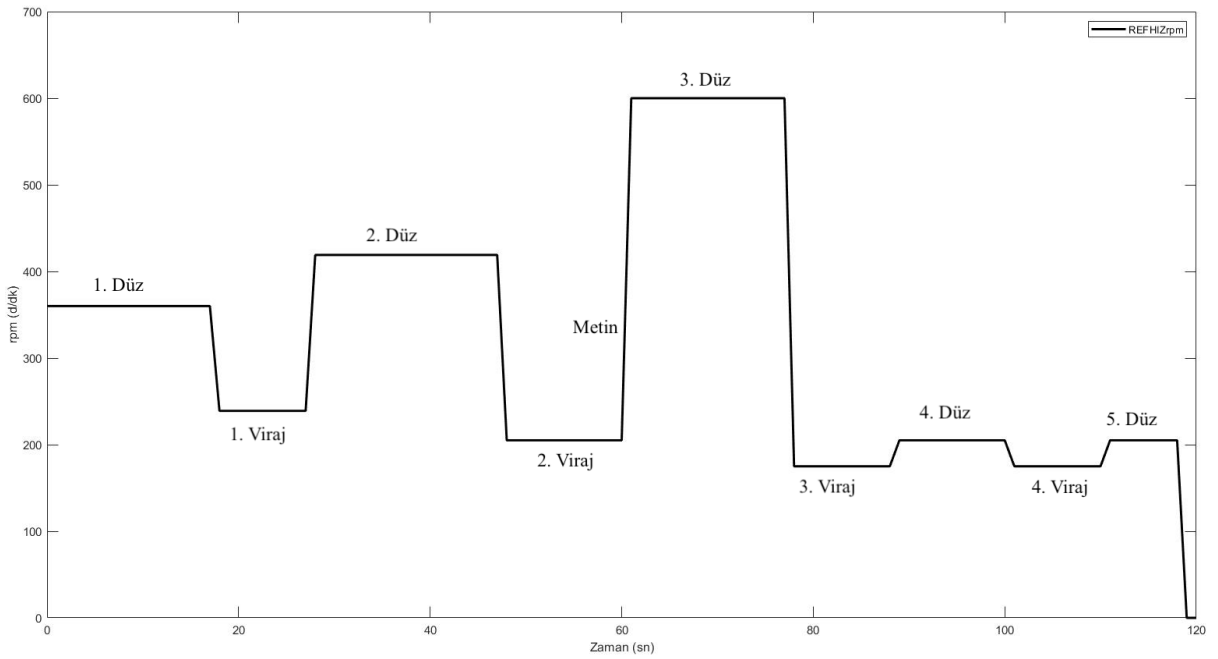
Çizelge 4.1 Yol Similasyon Tablosu.

Yol (Yarı Çap m)	Uzunluk (m)	Hız (Km/h)	Süre (s)	Devir (d/dk)
1. Düz	226	48	17	360
1. Viraj (140m)	88	32	10	239
2. Düz	310	56	20	419
2. Viraj (70m)	99	27	13	205
3. Düz	400	80	18	600
3. Viraj (20m)	65	23	10	175
4. Düz	99	27	13	205
4. Viraj (20m)	65	23	10	175
5. Düz	60	27	8	205



Şekil 4.2 İzmit Körfez Pisti.

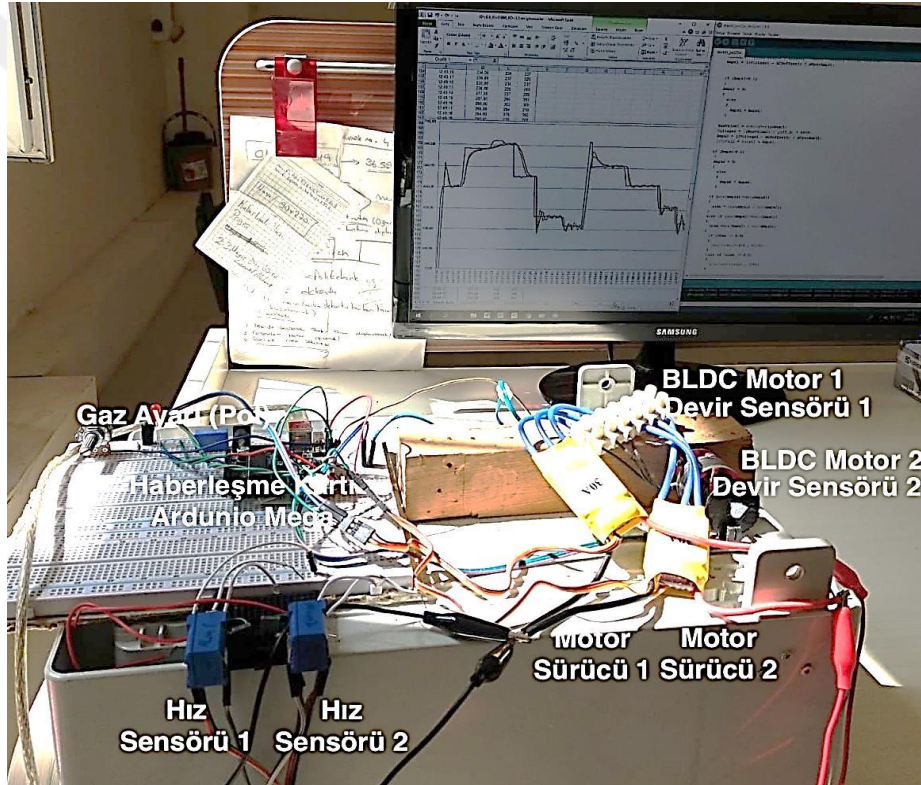
Benzetimde kullanılan Şekil 4.2’de gösterilen İzmit pistinde kırmızı ile işaretlenmiş iç pist kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de belirtilen yol, devir ve zaman ilişkisine ait benzetim referans yol hız grafiği Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Referans Yol Hız Grafiği.

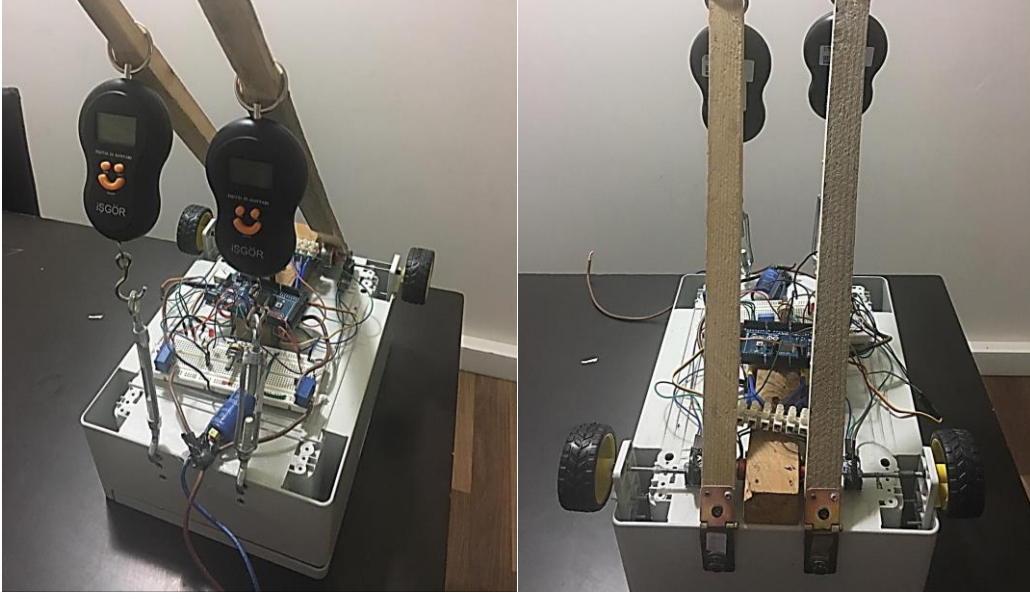
Gaz ayar potundan ve sensörlerden gelen bilgilerin motor sürücü devresinde işlenmesi ile motor denetiminin yapıldığı sistem düzeneği Şekil 4.4'te görülmektedir.

Sistem düzeneğinde iki motor ve bu motorları denetleyen iki motor sürücü, bunlara bilgi gönderen ve sürücüleri haberleştirme için kullanılan denetleyici kartı bulunmaktadır. Düzenekte ayrıca, motorların hız ve akım bilgisini ölçmek için enkoder olarak adlandırılan hız sensörü ile akım sensörü kullanılmıştır. Denetleyici kartı aynı zamanda alınan akım ve hız gibi verilerin bilgisayara gönderilmesini ve sistemin bilgisayar ile haberleşmesi de sağlanmaktadır. Referans hız potansiyometre ile ayalanmaktadır. Referans hıza ulaşması hız sensörlerinde alınan veriler ile takip edilmektedir.



Şekil 4.4 Sistem Düzeneğinin Fotoğrafı.

Şekil 4.5'de yükleme mekanizması uygulanmış düzenek gösterilmiştir. Düzenekte motorlara eşit yüklenme, dengesiz yüklenme uygulanarak viraj, rampa gibi durumların simule edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.5 Yükleme Mekanizmalı Sistem Düzeneginin Ön ve Arka Görünüşü.

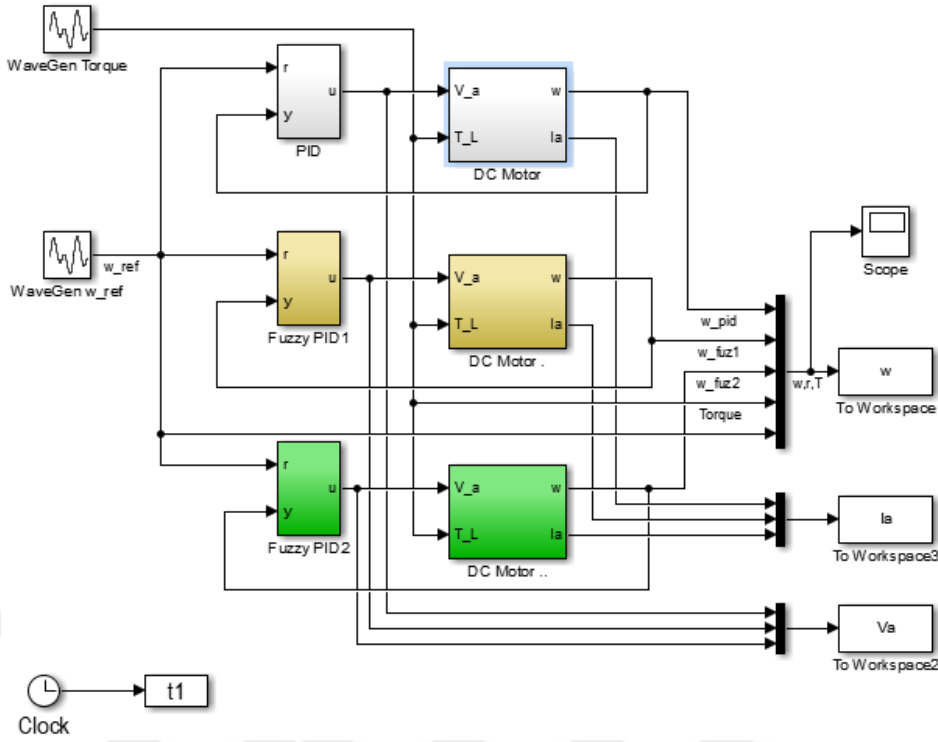
Denetleyici deney düzeneğinde referans hız, motorların hızı, gerilim ve akım değerleri 0,25s örnekleme hızı ile kayıt altına alınarak k. örnek için hata elde edilmekte olup deney süresince toplam karesel hata eşitlik 4.1'den elde edilmiştir. Toplam hata

$$E^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t_i=1}^N (r(t_i) - w(t_i))^2} \quad (4.1)$$

eşitliği ile elde edilmiş olup, burada N örnek sayısını, $r(t_i)$ i. örneklemedeki referans hızı, $w(t_i)$ i. örnekteki motor çıkış hızını temsil etmektedir. Ek olarak toplam harcanan enerji kaybı Wh olarak deney süresi boyunca motorlara uygulanan gerilim ve çekilen akımların anlık çarpımlarının toplamı olarak elde edilmektedir.

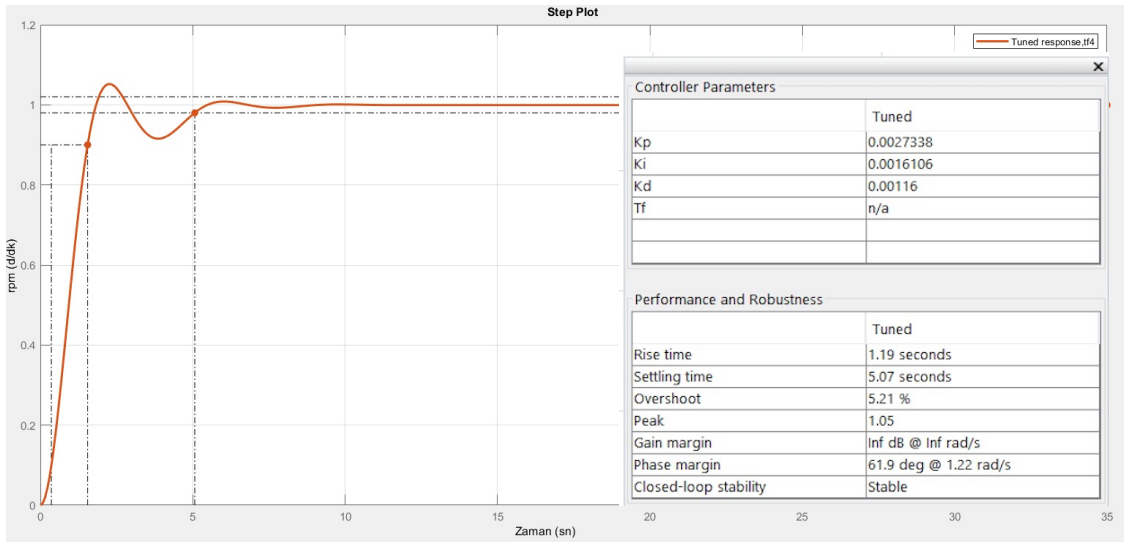
4.3 PID VE BULANIK PID BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, kestirilen motor modeline göre motor hız denetiminde önerilen PID ve Bulanık PID yaklaşımlarının performansları kıyaslanmaktadır. Buna ilave olarak, elektronik diferansiyel kullanımına yönelik araç yön değişikliklerinde motor hızlarının değişimi farklı yükler altında incelenmektedir. Bu amaçla hazırlanmış PID ve Bulanık PID denetim sistemi benzetim blok şeması Şekil 4.6'da görülmektedir. Bu benzetimde kullanılan referans hız değişimi Çizelge 4.1 ile verilmekte olup, yük değişimleri de incelenmektedir. Motor hız, gerilim ve akımları elde edilmektedir.



Şekil 4.6 Denetleyici sistemi benzetim blok şema.

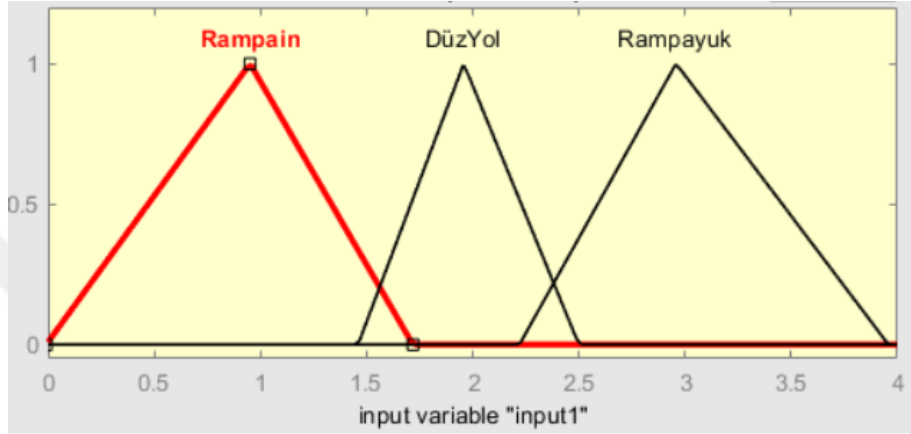
Ziegler-Nichols ile birlikte frekans bölgesinde kapalı-çevrim band genişliği ve faz sınırı ile kararlılık, gürbüzlük ve dinamik tepkinin iyileştirilmesine yardımcı olan MATLAB PID Tuner ile hesaplanmış katsayılar Şekil 4.7’de görülmektedir.



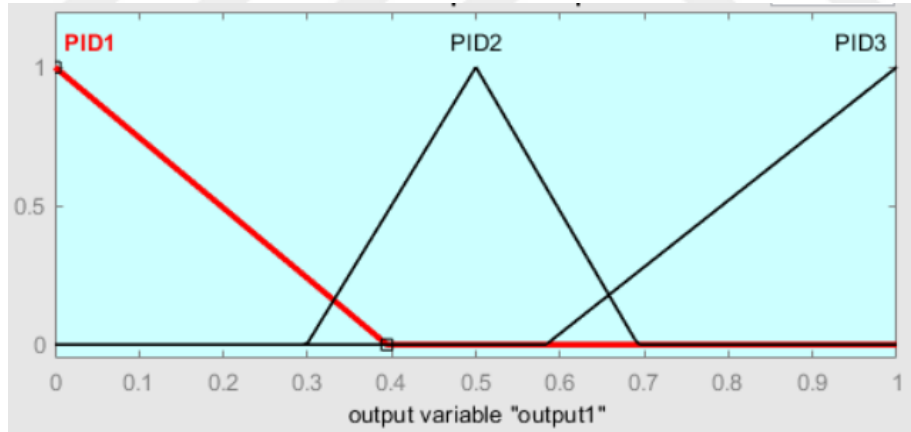
Şekil 4.7 PID tuner ile katsayıların hesaplanması.

Model oluşturmada öncelikle giriş, çıkış parametrelerine hazırlanmıştır. Motor akımlarının 0 ile 4 Amper aralığında değişmesi öngörülerek rampa iniş (%0-%35 yük), düz yol (%35-%60

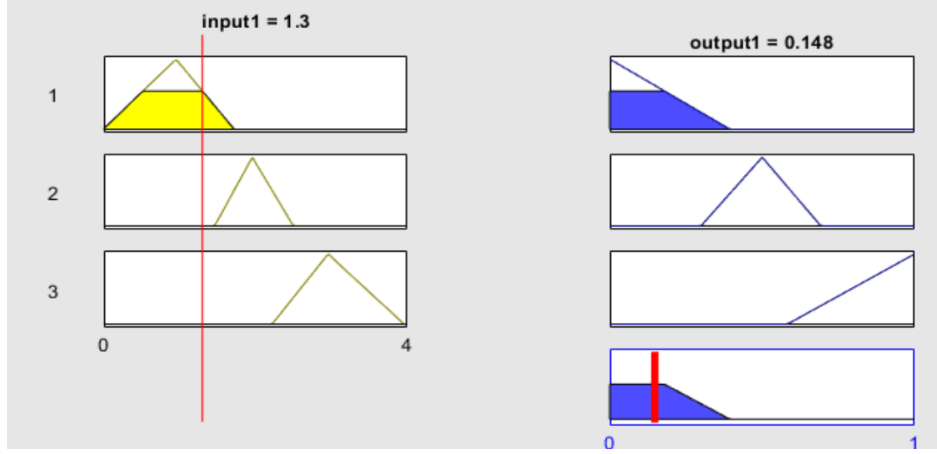
yük), ve rampa yukarı (%60-%100 yük), şeklinde 3 adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuş ve giriş olarak kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonları akım bulanık değişken ilişkisi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Çıkış olarak, yüke bağlı değişen farklı katsayılara sahip PID seçenekleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.10’da durulaştırma işlemi görülmektedir. Burada motor akımı 1.3A iken (%27 yük) bulanık PID denetleyicinin çıkış olarak PID 1’in seçildiği görülmektedir. Bu yaklaşım Bulanık PID 1 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.8 Motor Akımı Bulanık PID1 Kümeleri Üyelik Fonksiyonları.



Şekil 4.9 PID 1 Seçeneklerini Temsil Eden Çıkış Üyelik Fonksiyonları.



Şekil 4.10 MATLAB Programıyla Yapılmış Örnek Durulaştırma İşlemi.

Bu çalışmada PID katayılarının doğrudan hesaplanmasında önerilen Bulanık PID 2 yaklaşımında ise referans hız ve motor hızı arasındaki hata ve hata değişimine göre K_P , K_D değerlerini ve bağlı olarak K_I değerini elde edebileceğimiz bulanık model Şekil 4.11’de görülmektedir. Şekil 4.12’de, N-Neagatif, P- Pozitif, B-Büyük, M-Orta, S-Küçük, ZO-Sıfır olarak belirlendiğinde; NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB giriş üyelik fonksiyonları olarak tanımlanırken, Şekil 4.13’te çıkış K_p ve K_d için B, S üyelik fonksiyonları, çıkış alfa içinse 2,3,4,5 üyelik fonksiyonları kullanıldığı görülmektedir. Buna göre PID katsayıları eşitlik 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K_p = K_{pmin} + (K_{pmaks} - K_{pmin}) * K_p^I \quad (4.3)$$

$$K_d = K_{dmin} + (K_{dmaks} - K_{dmin}) * K_d^I \quad (4.4)$$

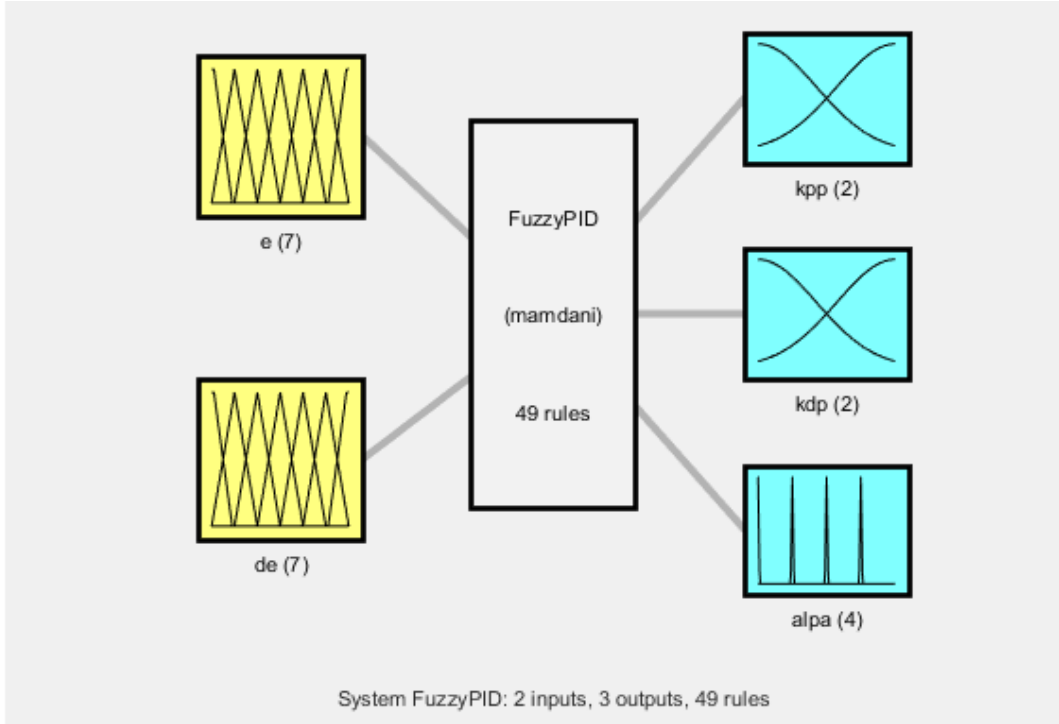
$$K_i = K_p^2 / (\alpha * K_d) \quad (4.5)$$

$$K_p^I = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{p,i}^I \quad (4.6)$$

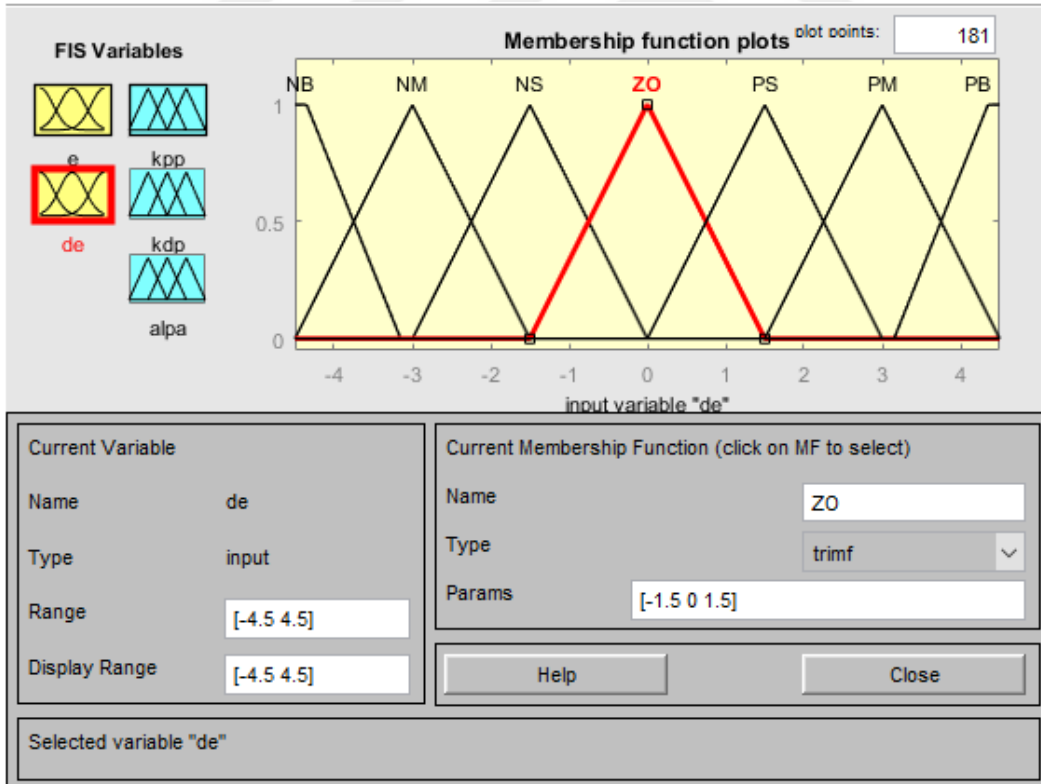
$$K_d^I = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{d,i}^I \quad (4.7)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i \quad (4.8)$$

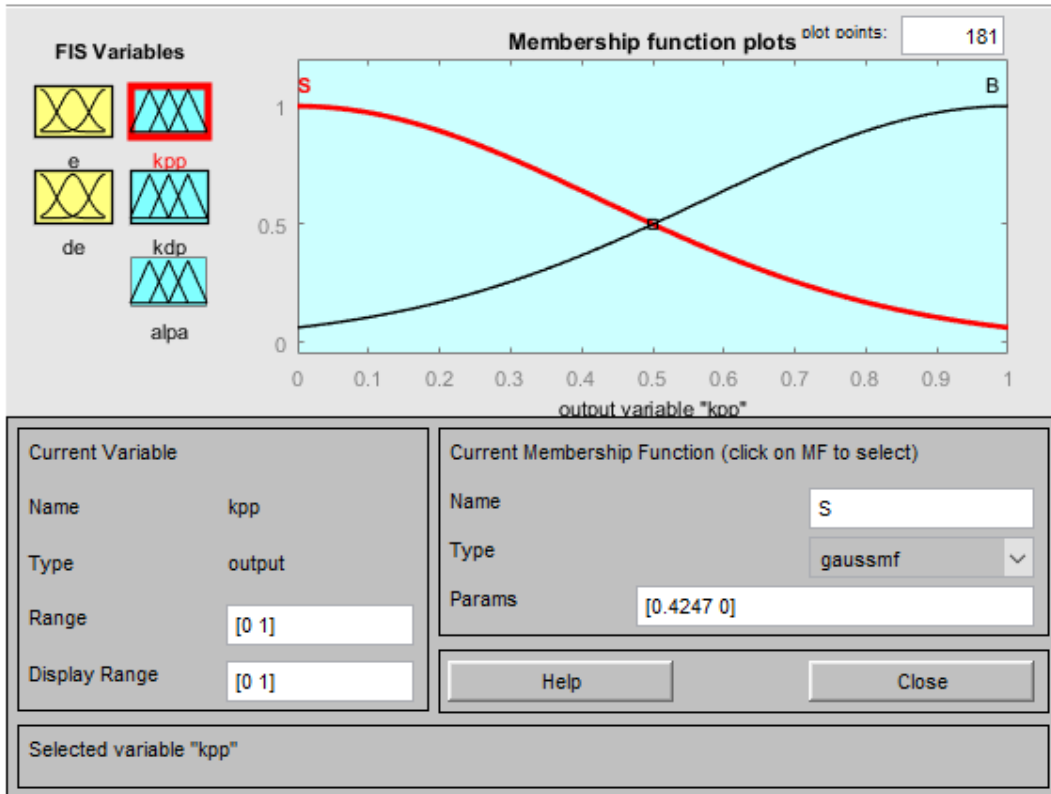
Bu eşitliklerde kullanılan K_{pmin}, K_{pmaks} ve K_{dmin}, K_{dmaks} sırasıyla K_P ve K_D ’nin minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedir [41].



Şekil 4.11 Bulanık PID 2 Giriş Çıkış Üyelik Tanımlaması.

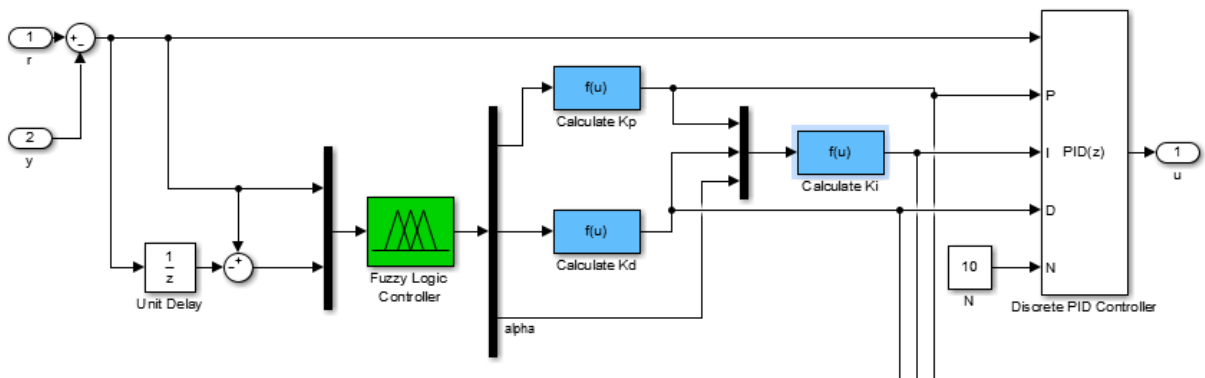


Şekil 4.12 Bulanık PID 2 Giriş Üyelik Fonksiyonları.



Şekil 4.13 Bulanık PID 2 Çıkış Üyelik Fonksiyonları.

Şekil 4.14'te Bulanık PID 2 denetleyici blok şeması görülmektedir. Hata ve hata değişimine göre bulanık mantık denetleyici üyelik fonksiyonlarına göre hesaplanan PID katsayıları denetim işaretini elde edmemizi sağlamaktadır.

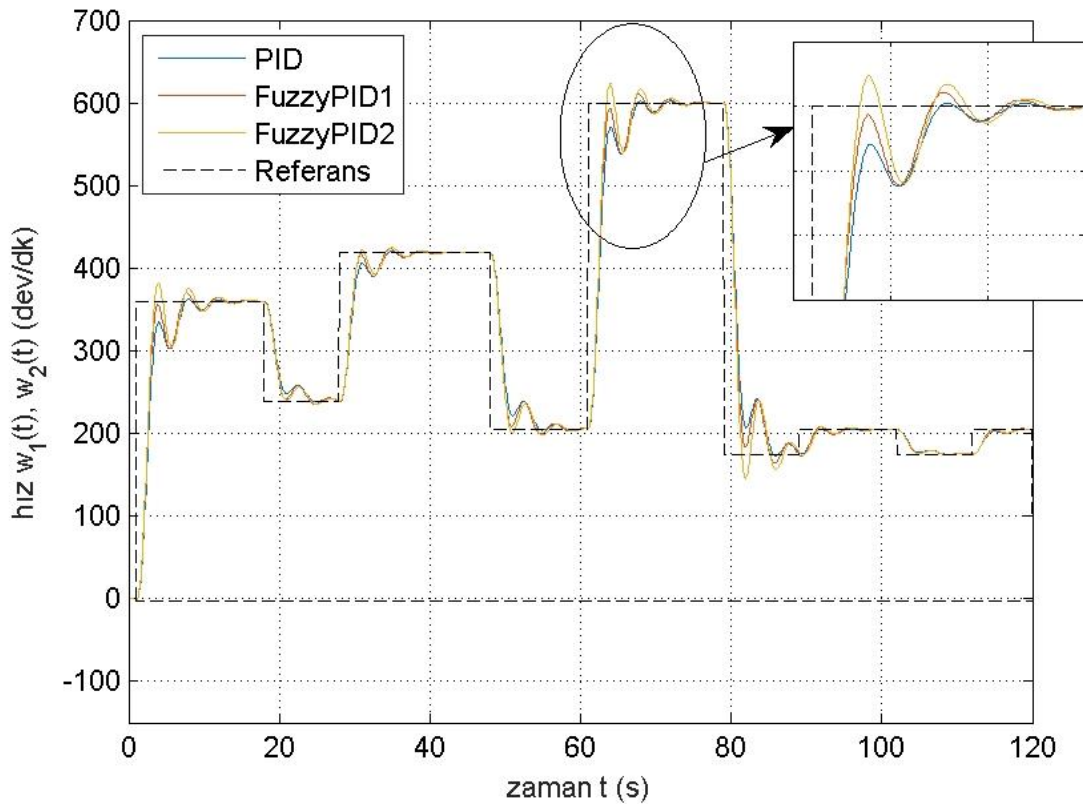


Şekil 4.14 Bulanık PID 2 Denetleyici Blok Şeması.

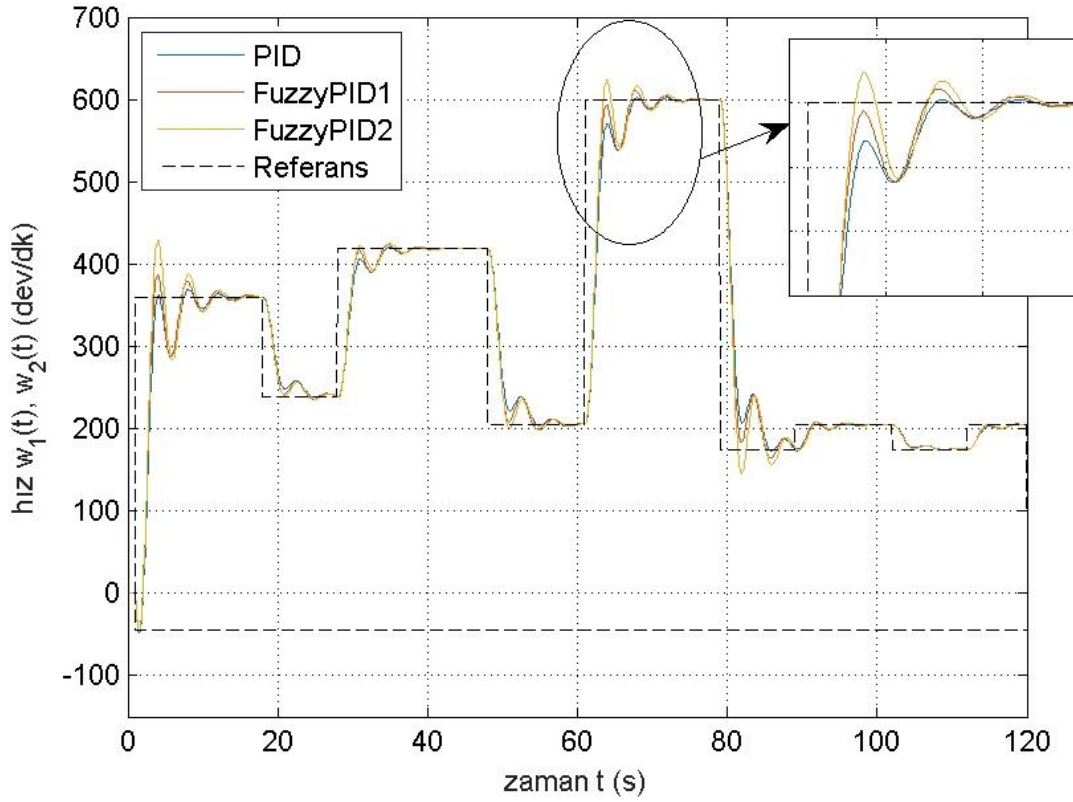
Çizelge 4.1 ile verilen referans yol için PID, Bulanık PID 1 ve Bulanık PID 2 performansları yüksüz, %50 yük ve %100 yük altında incelenmektedir. Yük değişimlerine göre elektronik diferansiyel kullanılmadığı durumda, motor 1 ve motor 2 hızlarının eşit olması beklenir.

Elektronik diferansiyelin olmadığı durumda, Şekil 4.15 yüksüz, Şekil 4.16 %50 yükte ve Şekil 4.17 %100 yükte denetleyici yaklaşımına göre hız değişimlerini göstermektedir.

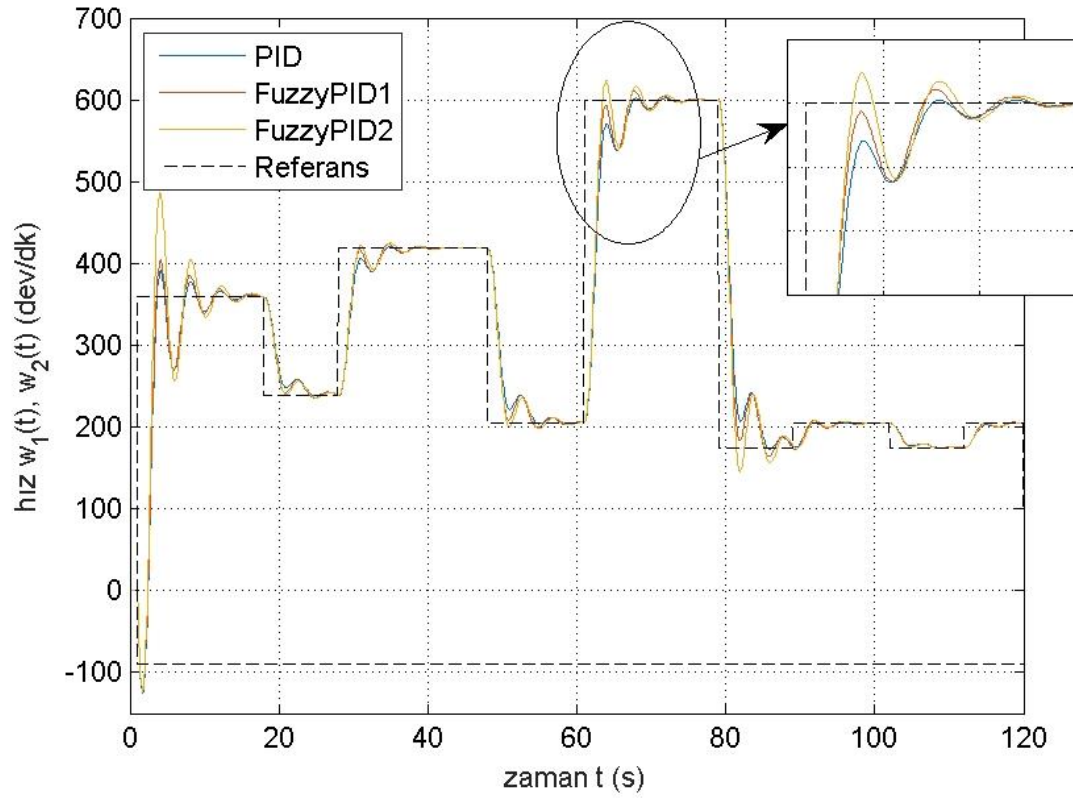
Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de ilk kalkışta bulanık PID 2’de aşım olduğu, yerleşme zamanları arasında önemli farklar olmadığı, yerleşmenin gerçekleşmesine kadar osilasyonlar olduğu görülmektedir. Ayrıca benzetimde ani hız değişimlerinde bulanık PID 1 ve Bulanık PID 2’ye kıyasla PID kullanımının daha yavaş tepki verdiği, performansının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Yükün arttığı durumlarda kalkış anı ve keskin hız değişimlerinin olduğu durumlarda osilasyonun fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 Yüksüz Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.

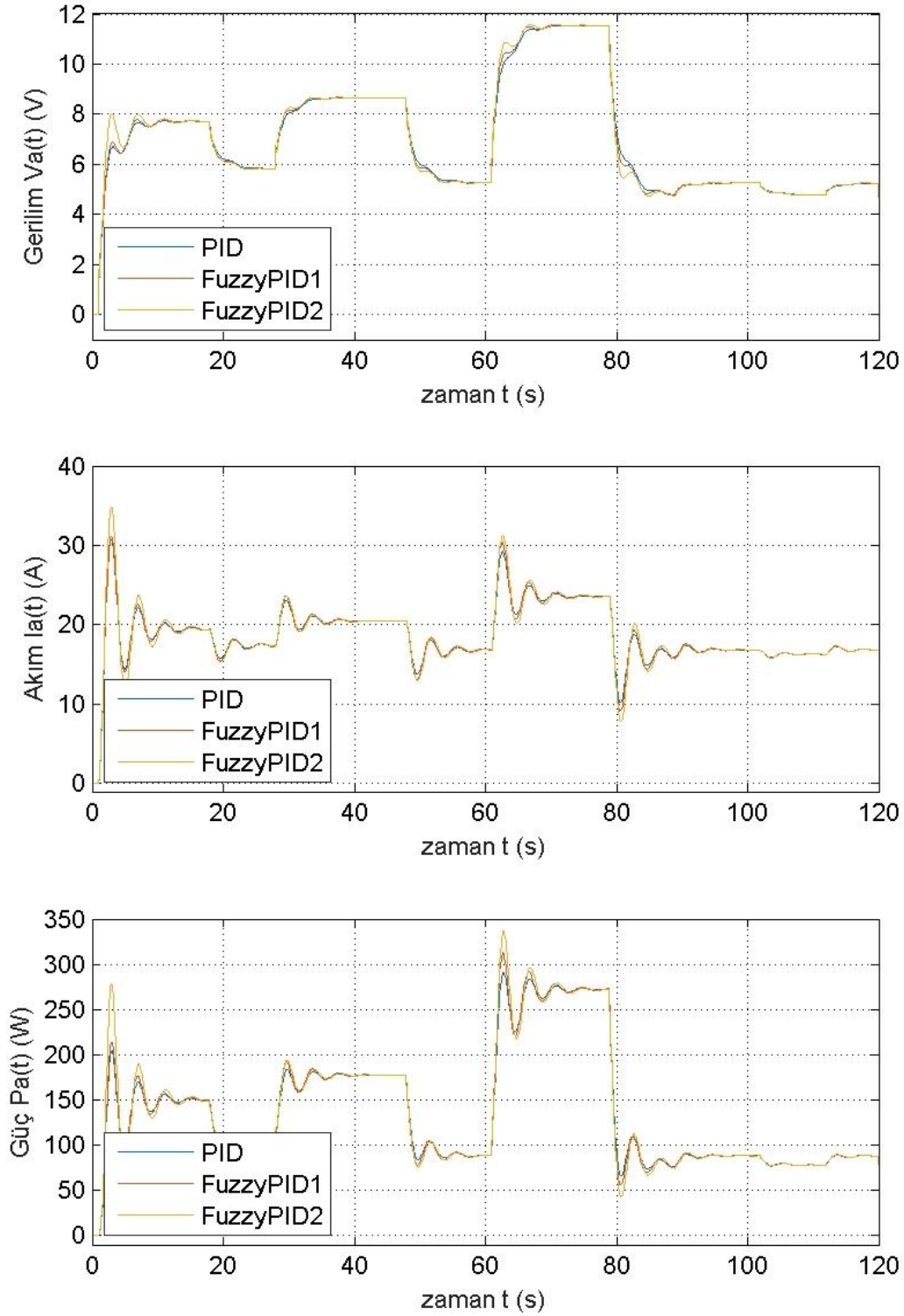


Şekil 4.16 %50 Yük Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.



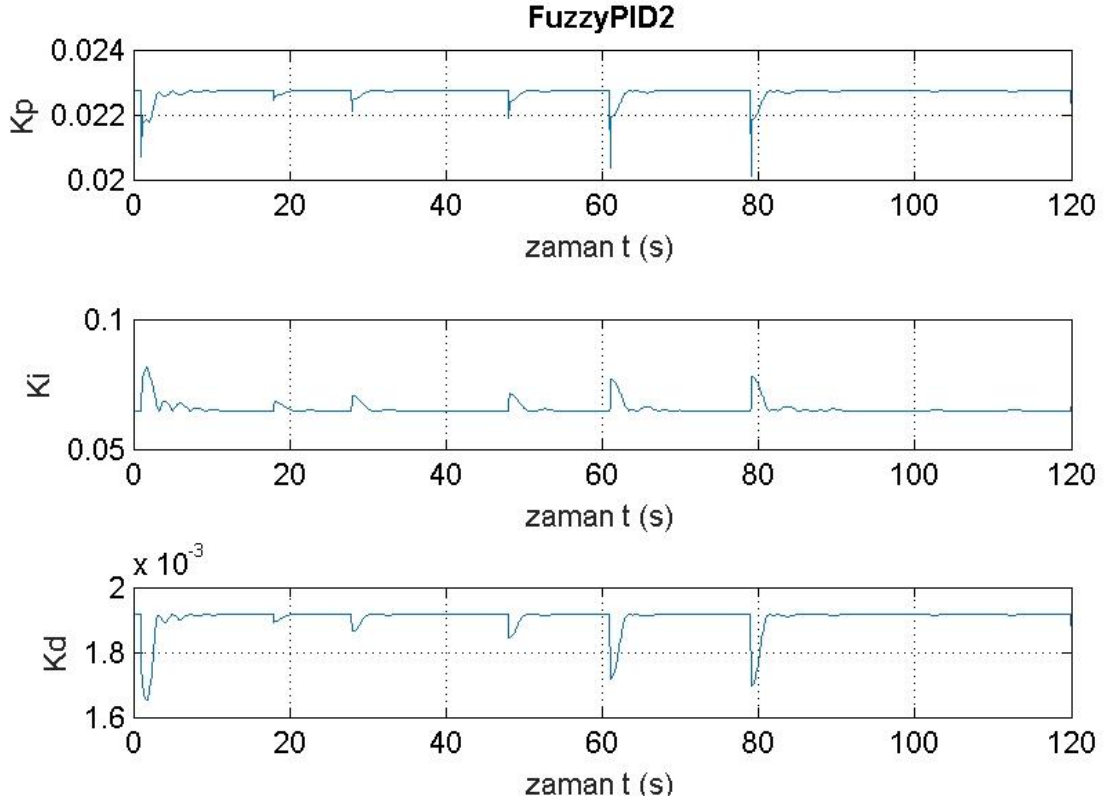
Şekil 4.17 %100 Yük Durumda Benzetim Performans Kıyaslaması.

Şekil 18’de %100 yük altında motor gerilim, akım ve güç değişimleri görülmektedir. Burada Bulanık PID 2 başlangıçta referans hızı yakalayabilmek için çok fazla akım çekmesi nedeni ile yüksek güç değerine ulaşmaktadır ki enerji kaybı toplam $P_a(t) * 120s / 3600s$ Wh olacaktır.



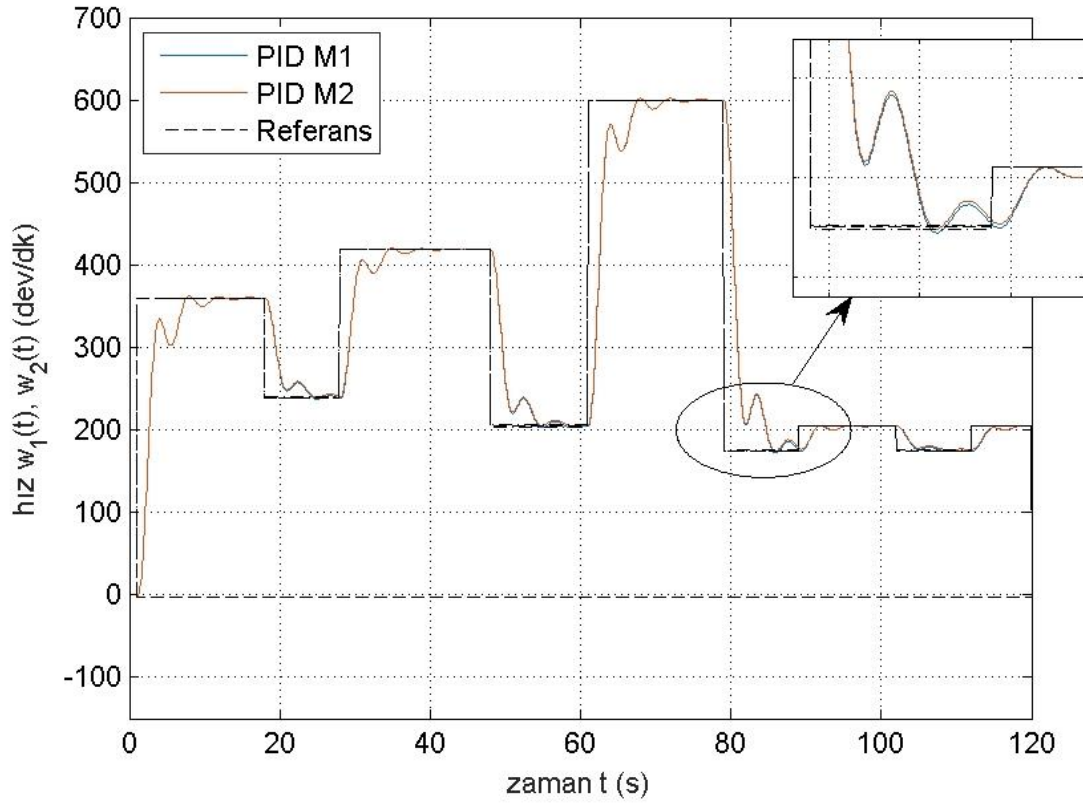
Şekil 4.18 %100 Yük Durumunda Benzetim Motor Gerilim Akım Güç Değişimleri.

Benzetimde sabit katsayılı PID ile birlikte kullanılan bulanık PID 2 katsayılarının değişimi Şekil 19'da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde referans hızdaki ani değişiklik durumlarda K_P ve K_D değerlerinin düşerken K_I değerinin arttığı görülmektedir. K_I 'nin artışı, sürekli hal hatasını azlatırken, en büyük aşımı fazlalaştırmıştır. Bu durum, denetleyici tasarımının beklenen bir sonucu olmakla birlikte, sabit katsayılı PID performansını sınırlamaktadır ki böylece bulanık PID ile performans iyileştirilmesi yapılabilmektedir.

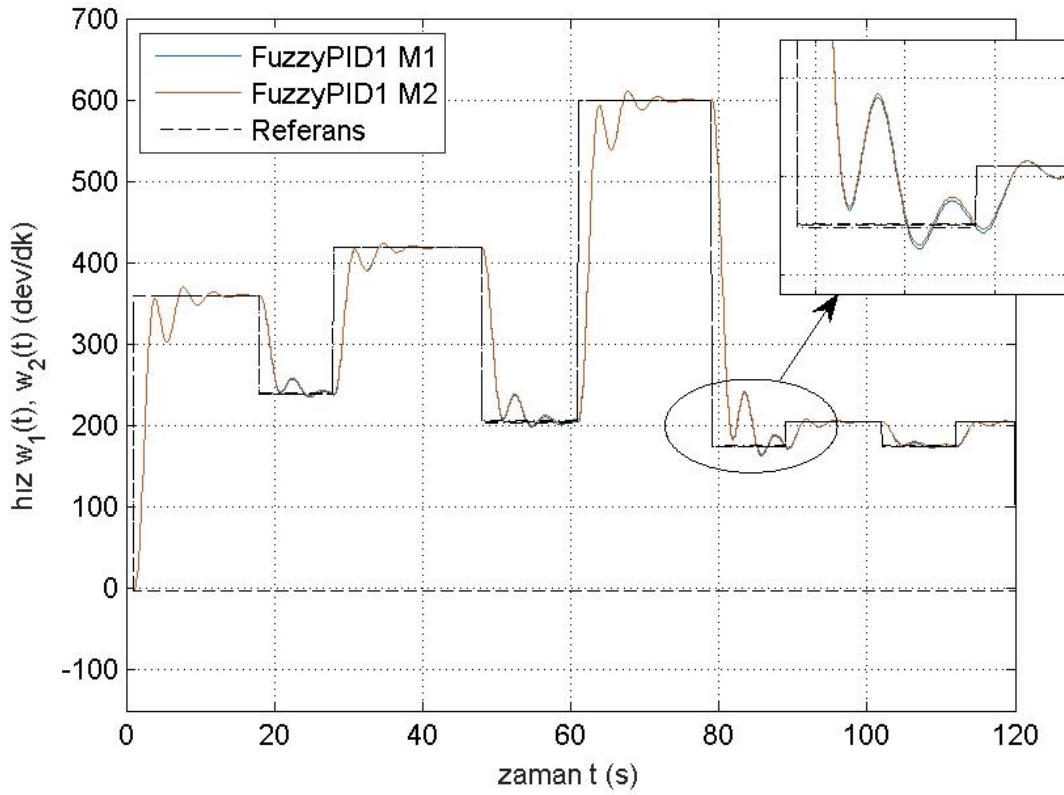


Şekil 4.19 Bulanık PID 2 Denetleyici Katsayıları Değişimi.

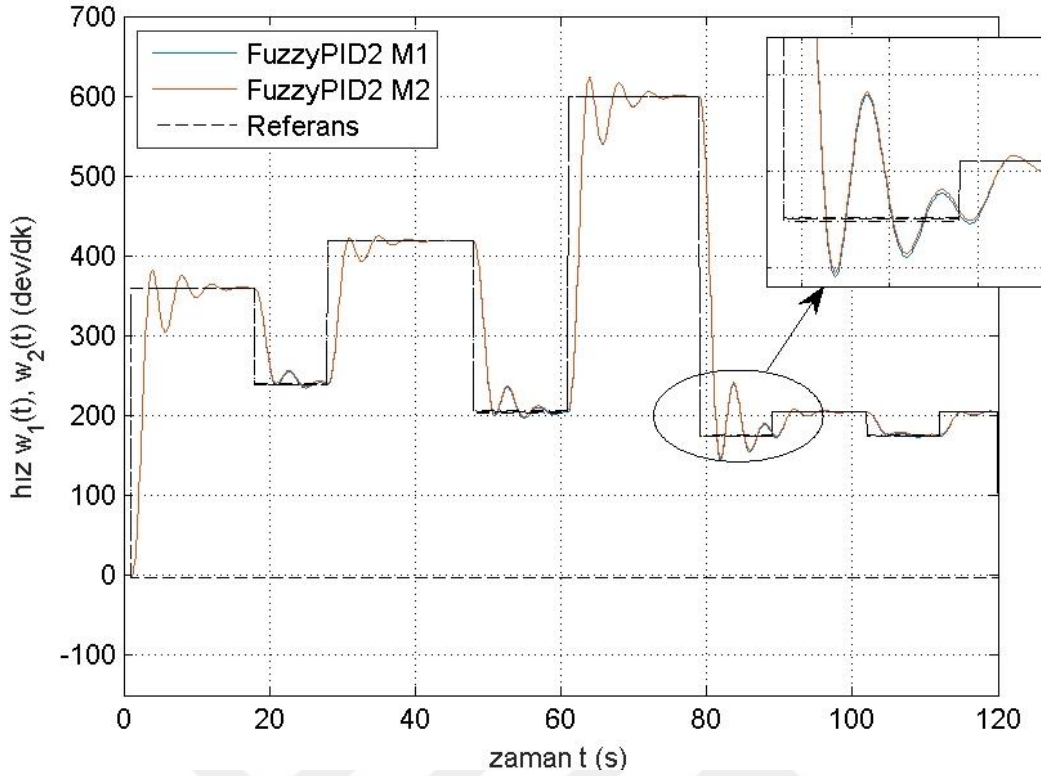
Elektronik diferansiyel kullanımında Motor 1 ve Motor 2 referans hızlarının dönüşlerde değiştirilmesi gerekmektedir. Yüksüz durumun incelendiği, elektronik diferansiyelin uygulandığı durum için her iki motorun hız değişimleri PID denetleyici uygulaması için Şekil 4.20'de, bulanık PID 1 denetleyici uygulaması için Şekil 4.21'de, bulanık PID 2 için Şekil 4.22 de görülmektedir. Benzetim sonucunda bulanık PID 2 denetleyicinin hız değişimlerinin diğer denetleyici yaklaşımlarına kıyasla daha iyi olduğu, referans hızı yakından takip ettiği görülmektedir.



Şekil 4.20 PID Denetleyici ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri.



Şekil 4.21 Bulanık PID 1 ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri.



Şekil 4.22 Bulanık PID 2 ile Elektronik Diferansiyelde Motor 1 Motor 2 Hız Değişimleri.

Çizelge 4.2’te Elektronik diferansiyel yokken, motor hızları eşitken PID, Bulanık PID 1 ve Bulanık PID 2 denetim yaklaşımlarında yük değişimlerine göre benzetim sonuçları verilmektedir. Burada, gidilen yol, hata ve harcanan güç değerleri görülmektedir. Bulanık PID 2 denetleyicinin 1412 m uzunluğundaki yola en yakın yolu elde ettiği ve referans hızları yakından takip ettiği gözlemlenmekte olup, güç harcamasında özellikle başlangıç hızlanmasında yüksek güç değerine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2 Elektronik Diferansiyel Yok İken Motor 1 ve Motor 2 Benzetim Sonuçları.

Yük Durumu	Kriter	PID	Bulanık PID 2	Bulanık PID 2
Yüksüz Durum	Yol (m)	1399.1122	1401.2090	1401.9779
	Hata	9.8432	9.2890	9.2171
	Enerji (Wh)	0.1187	0.1197	0.1205
%50 Yükte	Yol (m)	1394.7337	1397.3079	1399.1796
	Hata	10.8689	10.2714	10.2544
	Enerji (Wh)	0.2616	0.2629	0.2642
%100 Yükte	Yol (m)	1390.0423	1390.9798	1396.6157
	Hata	12.2722	11.7786	11.7356
	Enerji (Wh)	0.4572	0.4582	0.4612

Çizelge 4.3 Elektronik Diferansiyel Var İken Motor 1 Ve Motor 2 Benzetim Sonuçları.

Yük Durumu	Kriter	PID	Bulanık PID 2	Bulanık PID 2
Yüksüz Durum Motor 1	Yol (m)	1397.5207	1399.6393	1400.3807
	Hata	9.8927	9.3380	9.2633
	Enerji (Wh)	0.1185	0.1195	0.1203
Yüksüz Durum Motor 2	Yol (m)	1400.7037	1402.7788	1403.5751
	Hata	9.7941	9.2404	9.1711
	Enerji (Wh)	0.1188	0.1198	0.1206
%50 Yükte Motor 1	Yol (m)	1393.1422	1395.7381	1397.5823
	Hata	10.9183	10.3203	10.3007
	Enerji (Wh)	0.2613	0.2626	0.2639
%50 Yükte Motor 2	Yol (m)	1396.3251	1398.8776	1400.7767
	Hata	10.8197	10.2227	10.2085
	Enerji (Wh)	0.2619	0.2632	0.2645
%100 Yükte Motor 1	Yol (m)	1388.4509	1389.4101	1395.0185
	Hata	12.3216	11.8275	11.7819
	Enerji (Wh)	0.4567	0.4577	0.4607
%100 Yükte Motor 2	Yol (m)	1391.6338	1392.5496	1398.2128
	Hata	12.2230	11.7300	11.6897
	Enerji (Wh)	0.4576	0.4586	0.4616

Elektronik diferansiyelin kullanıldığı durumda referans yola göre tekerleklerin alacağı yol farklı olmaktadır. Bu durumda PID, Bulanık PID 1 ve Bulanık PID 2 denetim yaklaşımlarında yük durumuna göre sonuçlar benzetim ile elde edilmiştir. Burada, motor 1 iç taraftaki sağ tekerlek olup, gidilen yol dıştaki tekerlek motor 2 verisine göre yaklaşık 2 dev/dk daha az olmaktadır. Belirlenen rotada sağa dönüş yapıldığı için içteki tekerleğin daha az dönmesi beklenmektedir. PID, Bulanık PID1 ve Bulanık PID 2 denetleyicileri kıyaslandığında, Bulanık PID 2 denetleyicinin en iyi yolu elde eden denetleyici olduğu görülmektedir. Çizelge 4.3'te Elektronik diferansiyel varken, PID, Bulanık PID 1 ve Bulanık PID 2 denetim yaklaşımlarında yük değişimlerine göre sonuçlar verilmektedir. Ayrıca, referans hızları da diğer denetleyicilere nazaran daha yakından takip ettiği gözlemlenmektedir.

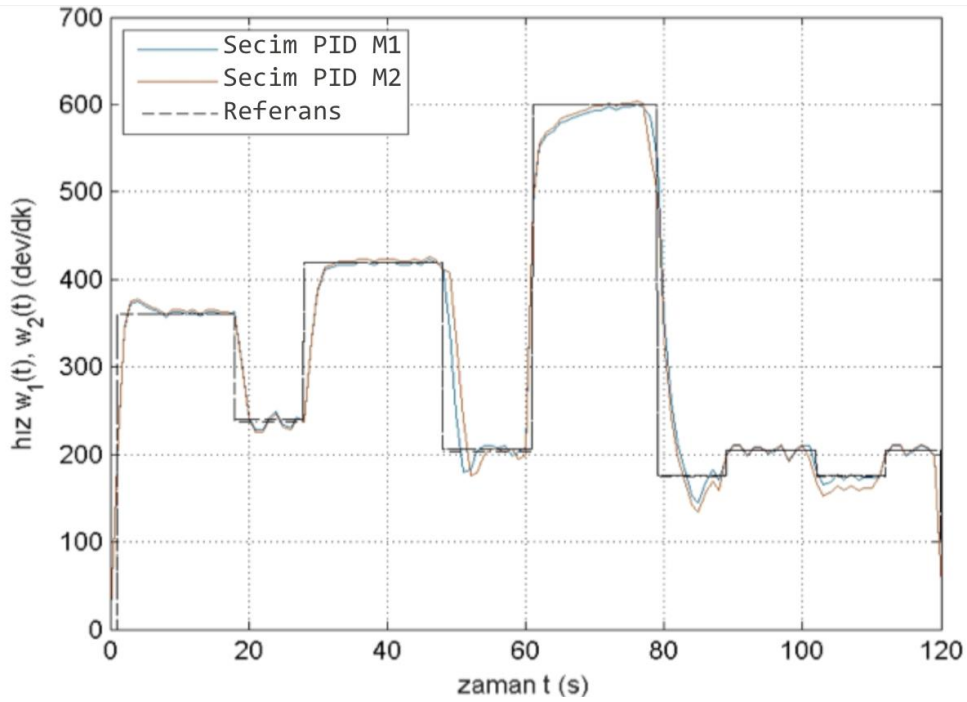
4.4 FARKLI YÜK DURUMLARINDA PID VE SEÇİM PID DENEYSEL SONUÇLAR

Deney düzeneğinde ilk olarak deneysel verilerle yüksüz durumda basamak cevabına göre hesaplanan sabit katsayılara sahip PID uygulanmış, farklı yük durumları test edilmiştir. Grafiklerde "PID" olarak adlandırılmıştır. Daha sonra, referans yola ve yük durumuna bağlı

olarak farklı katsayılarla sahip PID'ler bulunmuş ve bu PID'ler arasından uygun olanın seçimi if-than algoritmasıyla yaptırılarak, test edilmiştir. Seçim ile tesbit edilen PID'lere ait veriler grafiklerde "Secim PID" olarak gözükmektedir. Elde edilen grafiklerde w_1 sağ taraftaki motor 1 hızı iken, w_2 sol taraftaki motor 2 hızını göstermektedir.

Düzenekte sabit PID ve Secim PID olarak iki farklı yaklaşım test edilmiştir. Sabit katsayılı PID için basamak cevabına göre tesbit edilen PID katsayıları kullanılmışken, Secim PID olarak adlandırılan yaklaşımda motor akımlarının 0 ile 4 Amper aralığında değişmesi öngörülerek if-than algoritmasıyla PID tayin edilmiştir. Motor akımları %0-%35 yük durumu ve 0-1.7A aralığında iken PID1 katsayısı, %35-%60 yük durumu ve 1,47A -2,5A için PID2, %60-%100 yük durumu ve 2,25A-4,0A için PID3 şeklinde 3 adet PID belirlenmiştir. Düzenekte motor yüküne bağlı olarak gidilen rotada, çekilen akıma göre if-than algoritmasıyla PID seçimi yapılarak performans gözlemlenmiştir.

Yüksüz durumdaki motor hızları Şekil 4.23'te gösterilmektedir. Yüksüz durumdaki deney düzeneğine uygulanan rotada, viraj durumlarında motor devirlerinde sapsmalar ve aşımalar gözlemlenmektedir. Ayrıca ani hızlanma ve yavaşlamanın olduğu 2. ve 3. düz için yükselme ve yerleşme tam olarak sağlanamamıştır. Yüksüz durumda referans hızdan sapma değeri yaklaşık 75 rpm'dir.



Şekil 4.23 Yüksüz Durum Secim PID ile Hız Değişimi.

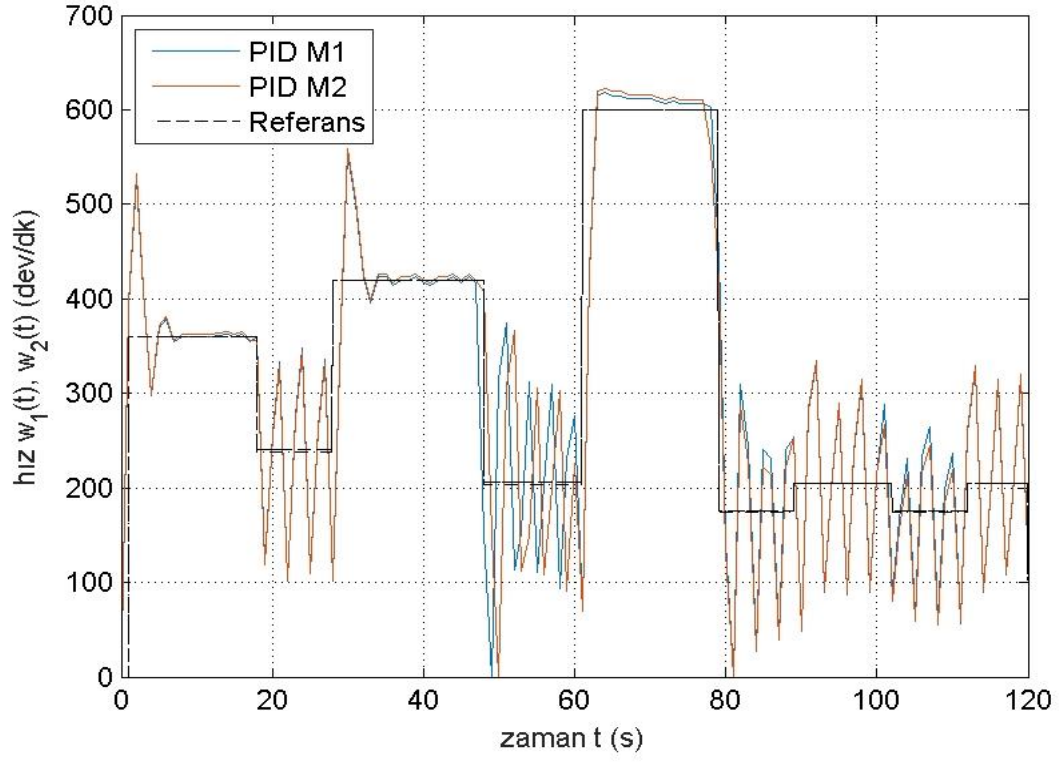
%50 yük uygulandığında elde edilen hız değişimleri Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, motorlar aşım, osilasyon sebebiyle referans hızı yakalayamamaktadır. Referans hızdan sapma değeri yaklaşık 114 rpm'dir. Şekil 4.25'te %50 Yükte tezde önerilen Secim PID'ye ait hız değişimleri gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile belirlenmiş katsayılara sahip Secim PID yaklaşımı kullanıldığında motorlar referans hızı sabit katsayılı PID'ye nazaran daha iyi takip etmiş olup, ani hız değişimlerinde aşım, osilasyon gözlemlenmektedir. Referans hızdan ortalama sapma değeri yaklaşık 74 rpm'dir.

Şekil 4.26'da %100 yükte deneysel verilerle yüksüz durumda basamak cevabına göre hesaplanan PID uygulanarak elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Buna göre, viraj durumlarında motor devirlerinde aşım, osilasyon sebebiyle referans hızın yakalanamadığı görülmektedir. Referans hızdan sapma değeri yaklaşık 100 rpm'dir. %100 Yükte önerilen seçim ile belirlenmiş katsayılara sahip Secim PID ile elde edilmiş hız değişimleri Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Tam yükte sabit katsayılı PID ile önerilen yöntemle belirlenmiş katsayılara sahip Secim PID kullanımı kıyaslandığında yükselme ve yerleşme zamanı ile en büyük aşımın iyileştiği görülmektedir. Referans hızdan ortalama sapma değeri yaklaşık 70 rpm'dir.

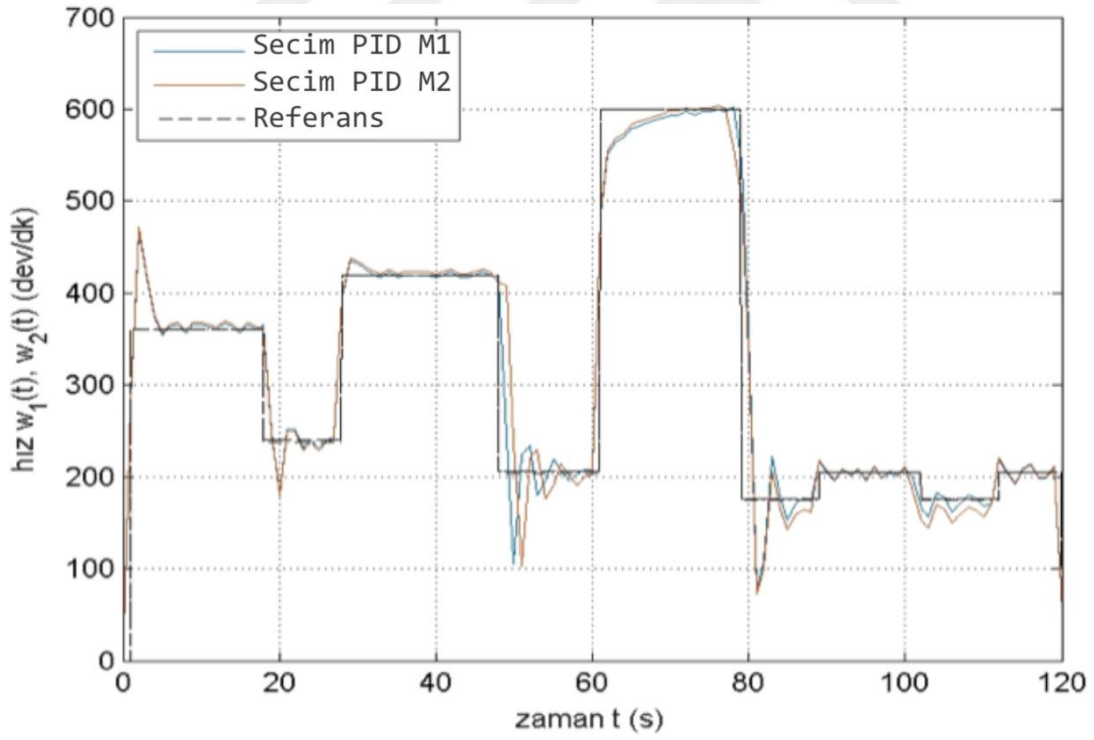
Yüksüz, yarım yük %50 ve tam yük %100 sabit katsayılı PID ve Secim PID uygulamasında elde edilen hız değişim verileri ışığında elde edilen sapma değeri olan karesel hata (E) ile enerji kaybı (ϕ) kıyaslaması Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Secim PID önerisi kullanıldığında, %50 yükte motorların referans hızı yakalamadaki sapma miktarı PID'ye göre %35 iyileşirken, %100 yükte ortalama %30 iyileştiği görülmektedir.

Çizelge 4.4 Yük Değişimlerine göre PID ve Secim PID için Hata ve Enerji Kayıpları.

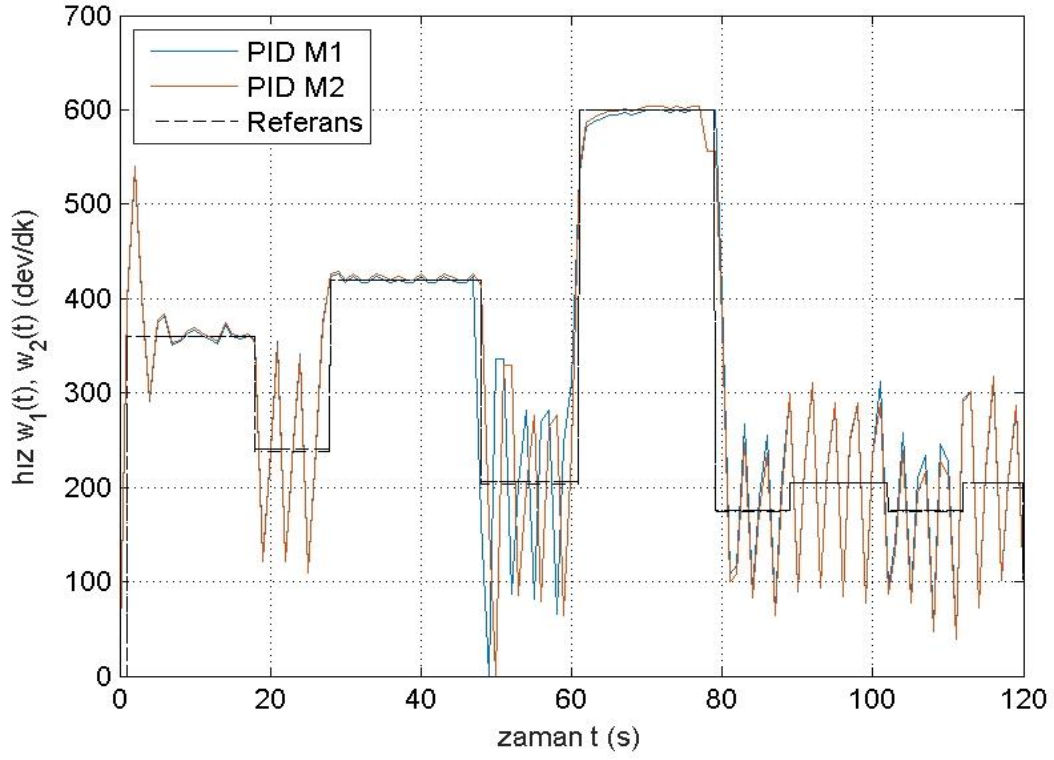
Kriter		%0 Yükte Secim PID	%50 Yükte PID	%50 Yükte Secim PID	%100 Yükt PID	%100 Yükt Secim PID
Karesel Hata, E	rpm	75	114	74	100	70
Enerji Kaybı, ϕ	Wh	0.12	0.28	0.25	0.49	0.44



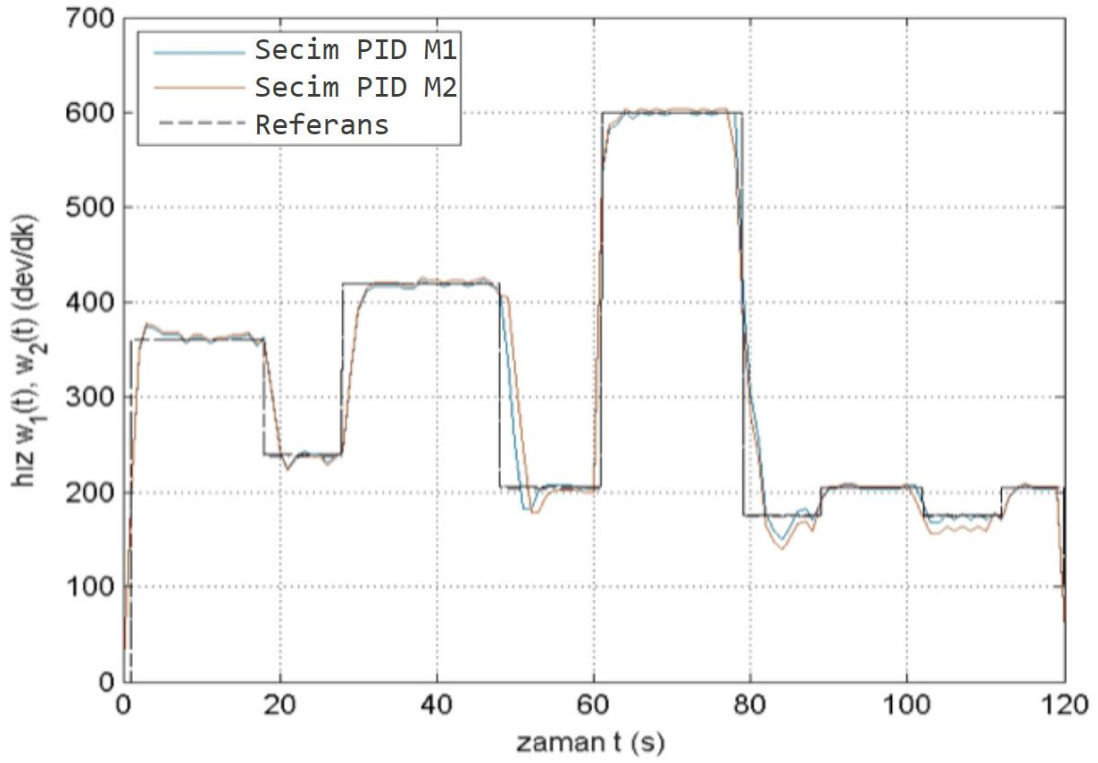
Şekil 4.24 %50 Yükte Sabit Katsayılı PID İle Hız Değişimi.



Şekil 4.25 %50 Yükte Secim PID ile Hız Değişimi.



Şekil 4.26 %100 Yükte Sabit Katsayılı PID İle Hız Değişimi.



Şekil 4.27 %100 Yükte Secim PID İle Hız Değişimi.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, aracın arka iki tekerleğine konumlandırılmış iki adet BLDC motora sahip, gücünün tümünü bataryalardan sağlayan, %100 elektrikli araç için elektronik diferansiyel denetim sistemi tasarlanmıştır. Elektronik diferansiyel sistemindeki elektrik motorlarının hız, akım gibi değişimleri öncelikle benzetim ile değerlendirilmiş ve önerilen PID seçim uygulamasıyla performans gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen veriler ışığında PID ve Secim PID denetim yaklaşımları deney düzeneğine uygulanmış ve motorların denetimi başarı ile sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda kullanılan birbirinden bağımsız iki fırçasız doğru akım motorunun denk yük paylaşımı ve denk hız kontrolü, PID ve motor akımlarına göre if-than algoritmasıyla belirlenen PID seçimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem girişine farklı ve sürekli değişen referans sinyalleri uygulanarak motor hızının her iki kontrol yönteminde de istenilen referans değerinde tutulması amaçlanmıştır. Böylelikle elektrikli araçlarda kullanılan elektronik diferansiyel sistemlerin bir bölümü üzerine çalışılmıştır.

Sistem için ilk olarak motor ve sürücü birlikte olarak deneysel birim basamak cevabı alınmıştır. Sonrasında transfer fonksiyonunun kestirilmiş, bu transfer fonksiyonuna göre PID katsayıları hesaplanmıştır. Bu testlere ait veriler sabit katsayılı PID olarak anılmıştır. Bu katsayılar ile motor %0, %50 yükte ve %100 yükte test edilmiştir. Bu testler sonucunda yüksüz hal için bu katsayılar sağlıklı şekilde çalışırken, %50 ve %100 yüklerde motorun referans hıza ulaşmasında aşım ya da ulaşamama durumları görülmüştür. Yüke uygun PID seçimi motorun çektiği akımlara ve rotaya göre if-than algoritmasıyla sağlanmıştır. Testler sonucunda önerilen Secim PID yaklaşımı kullanıldığında, referans hıza ulaşma sürelerinin, motor devri bazında ortalama sapma değerlerinin sabit katsayılı PID kullanımına göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Benzetim ve deney sonuçları bölüm 4'te görülmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında parametrelerinin akım ve rota bilgisi ışığında motor yüküne göre belirlenmesi yöntemi olan Secim PID'nin daha iyi sonuç verebilen bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca motorların mekanik frenleme yapmasını engellenerek, boşa enerji harcamalarının önüne geçtiği, enerji verimliliği de sağladığı görülmüştür. Bu yöntem ile farklı yol koşulları için de PID katsayıları hesaplanabileceğinden hassasiyet ve sürüşte konfor artışı sağlanabilecektir.

Bu sonuçlar ışığında ani hız değişimlerinin olduğu durumlarda, referans hıza ulaşmada osilasyon gözlemlenmiştir. İleriki çalışmalarda yük ve hız gibi değişkenlere dair fonksiyonlar çeşitlendirilerek, motorların referans hıza daha performanslı ulaşması için adaptif PID seçimi üzerine çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Chan C C and Chaut K T** (1993) Power Electronics Challenges in Electric Vehicles. Proceedings of the IECON '93. *19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 15-19 Kasım 1993*, Maui, ABD, 2: 701-706.
- [2] **Maggetto G and Van Mierlo J** (2000) Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey *IEEE Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, 11 Nisan 2000, Durham, UK, 110-111.
- [3] **Ünlü N ve Karahan Ş** (2003) Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi, *Elektrikli Araçlar*, ISBN: 9789754033069, Tübitak MAM, Gebze, Kocaeli, e kitap, 5-15.
- [4] **Uçarol H ve Kural E** (2009) Ulaşımında Enerji Verimliliği için Hibrid ve Elektrikli Araçlar. *Mühendis ve Makina*, 50 (594): 66-71.
- [5] **Boyalı A** (2008) Hibrid Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, İstanbul, 161.
- [6] **Bodur A ve Çervatoğlu N** (2013) *Elektrikli Araç Teknolojisi*, Larminie J, Lowry J, (Ed.), 1st edition, ISBN: 978-605-01-0443-1, Wiley TMMOB EMO, Ankara, 333 s.
- [7] **Husain İ** (2010) Introduction to Alternative Vehicles. *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, 2nd edition, ISBN: 9781439811757, CRC press, New York, 8-10.
- [8] **Şenol R** (2006) Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 47 (563): 37-50.
- [9] **G. Sen, Boynuegri A R ve Uzunoglu M** (2011) Elektrikli Araçlarda Şarj Yöntemleri ve Araçların Şebekeye Bağlanmasında Karşılaşılan Problemlere Yönelik Çözüm Önerileri. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu FEEB 2011*, 5-7 Ekim 2011, Elazığ, 357-362.
- [10] **Gomez J C and Medhat M M** (2003) Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (3): 975-981.
- [11] **Morcos M M and Dillman N G** (2000) Battery Chargers for Electric Vehicles, *IEEE Power Engineering Review*, 20 (11): 8-11.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Yıldırım M, Öksüztepe E, Tanyeri B and Kürüm H** (2016) Electronic Differential System for an Electric Vehicle with In-Wheel Motor, *IEEE Power and Energy Conference*, 19 Şubat 2016, İllinois ABD, 1048-1052.
- [13] **Nasri A, Gasbaoui B and Fayssal B M** (2015) Sliding Mode Control For Four Wheels Electric Vehicle Drive. *International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2015*, 8-9 Ekim 2015, Romania, 518-526.
- [14] **Gürmeriç M** (2015) Elektrikli Taşıtlar İçin Elektronik Diferansiyel Tasarımı Ve Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı, İstanbul, 80 s.
- [15] **Bahri A, Gupta A and Daya F JL** (2014) Performance Enhancement of Electronic Differential in Electric Vehicles Using a Novel Wavelet Controller. *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2014 IEEE International Conference*, 16-17 Aralık 2014.
- [16] **Kahveci H, Okumuş H İ ve Ekici M** (2013) An Electronic Differential System Using Fuzzy Logic Speed Controlled In-wheel Brushless DC Motors. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 13-17 Mayıs 2013, İstanbul, Türkiye, 881-885.
- [17] **Krishnakumar V and Jeevanandhan S** (2011) Four switch three phase inverter control of BLDC motor. *Electrical Energy Systems (ICEES)*, 3-5 Ocak 2011, Newport Beach, CA, ABD, 139-144.
- [18] **Huang Q, Li J and Chen Y** (2010) Electric Motor and their Drives. *Control of Electric Vehicle*, Soylu Ş (Ed.) 1st edition, ISBN 978-953-307-100-8, Sciyo, e-book, 163-171.
- [19] **Zakariah R and Yadaiah N** (2009) Low-Cost High Performance Brushless DC Motor Drive for Speed Control Application. *International Conference on Advance in Recent Technologies in Communication and Computing*, Kerala, İndia, 27-28 Ekim 2009, 456-460.
- [20] **Guillermo A M, Cristian H D A, Guillermo B and Guillermo G** (2008) A Neighborhood Electric Vehicle with Electronic Differential Traction Control. *ICON 2008 34th Annual Conference of IEEE*, 10-13 Kasım 2008, Orlando, FL ABD, 2757-2763.
- [21] **He P, Hori Y, Kamachi M, Walters K and Yoshida H** (2005) Future Motion Control to be Realized by In-Wheel Motored Electric Vehicle. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*, 6-10 Kasım 2006, Raleigh, NC ABD, 2632-2637.

KAYNAKLAR (devam ediyor)


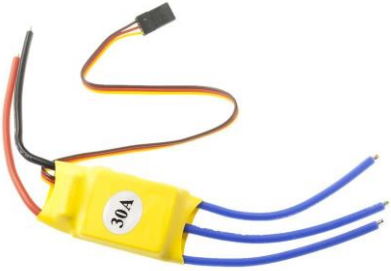

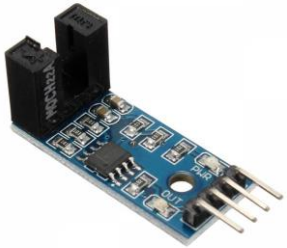
- [22] **Fujimato H, Saito J, Tsumasaka A and Noyuchi A** (2004) Motion Control and Road Condition estimation of Electric Vehicles with Two In-Wheel Motors. *IEEE International Conference on Control Applications*. 2-4 Eylül 2004, Taipei, Tayvan, 1266-1271.
- [23] **Sakai S, Sado H and Hori Y** (1999) Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1 Mart 1999, IEEE /ASME, 4: 9-16.
- [24] **Zhai L and Dong S** (2011) Electronic Differential Speed Steering Control for Four in-wheel Motors Independent Drive Vehicle. *9th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 21-25 Haziran 2011, Taipei, Tayvan, 780-782.
- [25] **Li G, Hong W, Zhang D and Zong C** (2012) Research on Control Strategy of Two Independent Rear Wheels Drive Electric Vehicle. *International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering, Physics Procedia*, 24 (A): 87-93.
- [26] **Keskin A** (2009) Hibrid Motor Teknolojileri ve Uygulamaları. *Mühendis ve Makine*, 50 (597): 12-20.
- [27] **Gao D W and Emadi A** (2007) Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles *IEEE Volume 95*, 4 April 2007, 729-745.
- [28] **Keleş R** (1996) İnsan, Çevre, Toplum. *İnsan Çevre Toplum içinde*, Keleş R (Ed.), 1. Basım, ISBN: 9755330259, İmge Kitabevi, Ankara, 13-16.
- [29] **Rashid M H** (2015) DA Sürücüler. *Power Electronics Devices, Circuits, and Applications*, Sünter S (ed.), 4. Baskı, ISBN: 9786053200598, Nobel Yayınevi, Ankara, 675-698.
- [30] **Austin H** (2006) *Electric Motors and Drives, Fundamentals, Types and Applications*, 3rd Edition, ISBN: 978-0-7506-4718-2, Newnes, Oxford, İngiltere, e-book, 410 pp.
- [31] **Bal G** (2011) Fırçasız DA Motorları ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar. *Özel Elektrik Makinaleri*, 4. Baskı, ISBN: 9789750201578, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 197 s.
- [32] **Efe M Ö** (2012) PID Denetleyiciler. *Otomatik Kontrol Sistemleri*, 1. Baskı, ISBN: 9789750243967, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 281-300.
- [33] **Lee C C** (1990) Fuzzy Logic In Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions*, 20 (2): 404-418.
- [34] **Mraz S J** (2013) HUB Motors for All-Electric Vehicles Still Have Some Technological Challenges to Overcome, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8 (1): 90-99.

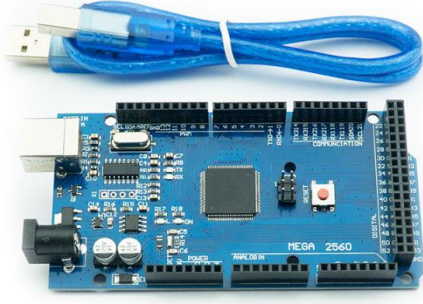

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [35] **Won-Young J, In-Jae L, Yun-Hyun C, Dae-Hyun K and Yon-Do C** (2007) Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2 (1): 61-67
- [36] **Jung Y, Long T and Nelson J** (2008) Unique Axial Flux Motor Design Delivers Superior Torque Density. *European Ele-Drive Conference International Advanced Mobility Forum*, 11-13 Mart 2008, Geneva, Switzerland, 1-6 .
- [37] **Hüner E, Ekren N ve Akıncı T Ç** (2008) Teker Motorlar ve Teker Motorların Elektrikli Araçlarda Kullanımına İlişkin Bir İnceleme. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3 (2): 298-309.
- [38] **Garriso F P, Batzel T D, Comanescu M and Muller B A** (2008) Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator. *IAJC-IJME International Conference*, ISBN 978-1-60643-379-9, Tennessee, USA, 190-202.
- [39] **Uysal A and Soylu E** (2017) Embedded System Design and Implementation of an Intelligent Electronic Differential System for Electric Vehicles. *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 8 (9): 129-134.
- [40] **Çetinkaya S** (2010) Diferansiyel ve Akslar. *Taşıt Mekaniği*, 5. Baskı, ISBN: 9789755911038, Nobel Yayıncılık, Ankara, 83-84.
- [41] **Uysal A and Soylu E** (2017) Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics*, 23 (5): 1392-1398.

EK AÇIKLAMALAR

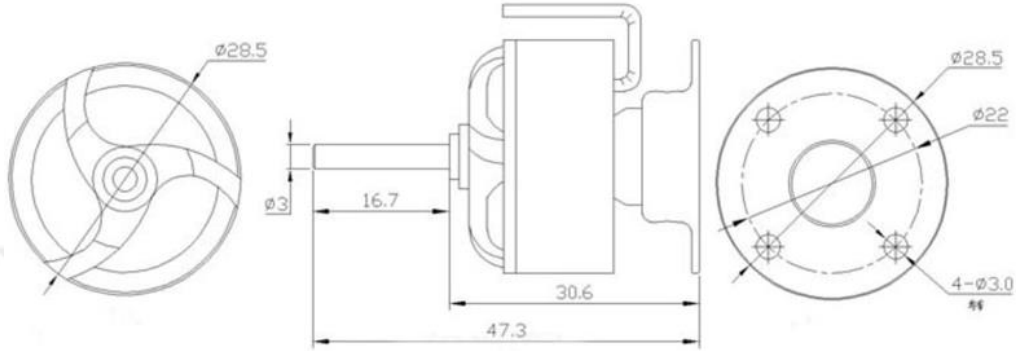
EK A: Materyal Listesi

Malzeme Adı	Özellikler	Ürün Görseli
Fırçasız DC Motor	Devir: 1200 rpm Besleme: 12V Verim: %82 Akım: 16A İç Direnç: 150mohm	
Motor Sürücü Devresi	Çıkış daimi akım: 30A Anlık çıkış akımı: 40A (Max 10sn) Giriş Voltajı 12,5 V	
Akım Sensörü	Hall Effect, Open Loop Birincil Nominal 200A İkincil Sinyal: 4V Besleme gerilimi: $\pm 15VDC$ Dönüşüm Oranı 200 A/ 4 V • Tepki Süresi: 0.003 ms	
Hız Sensörü	• Çalışma Gerilimi 3,3V-5V • Çıkış formatı: 0 - 1 • LM393 voltaj karşılaştırıcısı	

Malzeme Adı	Özellikler	Ürün Görseli
Adunio Mega	<ul style="list-style-type: none">• Çalışma voltajı: 5V• Giriş voltajı : 7-12V• Giriş voltajı (limit): 6-20V• Dijital I / O: 54 Pin• PWM Dijital I/O: 15 Pin• Analog Giriş : 16 Pin• I/O DC akım: 20 mA• 3.3V Pin DC akımı: 50 mA	 A blue Adunio Mega board is shown with a blue USB cable. The board features a USB Type-B port, a DC power jack, and a reset button. The text "MEGA 2560" is visible on the board.
Enkoder		 Two circular encoders are shown: one black and one gold. Both have a central hole and a ring of slots around the perimeter.

EK B: Fırçasız DC Motor - Emax CF2822 1200KV Brushless Teknik Özellikler

No.Of cells	2-3X Li-Poly	Model	Cell Count	RPM/V	Prop (APC)	RPM	MAX current (<60S)	Thrust
Stator dimensions	22x10mm	CF2822	3S	1200	10x5	7700	15A	840g 1.85lb.
Shaft diameter	3mm				10x4.7 (SLOW)	7100	16.5A	850g 1.87lb.
Weight	39g/1.38oz.	CF2812	3S	1534	7x4	12250	10.5A	580g 1.27lb.
Recommended model weight	200-600g				7x6	11000	15.5A	730g 1.61lb.
Recommended prop without gearbox	APC 7X6 APC 8X3.8 APC 9X4.5 APC 10X5							



ÖZELLİKLER

No. Of cells	2-3 Li-Poly
RPM/V	1200/1534 RMP/V
zMax. efficiency	82%
Max. efficiency current	7 -16 A (>75%)
No load current / 10 V	0.9 A
Current capacity	16 A/60 s
Internal Resistance	150 mohm
Stator Dimensions	22x10 mm
Shaft diameter	3 mm
Weight	39 g
Recommended model weight	200 -600 g
Recommended prop without gearbox	APC 7X4 APC 8X3.8 APC 9X4.5 APC 10X5



Model	Cell Count	RPM/V	Prop	RPM	Current	Thrust
CF2822	3S	1200	10X5	7100	14.5A	710g/1.5lb.
			10X4.7(SLOW)	8100	14.5A	745g/1.64
CF2212	3S	1534	7X4	12250	10.5A	580g/1.27lb
			7X6	11000	15.5A	730g/1.61lb

EK C: 30A ESC BLDC Motor Sürücü Teknik Özellikleri

30Ampere kadar 2, 6 ve 12 kutuplu fırçasız DC motorları sürebilen, EMAX CF2822 1200KV fırçasız motora uygun motor sürücüdür.

30A ESC Fırçasız Motor Sürücü Özellikleri

Çıkış daimi akım: 30A

Anlık 10sn çıkış akımı:40A

Giriş Voltajı 8,7-12,5V

2-3 hücre Lityum pil

5-9 hücre NiCd/NIMH pil

BEC: 1A/5V linier-iç voltaj besleme devresi

Maksimum hız:

2 kutuplu motor: 21000 devir/dak

6 kutuplu motor: 70000 devir/dak

12 kutuplu motor: 35000 devir/dak

Boyutlar UxExY: 45mm X 24mm X 11mm

Ağırlık : 25g

EK D: Kızılötesi Hız Sensörü Teknik Özellikleri

Çalışma Gerilimi 3,3V-5V

Çıkış formatı: dijital mantık (0 ve 1)

Kolay kurulum

Boyutlar: 3.2cm x 1.4cm

Geniş voltaj karşılaştırıcısı LM393





ÖZGEÇMİŞ

Sümevra EREN, 1979 yılında İzmir’de doğdu. İlk öğrenim ve lise öğrenimini İzmir’de tamamladı. 2003 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 2007 (Şubat) yılında mezun olduktan sonra 2011 yılında ZBEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. 2007-2008 yılları arasında Otes Elektronik Tic. Ve Ltd. Şti. firmasında ARGE mühendisi olarak yüksek güçte ve frekansta SMPS cihazları ile ilgili görev yaptı. 2008 (Mayıs) ile 2015 (Kasım) tarihleri arasında Korkmaz Mutfak Eşyaları A.Ş’de 2 üretim tesisinin kalite müdürlüğü görevini üstlendi. 2015 yılından itibaren kurucu ortağı olduğu Biensis’te çalışmaktadır. ZBEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına devam etmektedir.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

E-posta: sumeyra.eren.se@gmail.com