



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ROBOTİK SİSTEMLER İÇİN ELEKTRONİK
KONTROL ÜNİTESİ TASARIMI

Furkan YEŞİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan YEŞİL tarafından hazırlanan “ROBOTİK SİSTEMLER İÇİN ELEKTRONİK KONTROL ÜNİTESİ TASARIMI” adlı tez çalışması 17/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

.....

Danışman

Prof. Dr. Cemil SUNGUR

.....

Üye

Doç. Dr. Akif DURDU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Furkan YEŞİL

Tarih: 17/05/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ROBOTİK SİSTEMLER İÇİN ELEKTRONİK KONTROL ÜNİTESİ TASARIMI

Furkan YEŞİL

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

Danışman: Prof. Dr. Cemil SUNGUR

2023, 88 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU
Prof. Dr. Cemil SUNGUR
Doç. Dr. Akif DURDU

Robotik sistemler sensör gibi çevre algılama birimleri vasıtasıyla ortamı tanıyarak hareket vasıtasıyla verilen görevleri kendi kontrolünde yerine getirebilen mekanizmalar olarak tanımlanabilir. Robotik sistemler günümüzde pek çok alanda işleri otomatikleştirmek amacıyla bir anaç veya yardımcı ara sistem olarak kullanılabilir. Bu kullanım alanları savunma sistemleri, lojistik, tıbbi işlemler v.b. yerlerde farklı örnekleri ile karşımıza çıkmaktadırlar. Kullanım yelpazesi geniş olan robotik sistemlerin verilen görevleri yerine getirmesi için gelen verileri işleyebileceği bir kontrol ünitesine ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Kontrol ünitesi bir robotik sistemin bulunduğu ortamın değişkenlerini anlamlandırabilme ve gereken hareket reaksiyonunu gösterebilme becerisi sağlayan elektronik ve yazılımsal sistem olarak adlandırılabilir. Bu tez çalışmasının konusu da robotik sistemleri kontrol edebilecek kapasiteye sahip genel amaçlı bir kontrol donanımı tasarımının oluşturulmasıdır.

Gerçekleştirilen çalışmanın odak noktası donanımsal özellikleri yeterli ve gömülü yazılım açısından kontrolcü denetimi iyi derecede, yerli üretime katkı potansiyeli olan bir donanım ortaya koymaktır. Çalışmaları kısaca özetlemek gerekirse öncelikle kontrol donanımının gereksinimleri bazında özellikler belirlenerek açık kaynak yazılım olan KiCAD devre tasarım programında şematik ve PCB (Baskı Devre Kartı) tasarımları gerçekleştirilmiştir. Donanım tasarımı ve üretim aşamaları tamamlandıktan sonra kontrol ünitesi merkezinde kullanılan STMicroelectronics marka MCU (Mikrodenetleyici Birim) ile firmanın sağlamış olduğu ücretsiz STM32CubeIDE derleyicisinde genel kontrolcü yazılım tasarımı yapılmıştır. Donanım ve gömülü yazılım tamamlandıktan sonra içerisinde bulunduğu mekanizmayı kontrol edebilmesi ve performans testlerinin gerçekleştirilmesi hedefinde bir otonom mobil robotunun (AMR) kontrol panosuna dahil edilerek ana bilgisayar ile koordineli bir şekilde çalıştırılmıştır. Mobil robotun tüm sistem modellemesi bilinmediği için robottan alınan giriş ve çıkış verileri bazında MATLAB (Öğrenci Sürümü) sistem tanımlama ve simülasyon araçları kullanılarak transfer fonksiyonu oluşturulmuş, bu transfer fonksiyonu üzerinden farklı türlerde kapalı kontrol yöntemleri denenerek kontrol ünitesinin performans analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak bu tez çalışmasında robotik sistemlerde kullanılması hedeflenen bir REKÜ (Robotik Elektronik Kontrol Ünitesi) donanımının tasarlanması ve geniş kapsamlı analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Donanım Tasarım, Gömülü Yazılım, Kapalı Kontrol Yöntemleri, Kontrol Donanımı, REKÜ, Robotik, Sistem Tanımla

ABSTRACT

MS THESIS

**ELECTRONIC CONTROLLER DESIGN FOR
ROBOTIC SYSTEMS**

Furkan YEŞİL

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

Advisor: Prof. Dr. Cemil SUNGUR

2023, 88 Pages

Jury

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

Prof. Dr. Cemil SUNGUR

Doç. Dr. Akif DURDU

Robotic systems can be defined as mechanisms that can recognize the environment through environmental sensing units such as sensors and perform the tasks given by motion under their own control. Today, robotic systems can be used as a rootstock or auxiliary intermediate system in order to automate works in many areas. These usage areas are defense systems, logistics, medical procedures, etc. They appear in different places with different examples. It is known that robotic systems with a wide range of uses need a control unit that can process incoming data in order to fulfill the given tasks. The control unit can be called an electronic and software system that provides the ability to make sense of the variables of the environment in which a robotic system is located and to show the required movement reaction. The subject of this thesis is to design a general-purpose control hardware capable of controlling robotic systems.

To summarize the studies briefly, first of all, the features of the control hardware were determined on the basis of the requirements, and schematic and PCB designs were carried out in the open source software KiCAD circuit design program. After the hardware design and production stages were completed, the general controller design was made in the STMicroelectronics brand MCU used in the control unit center and the free STM32CubeIDE compiler provided by the company. After the hardware and embedded software were completed, it was included in the control panel of an autonomous mobile robot (AMR) and operated in coordination with the main computer in order to control the mechanism it is in and to perform performance tests. Since the robot does not have a mathematical system expression, the system definition process has been made. Based on the input and output data received from the robot, the transfer function was created using MATLAB (Student Edition) system definition and simulation tools, and performance analysis of the control unit was carried out by trying different types of closed control methods over it.

As a result, in this thesis, a REKU (Robotic Electronic Control Unit) hardware aimed to be used in robotic systems was designed and comprehensively analyzed.

Keywords: Hardware Design, Embedded Software, Closed Control Methods, Control Hardware, RECU, Robotics, System Identification

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince tez ve diğer akademik çalışmalarımda bana yol gösteren, kendimi geliştirmemde desteklerini esirgemeyen başta danışmanım sayın Prof. Dr. Cemil SUNGUR hocama ve tüm hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez araştırmamda manevi desteklerinin yanı sıra uygulama için materyal teminini ve deneysel çalışmalarda gerekli ortam şartlarını sağlayan Elfatek Elektronik şirketine, bu kapsamda bilgi ve tecrübesinden faydalandığım Ar-Ge biriminde yer alan çalışma arkadaşlarıma, destek veren tüm ekibe saygılarımı ve minnetimi sunuyorum.

Son olarak hayatım boyunca hayallerimi gerçekleştirmek için ilerlediğim yolda ve hedeflerimde bana destek olan sevgili aileme, arkadaşlarıma, iş ve sosyal hayatımda katkısı olan herkese tüm kalbimle şükranlarımı sunuyorum.

Furkan YEŞİL
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Robotik Sistem Bileşenleri.....	3
1.2. Gömülü Sistem ve Donanım Tasarım Süreci.....	6
1.3. Kontrol Yöntemleri.....	6
1.4. Endüstriyel ve Genel Haberleşme Protokolleri.....	8
1.5. Tez Organizasyonu.....	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	11
2.1. Kontrol Metotları Hakkında Araştırmalar.....	11
2.2. Robotik Kontrol Donanımları Hakkında Araştırmalar.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. İnsansız Kara Araçları.....	20
3.2. Kontrol Ünitesinin Donanım Tasarım Süreci.....	21
3.2.1. Şematik Tasarım Çalışmaları.....	22
3.2.2. Donanım Tasarım ve Üretim Çalışmaları.....	32
3.3. Kontrol Yöntemleri.....	45
3.3.1. PID Kontrol.....	47
3.3.2. Doğrusal Karesel Kontrol.....	50
3.3.3. Kontrol Yöntemlerinin Performans Değerlendirmeleri.....	52
4. KONTROL ÜNİTESİNİN UYGULAMA ÇALIŞMASI.....	55
4.1. Çalışma Testlerinin Gerçekleştirildiği Robotik Sistem.....	55
4.1.1. Robotik Sistemin Matematiksel Modelinin Oluşturulması.....	55
4.1.2. Simülasyon Analizleri İçin Yapılan Tasarım.....	59
4.1.4. Gerçek Sistem Analizleri.....	67

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
5.1. Sonuçlar.....	70
5.2. Öneriler.....	75
KAYNAKLAR.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Akım Birimi (Amper)
C	: Kondansatör sembolü
$e(t)$: Zamana bağlı hata
ess	: Sürekli durum hatası
GND	: Toprak sembolü
J	: Bağlantı noktası
K_d	: Türevsel kazanç katsayısı
K_i	: İntegral kazanç katsayısı
K_p	: Oransal kazanç katsayısı
L	: Bobin sembolü
M_p	: Yüzde maksimum aşım miktarı
R	: Direnç sembolü
t	: Zaman birimi (Saniye)
T_d	: Türevsel zaman sabiti
td	: Gecikme zamanı (Saniye)
TF	: Transfer fonksiyonu
T_i	: İntegral zaman sabiti
t_p	: Tepe zamanı (Saniye)
t_r	: Yükselme zamanı (Saniye)
t_s	: Yerleşme zamanı (Saniye)
U	: Entegre sembolü
V	: Gerilim birimi (Volt)

- VCC* : Besleme gerilimi (Volt)
Y : Kristal osilatör sembolü
W : Güç birimi (Watt)
Q : Transistör, Mosfet sembolleri

Kısaltmalar

- ADC* : Analog dijital çevirici
ARM : Acorn RISC makinesi
AMR : Otonom mobil robot
BLDC : Fırçasız doğru akım motoru
BMS : Batarya yönetim sistemi
CAN : Denetleyici alan ağı
D : Türevsel ifade
DC : Doğru akım
EDA : Elektronik tasarım otomasyonu
FPGA : Alanda programlanabilir kapı dizileri
I : İntegral ifadesi
IIC : Entegre devre
ISE : Toplam karesel hata
IAE : Toplam mutlak hata
ITAE : Toplam zaman ağırlıklı mutlak hata
HA : İnsansız hava aracı
LQR : Doğrusal karesel kontrol
MCU : Mikrodenetleyici birim
MPU : Mikroişlemci birim
P : Oransal ifade

<i>PCB</i>	: Baskı devre kartı
<i>PWM</i>	: Darbe genişlik modülasyonu
<i>ROS</i>	: Robotik işletim sistemi
<i>RPM</i>	: Dakikadaki tur sayısı
<i>RMII</i>	: Azaltılmış ortamdan bağımsız arayüz
<i>UART</i>	: Evrensel asenkron alıcı/verici
<i>USB</i>	: Evrensel seri veriyolu
<i>WDT</i>	: Güvenlik Zamanlayıcısı

1. GİRİŞ

Robotik sistemler kavram olarak çok eskiye dayanan ve temelde insanlara işgücü kapsamında yardımcı olabilen mekanizmalardır. Günümüze bakıldığında canlı formların yerine iş yapabilen, yarı otonom veya tam otonom, programlanabilir yapıya sahiptirler (Spong ve Hutchinson, 2005). Bu bağlamda tarım, fabrika otomasyonu, otonom arabalar v.b. gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmakla beraber medikal, askeri ve uzay teknolojilerinde de karşımıza sıklıkla çıkmaktadır. Bu alanlarda çalışan robotların görevlendirilme türüne göre mekanik ve elektronik sistemi değişken olabilmektedir. Ancak bir robotik sistemi genelleştirmek gerekirse dört temel kavramın bileşkesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu kavramlar enerji, dinamik sistem, çevre algılayıcılar ve kontrol birimleri olarak isimlendirilebilir (Correll, 2019).

Kavramlardan kısaca bahsetmek gerekirse robotik bir sistemin çalışması için tüm modülleri besleyecek bir enerji kaynağı gerekmektedir. Verilen görevi yerine getirmesi adına hareket eyleminin gerçekleşmesinde genel olarak motorlar ile sağlanan dinamik sistem gerekmektedir. Görevlerin yerine getirilmesi sürecinde olası bir hatayı engellemek ve mevcut ortamının şartlarını değerlendirmek için sensörler yani çevre algılayıcıları gerekmektedir. Son olarak tüm sistemin durumunu analiz edebilen, her iletişim düğümünü kontrol eden ve genel olarak görev döngüsünün başarılı bir şekilde sağlanması için denetim mekanizması rolünü üstlenen kontrol birimine ihtiyaç vardır (Correll, 2019). Tüm bileşenlerin koordinasyonu sistemin performansını doğrudan etkilediği söylenebilir. Robotik sistemin görev döngüsü içerisinde her biriminin kritik öneme sahip olduğu durumlar söz konusu olmaktadır. Bu birimler içerisinde makinenin kontrol edilebilir bir varlığa dönüşmesini sağlayan ve sistemde yer alan diğer birimlerin denetiminden sorumlu olan kontrol ünitesi en kritik yapıyı oluşturmaktadır.

Bir robotik sistemin kontrol ünitesi, robotun tüm parçalarını ve hareketlerini yönetmek için tasarlanmış bir donanım veya donanımlar bileşkesi olarak isimlendirilebilir. Kontrol donanımı olarak da tanımlanabilir kontrol ünitesi, robotik sistemin yönetim panosu içerisinde otonom planlama bilgisayarı ve diğer kontrol bileşenleri arasındaki yerini almaktadır. Donanımsal bileşenlerin yanı sıra bu pano içerisinde bulunan kontrol ünitesinin işlevsel hale gelmesini sağlayan kontrol algoritması yer almaktadır.

Kontrol algoritması, temelinde bir kontrolcü yöntemi merkezinde tasarlanmış, robotun sahip olduğu sensör gibi ölçüm mekanizmaları sayesinde elde ettiği verileri yorumlayarak hareket komutu dizisi sağlayan yazılımdır (Siciliano, 2010).

Robotun yetkinliği artıracak olan motor v.b. dinamik bileşenlerin hassasiyeti, çevre analizi yapan sensörlerin doğru yorumlanması ve geri besleme ağının sağlıklı yollarla kurulması sistem içerisindeki kontrol modüllerinin görevidir. Neticede kontrol ünitesi ve içerisinde barındırdığı kontrol algoritması, robotun işlevselliğini, iş yapma hızını ve doğruluğunu etkilemektedir. Kontrol donanımı verilen görevin yerine getirilmesi için gerekli olan talimatları dinamik sisteme iletmekten sorumludur. İletişim süresince gerçek zamanlı bir şekilde diğer ana modüller ile (otonom görev bilgisayarı v.b.) haberleşerek güvenli çalışma sınırlarını da belirlemektedir.

Bu tez çalışmasında da herhangi bir robotik sistem entegrasyonuna uyumlu bir kontrolcü donanım tasarımının gerçekleştirilmesi, testlerinin yapılarak kullanıma uygun hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen tez çalışmasında elektronik kontrol ünitesi kavramının robotik sistemlere uygulanması için izlenmesi gereken yolu ve tasarım analizlerini kapsayarak kontrol teorisinin gerçek zamanlı çalışan bir sisteme dahil edilmesi konusunda da metot örneği teşkil etmesi hedeflenmiştir. Hedefler doğrultusunda tasarımı gerçekleştirilecek donanımın planlaması yapılarak kontrol donanımının prototip üretimi için zemin hazırlanmıştır. Ortaya çıkan prototip ile fiziki testler sağlanarak örnek bir sistemde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Bu örnek robotik sistem insansız kara aracı olmaktadır ve araca kontrollü hareket yetkinliği kazandıracak olan kontrol ünitesi bu sayede gerçek zamanlı bir ortamda gözlemlenmiştir. Uygulama testleri sürecinde robotun motorlarından alınan giriş ve çıkış verileri ile birlikte sistem tanımlama işlemi gerçekleştirilerek farklı türlerdeki kontrol metotlarının tasarlanan donanım üzerinden performansları karşılaştırılmıştır. Gerek donanımın fiziki testleri gerekse kontrol metotları kapsamında yapılan yazılım testleri sürecinde el edilen sonuçlar yorumlanarak tasarımın kullanımına ilişkin veriler paylaşılmıştır.

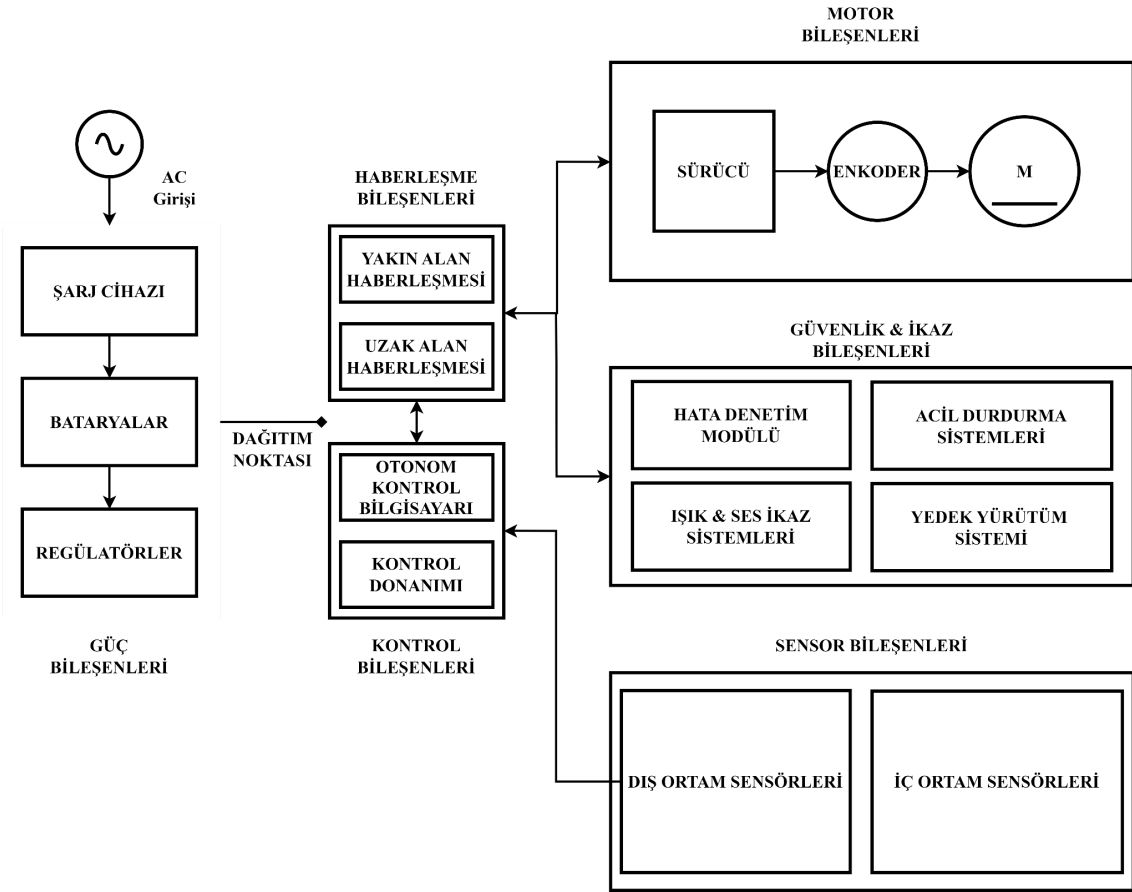
1.1. Robotik Sistem Bileşenleri

Robotlar, tasarım amaçlarına ve kullanım alanlarına göre çeşitli sınıflandırmalar içerisinde değerlendirilebilir. Genel olarak bakıldığında bu sınıflandırmalar şu şekilde olmaktadır:

- Endüstriyel Robotik sistemler- İmalat v.b.
- Hizmet Robotları-Temizlik, Hasta bakım v.b.
- Askeri Robotik sistemler- İHA (İnsansız Hava Aracı), Otonom Tank v.b.
- Araştırma Robotları-Uzay, Denizaltı, Kutuplar v.b.
- Eğitim Robotları-Sanal asistanlar v.b.
- Medikal Robotik sistemler- Ameliyat v.b.

Yukarıdaki sıralanan robot türleri içerisindeki örneklere ihtiyacın çeşitliliği oranında daha farklı eklemeler de yapılabilir. Türüne göre sabit veya kısıtlı bir hareket eksenine sahip robotların yanı sıra drone hava araçları gibi çok daha serbest eylemlere sahip Robotik sistemler bulunmaktadır. Bunların yanı sıra herhangi bir fiziki özelliği olmayan ancak internet veya kapalı bilgi paylaşımına sahip dijital ortamlarda da yönlendirmeye yardımcı robotik sistemler bulunmaktadır.

Fiziki bir yapıya sahip olan robotik sistemler bahsedilen sınıflandırmada olduğu gibi amaca yönelik farklılaşmalara sahiptir. Bazılarında iletişim daha kritik bir öneme sahipken bazılarında ise manevra yetkinliği ön plandadır. Yine de fiziki robotik sistemlerin amaca yönelik farklı tasarımları olsa da yapıyı oluşturan ana bileşenler bazında bakıldığında bazı noktalarda birbirleri ile benzerliklere sahip olduğu görülebilir. Dolayısıyla her robotun bir dinamik mekanizması ile hareketlerini sağladığı, sahip olduğu sistem bileşenleri arasında ve dış kontrol ile iletişimde olması gerektiği, tüm sistemin enerjisini sağlayacak bir güç merkezi ihtiyacı olduğu düşünüldüğünde belirli özelliklerinin ortak kümede varlığı söz konusudur (Correll, 2019). Bu açıdan bakıldığında aşağıdaki Şekil 1.1’de verilen örnek diyagramda hemen hemen tüm robotik yapılarda karşımıza çıkabilecek bileşenler verilmektedir.



Şekil 1.1. Örnek Robotik Sistem Diyagramı

Yukarıdaki Şekil 1.1 üzerinde yer alan robotik sistem bileşenleri şu maddeler doğrultusunda açıklanabilir (Siciliano, 2010):

- **Güç Bileşenleri:** Robotik sistemlerde mekanik parçalar haricinde bileşenlerin büyük çoğunlu aktif şekilde iş görmekte, elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bazı sistemler sürekli kablo bağlantısı yordamıyla, bazıları ise bataryalar ile enerjisini sağlamaktadır. Ek olarak yüksek ve düşük güç seviyelerinde çalışan modüller için dönüştürücü regülatörler de kullanılmaktadır.
- **Sensör Bileşenleri:** Sensörler bir fiziksel değişkeni ölçmek ve çevreleyen ortamdan bilgi toplamak için tasarlanmış bir cihazdır. Robotik sistemlerde kullanılan sensörler, hareket, ışık, sıcaklık, basınç, manyetik alan, ses ve benzeri çeşitli fiziksel değişkenleri ölçebilirler. Bu şekilde sistemin iç ortamı ve bulunduğu dış ortamın değişkenleri dijital ortamda işlenerek, yorumlanabilir bir hale getirilmesiyle ortam ve hareket analizi sağlanmaktadır.

- Motor Bileşenleri: Motor, enerjiyi harekete dönüştürmek için tasarlanmış bir cihaz olmakla birlikte robotik sistemlerde, daha verimli olduğu için genellikle elektrik motorları kullanılmaktadır. Fırçasız DC (Doğru Akım) motor, step motor veya servo motorlar robotikte sık sık karşımıza çıkan motor tipleridir. Ayrıca bu motorlar yalıtımlı güç aktarımı, güvenli bir şekilde hız ve yön kontrollerini sağlayacak sürücüler ile birlikte kullanılmaktadır.
- Güvenlik ve İkaz Bileşenleri: Bir robotik sistemin normal çalışma akışının dışına çıkması sebebi ile riskli ve geri dönüşü olmayan durumlar gelişebilir. Ayrıca çalışma ortamında da her an için farklı olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak bir hata durumunda, bu hatanın etkilerini en aza indirmek veya öngörülebilir problemlerin engellemesi için güvenlik-ikaz sistemleri kullanılmaktadır. Acil durdurma butonları, frenleme sistemleri veya sigorta gibi güç kesme modülleri buna örnek gösterilebilir (Mindell ve Kwiatkowski, 2016).
- Haberleşme Bileşenleri: Robotik sistemlerde dahili bileşenlerin kendi içerisinde sürekli olarak diyalog halinde olması veya uzaktaki ayrı bir sistem ile iletişim kurması için haberleşme modüllerine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kontrol Bileşenleri: Haberleşme kabiliyetine sahip tüm bileşenler ve bu bileşenlere bağlı kontrol edilebilir mekanik aksamaların denetlenmesi, gözetleme mekanizması altında kullanılabilmesi gerekmektedir. Kontrol sistemi sensörler vasıtasıyla bileşenlerin anlık durumlarını takip ederek yönetimleri duruma bağlı komut dizileri ile sağlamaktadır. Bu şekilde, bir iç ortam haberleşme ağı ile robotik sistemin bileşenleri arasındaki koordinasyonu ve robotun hareket planlamasını gerçekleştirmektedir. Bazı robotik sistemlerde otonom kontrolden görevli ikinci kontrolcü kullanılabilir. Otonom planlama bilgisayarı veya yapay zeka bilgisayarı gibi isimlerin verildiği kontrolcü, robotik kontrol donanımı ile koordineli çalışarak birleşik bir yapıyı meydana getirmektedir (Siciliano, 2010).

Sonuç olarak bir robotik sistemde yer alan ortak yapıların her biri kritik öneme sahiptir. Birlikte düzenli bir şekilde çalışması robot kavramının niteliğini de belirlemektedir.

Bu tezin ana konusu olan kontrol ünitesi de tüm sistemin koordinasyonundan sorumlu, yönetim merkezinin en kritik parçalarından birisidir. Yürütülen çalışmada dahil olduğu robotik sistemi içerisinde bulunan yazılım ile planlı bir şekilde yönetip, hassas hareket denetimine sahip yapının oluşturulması için çaba gösterilmiştir.

1.2. Gömülü Sistem ve Donanım Tasarım Süreci

Gömülü sistemler, bir cihazın içine yerleştirilmiş ve özel bir amaç için tasarlanmış bilgisayar sistemleridir. Bu sistemler, genellikle bir işlemci, bellek, giriş/çıkış arayüzleri ve diğer bileşenleri içerir (Patel, 2018). Gömülü sistemler, farklı boyutlarda ve karmaşıklıkta olabilmektedir. Örneğin, tıp cihazları, araçlar, akıllı ev sistemleri, endüstriyel kontrol cihazları, akıllı telefonlar, oyun konsolları ve diğer tüketici elektroniği cihazların tümü gömülü sistemler içermektedir. Ayrıca kullanıldığı diğer alanlar arasında havacılık, savunma, enerji, telekomünikasyon ve ulaşım bulunmaktadır. Kullanıldığı alana ve görevlendirme türüne göre gömülü sistemlerin donanımsal tasarımları farklılık göstermektedir. Bu donanımların tasarım süreçleri genel çerçevede cihazın fiziksel bileşenlerinin tasarlanması, prototip üretimi, test edilmesi ve üretilmesini içeren bir zaman aralığıdır (Patel, 2018). İsterler kapsamında donanımda kullanılacak materyallerin belirlenmesi, devre tasarım planlaması ve PCB tasarımının gerçekleştirilerek protoip üretim ile testlerin yapılması gerekmektedir. Sonrasında elektromanyetik girişim v.b. çalışma ortamı değişkenlerine gösterdiği tepkilerin gömülü yapının işletimini bozmayacak tasarımın sağlanması adına çeşitli düzenlemeler yapılmaktadır. Tez kapsamında robotik sistemin içerisinde yer alacak kontrol donanımı da bir gömülü sistem türü olduğu için tasarım sürecinde yukarıda bahsedilen süreç takip edilmiştir.

1.3. Kontrol Yöntemleri

Kontrol yöntemi, bir sistem veya süreç üzerinde istenen bir çıktıyı elde etmek için gerekli olan girdileri kontrol eden ve yöneten bir dizi teknik ve prosedürdür. Sistemin veya sürecin çıktısını istenen değerde tutmak veya belirli bir hedefe ulaşmak

için kullanılmaktadır. Kontrol yöntemleri, genel olarak geri besleme kontrollü ve açık döngü kontrollü olmak üzere iki temel türde incelenebilir.

Geri besleme kontrollü sistemlerde, sistemin çıkışı ölçülür ve ölçülen değer, istenen değere geri besleme olarak kullanılır. Bu geri besleme, kontrol girişlerini ayarlamak için kullanılır. Açık döngü kontrollü sistemlerde ise, çıktı önceden belirlenmiş bir hedefe göre doğrudan kontrol edilir. Bu tür kontrol yöntemleri, geri besleme kontrollü sistemlere göre daha basit olabilir. Doğru kontrol yöntemini seçmek, sistemin veya sürecin hedeflerine ulaşması için çok önemlidir (Franklin, 2014).

Robotik yapılarda özellikle hareketin kontrolünde kapalı kontrol yöntemleri tercih edilmektedir. Bunun sebebi olarak sürekli bir şekilde durumun analiz edilmesi ihtiyacından ötürü geri besleme ağının oluşturulması zorunluluğu gösterilebilir. Geri beslemeli yapıda sistem çıkışı ölçülür ve istenen değerle karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucu elde edilen hata, kontrol girdisini ayarlamak için kullanılır. Böylece sistemin çıkışı, istenen değere yaklaşır ve hata minimize edilir (Franklin, 2014).

Kapalı kontrol yöntemleri, sistemlerin kontrol edilmesi için birçok farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- PID Kontrol: Proportional (Oransal), Integral (Toplamsal), ve Derivative (Türevsel) kontrol olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, hata sinyalinin anlık, toplam ve değişim bileşenlerini kullanarak kontrol edilir.
- Optimal Kontrol: Bu yöntemde bir kontrol hedefine en uygun olan kontrol hareketini seçmek için matematiksel optimizasyon tekniklerini kullanır. Kontrol parametrelerinin optimizasyonu için genellikle belirli bir maliyet fonksiyonu ortaya konularak bu fonksiyon üzerinden işlem yapılmaktadır.
- Adaptif Kontrol: Sistem parametrelerinin değiştiği durumlarda kontrol algoritmasının otomatik olarak ayarlanmasını sağlar. Adaptif kontrol yöntemleri, hava araçları ve uzay araçları gibi değişken koşullar altında çalışan sistemler için yaygın olarak kullanılır.

- Fuzzy Mantık Kontrolü: Bulanık mantık olarak da isimlendirilen bu yöntem sistemin kontrol edilmesi için insan diline benzer bir yapı kullanarak çalışır. Bu yöntem, sistem davranışlarını kabaca tanımlayan ifadeler kullanır ve ardından bu ifadeleri kullanarak kontrol algoritmasını belirler.
- Geçişli Kontrol: Belirli bir hedefe ulaşmak için birden fazla kontrol algoritması kullanarak çalışır. Bu yöntem, sistem davranışlarının farklı koşullar altında değiştiği durumlarda faydalıdır.

Bu yöntemlerin her biri, farklı robotik sistemler için uygun olabilir. Kapalı kontrol yöntemleri, sistemin parametreleri ve işletim koşulları değiştiğinde bile istenen hedefe ulaşmayı sağlamak için oldukça esnek ve programlanabilir olabilir. Bu tezde gerçekleştirilen tasarım çalışmasının performans analizi kısmında da yukarıda yer alan popüler kontrol metotlarından bir kaçını denemiştir.

1.4. Endüstriyel ve Genel Haberleşme Protokolleri

Dijital haberleşme protokolleri, cihazlar ve sistemler arasında veri iletişimini sağlamak için kullanılan standartlaşmış yöntemlerdir. Dijital haberleşme protokolleri, veri aktarımını, formatını, hızını, hata düzeltme yöntemlerini, güvenliği ve diğer iletişim parametrelerini tanımlamaktadır. Bu haberleşme protokolleri kendi içerisinde endüstriyel ve genel haberleşme yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Endüstriyel haberleşme endüstriyel ortamlarda kullanılan iletişim sistemlerini ifade etmekle birlikte gömülü sistemlerde iç ve dış iletişimi de oluşturmaktadır. Bu tür sistemler, endüstriyel süreçlerin izlenmesi, kontrol edilmesi ve veri paylaşımı gibi amaçlarla kullanılır. Endüstriyel haberleşme yöntemleri, genellikle endüstriyel otomasyon, enerji yönetimi, fabrika otomasyonu, lojistik ve taşımacılık, tesis yönetimi, uzaktan izleme ve teşhis, sensör ağı ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılır (Tummescheit ve ark., 2016).

Bazı haberleşme türleri aşağıda kısa açıklamalar ile verilmiştir:

- Ethernet/IP: Bu protokol, fabrika otomasyonu ve endüstriyel kontrol uygulamalarında Ethernet tabanlı ağlarda kullanılmaktadır.

- CAN (Denetleyici Alan Ağı): Otomobillerin elektronik altyapısı gibi birden fazla alt cihazın aynı veri yolunu paylaşarak haberleştiği bir veriyolu (bus) tabanlı bir protokoldür ve düşük hata düzeltme yetenekleri ve yüksek güvenilirlik özellikleri nedeniyle tercih edilir.
- IIC: IIC (Entegre Devre), düşük hızlarda seri haberleşme protokollerinden biridir ve genellikle entegre devreler (ICs) arasında kısa mesafeli iletişimi sağlamaktadır. IIC, çeşitli hızlar ve cihaz adresleri ile çalışabilir ve çoklu cihazlar arasında veri okuma, yazma ve kontrol işlemlerini gerçekleştirmek için kullanıldığı söylenebilir.
- UART (Evrensel Asenkron Alıcı-Verici): Seri haberleşme protokollerinden biridir ve genellikle bilgisayarlar, mikrodenetleyiciler, sensörler ve diğer elektronik cihazlar arasında veri iletişimini sağlamak için kullanılmaktadır.
- USB (Evrensel Seri Veri Yolu): Çok yaygın olarak kullanılan bir seri haberleşme protokolüdür ve bilgisayarlar, cep telefonları, tabletler, yazıcılar, kameralar ve birçok diğer cihaz arasında veri ve güç iletişimini sağlamak için kullanılır. USB, yüksek hızlı, tam hızlı, orta hızlı ve düşük hızlı olmak üzere farklı hızlarda çalışabilen farklı USB sürümlerine (USB 1.0, USB 2.0, USB 3.0, USB 3.1, vb.) sahiptir.

Verilen haberleşme protokolü örnekleri dışında kullanıldığı yere ve işe uygun pek çok yöntem bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında tasarımı gerçekleştirilen kontrol donanımı yapısında da bir robotik sistemin ihtiyacı olabileceği düşünülen haberleşme yöntemleri eklenmiştir.

1.5. Tez Organizasyonu

Bu tez çalışması gerçekleştirilen planlamalar temelinde beş ana başlık altında bölümlere ayrılarak oluşturulmuştur. İlk bölümde tez konusu ile ilgili genel bilgilere yer verilerek yapılan çalışmanın kapsadığı alanlar ve kavramlara açıklık getirilmiştir. Bununla birlikte tezin amacı, hedefi, kapsamı ve organizasyon düzeni hakkında gerekli açıklamalar yapılmıştır.

İkinci bölüm robotik sistemlerin kontrolü ve elektronik donanımları hakkında yapılan çalışmaları içermesinin yanı sıra kontrol metotları hakkında da literatürde yer alan araştırmalar ve kullanılan yöntemler bazında geçmiş çalışmaları içermektedir. Yapılan bu çalışmalarla ilgili olarak gerçekleştirilen tez çalışmasının literatüre katkıları ve var olan diğer çalışmalar ile benzerlikleri, farkları açıklanmıştır.

Üçüncü bölüm gerçekleştirilen bu tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemlerin teorik yönleri ile birlikte detaylı bir şekilde açıklandığı kısımdır. Bu kısımda şematik tasarım ve PCB tasarım süreçleri, donanımın fiziksel testleri ve analiz sonuçları, donanımda kullanılan ve performans analizleri gerçekleştirilen kontrol yöntemlerinin teorik bilgileri yer almaktadır.

Dördüncü bölüm ise hedeflenen tez çalışmasında uygulamaya yönelik olarak gerçekleştirilen sistemin tanımlanması ve bu sistem üzerinde kontrol uygulamalarını da içeren kullanım testlerinin kapsamlı bir şekilde anlatıldığı bölümdür. Farklı kontrol yöntemlerinin test sistemine eklenen kontrol donanımı üzerinden yönetim yetkinlikleri hakkında analizler yapılmış, sonuçlar paylaşılmıştır.

Son bölümde gerçekleştirilen uygulamanın sonuçları ışığında genel değerlendirme yapılmıştır, geleceğe yönelik olarak akademik çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar için ele alınacak yeni çalışmalara yardımcı olması adına öneriler sunulmaktadır. Tez çalışması süreci boyunca elde edilen tecrübelerin başlıklar halinde paylaşılması gerek akademik yönü ile bu konu hakkındaki literatüre örnek başka bir çalışma olarak eklenmesi gerekse de endüstriyel araştırma çalışmalarına katkısı anlamında milli bir kazanım olacağı düşünülmekte, umut edilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez kapsamında yapılan kaynak taraması iki başlık üzerinden ele alınmıştır. Bu başlıklar robotik sistemler odağında kontrol yöntemleri ve bu kontrol yöntemlerinin kullanıldığı gömülü kontrol donanımları tasarımlarıdır.

2.1. Kontrol Metotları Hakkında Araştırmalar

Literatür araştırmasının bu bölümünde, tasarımı gerçekleştirilecek kontrol donanımının asıl görevi olan kapalı döngü kontrol akışını sağlaması üzerine araştırmalar ve örneklemeler aktarılmıştır. Bir sistemi girişine aktarılan kullanıcı komutuna en uygun seviyede kontrol etmenin güvenli yollarından birisi de geri besleme ağının olduğu kapalı döngü kontrol yapılarıdır. Robotik sistemlerin hareketleri ve görev eylemlerini kontrol eden donanımsal parçaların da içerisinde sensörlerin oluşturduğu geri besleme sinyalleri referansında çalışan bir kontrol yöntemi olmalıdır. Tez kapsamında yapılan çalışmayı temellendirmek ve akademik-endüstriyel alanda oluşturulmuş içeriklerden faydalanmak adına aşağıda yer alan araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların eksenini robotik sistemlerde kontrol yöntemlerini kapsamaktadır.

Kontrol yönteminin uygulanmasına ilişkin olarak örnek çalışmalardan birisi de PID kontrol teorisinin incelenmesine imkan sağlayan top-kiriş mekanizmasıdır. Bir hat üzerinde yer alan top v.b. cismin sürekli olarak dengede kalması adına PID kontrolün performansını arttıracak denemeler yapılmıştır. PID kontrolcüsünün kazanç katsayılarını belirlemede Bulanık Mantık kullanılarak gerçek zamanlı adaptasyon sağlanmıştır. Bu şekilde geleneksel PID ile Bulanık Mantık PID arasındaki performans farklılıkları incelenmiştir. Sonuç olarak Bulanık PID yönteminin daha az salınımlı ve daha düşük yerleşme sürelili olduğu veriler elde edilmiştir (Osinski ve ark., 2018).

PID kontrol doğrusal veya doğrusallaştırılabilir sistemlerde genellikle tek başına yeterli olmaktadır. Ancak özellikle her koşulda benzer gürültülere ve bu gürültülere karşı tepki verme değerleri aynı olmayan robotik sistemlerde farklı denetim mekanizmaları ile PID kontrole katkılama yapılmaktadır. Katkı çalışmaları kapsamında LQR (Doğrusal Karesel Kontrol) kontrol yöntemi ile PID bileşenleri performans anlamında incelenmiştir. Yapılan çalışma ile doğrusal olmayan sistemler için ideal bir denetleyici yapı ortaya koymaktır. Neticede LQR-PID bileşkesinin kontrol akışında

sistemi istenilen girişe oturtma süresinin her iki kontrolden daha iyi olduğu görülmüştür (Anurag ve Kamlu, 2018).

LQR ve PID üzerine yapılan bir başka çalışmada da Cádiz Üniversitesinde gerçekleştirilen insansız hava aracı kontrolü için PID-LQR kontrol modellerinin birleştirilmesi yoluyla daha verimli bir kontrolün oluşumu önerilmiştir. Tek kontrol yapısının bazı ortam şartları için yetersiz kalacağı problemi ile yola çıkılan bu çalışmada denge ve irtifa konusunda kontrolcünün parametre ayarlamaları da daha anlaşılır ve basit olmuştur. MIMO (Multiple Input Multiple Output) yapısı temelinde aracın sahip olduğu sensörlerin Kalman filtresi ve Madgwick algoritması ile bileşke olarak analiz edilmesi sağlanmıştır (Guardeño ve ark., 2019).

Hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda PID kontrolcünün sıklıkla kullanıldığı ve her sisteme uyumlu hale getirilmeye çalışıldığı görülmektedir. Örneğin Bağdat Üniversitesinde altı eksenli insansız hava aracının doğrusal olmayan PID kontrolcüsü ile kontrol edilmesini sağlamışlardır. Doğrusal olmayan PID yönteminin doğrusal kontrol yöntemlerine göre daha verimli ve az enerji harcayan bir yapıya sahip olması hakkında analiz gerçekleştirmişlerdir. MATLAB üzerinden oluşturdukları simülasyonda her eksen ve bu eksenlerin Roll, Pitch, Yaw ve irtifa değerleri için ayrı bir PID kontrolcüsü tasarlayarak kontrol katsayılarını da genetik algoritma ile hesaplamışlardır (Najm ve Ibraheem, 2019).

2019 yılında robotik ve otomasyon konuları hakkında düzenlenen bir konferansta yayınlanan çalışmada insansız hava ve kara araçlarının işbirliği ve koordineli hareket planlamaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu sistemde hava aracı, kara aracına ip düzeneği ile bağlıdır. İp düzeneği, kara aracının engebeli ve yüksek tepelere çıkması esnasında hava aracı yardımının kullanılması hedefinde önerilmiştir. Yapılan çalışma ile fiziksel materyal kullanarak iki robotik aracın birbirine bağlanması operasyonlarının artı ve eksi yönleri tartışılmıştır. İki aracın test platformunda hareketleri gözlemlenmiş ve yükselti haritası oluşturulmuştur. Araçların her birinde IMU sensörü, hava aracında ayrıca iki adet kamera ve lazer sensör kullanılarak füzyon ve filtre algoritmaları temelinde bir PID kontrolcüsü tasarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda ip desteği yordamıyla oluşturulan bağlantının kontrolcü yöntemi bazında kontrol hassasiyetinin önemine vurgu yapılmıştır. İpin aşırı gerginlik seviyesi ve araçlara dolanması gibi problemlerin potansiyel olduklarını aktarmışlardır (Miki ve ark., 2019).

Bir başka örnek de mobil robot sistemlerinde kullanılan standart PID kontrol yöntemini, ayar katsayılarını daha nitelikli belirleyebilmek odağında geliştirilmiş olan çalışmadır. Pekiştirmeli öğrenme algoritması kullanılarak normal pekiştirmeli sistemin aksine çift geri beslemeli bir kontrol ağı tasarlanmıştır. Hasselt isminin 2010 yılında geliştirmiş olduğu çift katmanlı Q-PID olarak adlandırılan kontrol yöntemini daha verimli hale getirmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirilen kontrolcü kara aracı, dört motorlu drone ve su altı araçları olmak üzere farklı robotik sistemlerde test edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında çift katmanlı sistemin normal bir pekiştirmeli öğrenmeye göre daha yüksek performans sergilediği ve bunu oransal, türevsel ve toplamsal hata ifadelerini hızlı bir şekilde toparlaması ile gösterdiği anlaşılmaktadır (Carlucho ve ark., 2019).

PID kontrol çoğu zaman hareketli robotik sistemlerde kullanıldığı için elektrik motorlarının hız kontrolünde de karşımıza çıkmaktadır. Yapılan işlerde daha yüksek hassasiyette kontrolün sağlanması adına da yine farklı yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Konu ile ilgili olarak yapılan başka bir akademik çalışma ile dört adet DC motora sahip bir hareketli sistemin Bulanık-PID ve Bulanık-PI kontrol bileşkeleri ile yönetilmesi sağlanmıştır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu sisteme uygulanan yöntemler neticesinde DC motorun hız kontrolünde Bulanık-PID denetiminin PI, normal PID veya Bulanık-PI denetim modellerine göre aşım ve yerleşme sürelerinde daha iyi olduğu bulunmuştur (Raafi'u ve ark., 2019).

Bileşke kontrol türünde yapılan başka bir araştırma da hibrit elektrikli otomobillerde kullanılan elektrik motorlarının hız kontrolünde klasik PID ve PID katsayılarının LQR ile hızlı bir şekilde belirlenebileceği düşünülen I-PD tasarımı karşılaştırılmıştır. Kontrol altına alınacak sistemi simülasyona aktarma hedefinde öncelikle matematiksel modelleme oluşturulmuş bu model üzerinden kontrolcüler arasında performans kriterleri incelenmiştir. Araştırmanın göstergeleri referansında I-PD kontrolcünün dış ve iç gürültü girişimlerinden daha az etkilendiği sonucuna varılmıştır (Shekhar ve ark., 2019).

BLDC (Fırçasız Doğru Akım Motoru) motorlar, çeşitli uygulamalar için yüksek verimli ve kompakt sabit mıknatıslı motorların kullanımına geçiş için endüstrideki sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca elektrikli araç endüstrisi, BLDC motorları sürekli değişen endüstriyel ihtiyaçlar için en güvenilir ve çok yönlü motorlar olarak görmektedir. Bu konu hakkında önerilen bir çalışmada otomatik ayarlı PID algoritması, farklı hızlar için geleneksel P, PI ve PID kontrol türlerine göre kıyasla yükselme süresini

ve yerleşme süresini %50'den fazla iyileştirilebileceği düşünülmüştür. Neticede geleneksel PID, PI ve P yöntemlerine göre otomatik seçimli PID kontrolcünün aşma değerinin %20-%60 daha az olduğu bulunmuştur (Gadekar ve ark., 2020).

Geribeslemeli kontrolün en çok uygulandığı sistemlerden birisi de insansız hava araçlarıdır. Örnek bir çalışmada insansız hava ve kara aracı koordineli kullanılmış, iki farklı sistemin birbirine göre konumlanma performansının PID parametrelerini belirlemek ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Konumlanma kavramı iki aracın birbirine göre hızları ile ilgili olduğu için bu iki insansız mekanizmanın PID kontrolcülerinin bağlı olması gerektiği kanısına varılmıştır. Yapılan test ünitesinde elde edilen sonuç ile insansız hava aracından alınan konum bilgisi ile kara aracının yönetimini sağlamanın verimli olduğu görülmüştür (Wu, 2020).

PID denetleyiciler basit yapıları, kolay uygulanabilmeleri ve iyi sağlamlıkları nedeniyle endüstriyel çalışmalarda baskın bir konumdadır. Ancak kontrolcülerde en önemli problemlerden birisinin kazanç katsayılarını belirlemek olduğu düşünülürse klasik yöntemin dışına çıkmak gerekmektedir. Bununla alakalı olarak literatürde MM-MADRL algoritması (Derin Pekiştirmeli Öğrenme ile Birleştirilmiş Temel Maymun Sürüsü Algoritması) yer almaktadır. Bu yapı ile parametre belirleme hususundaki sürecin daha verimli hale getirilmesi hedeflenmiştir. Neticede geliştirilen otomatik ve hızlı parametre belirleme algoritmasının basit mekanizmalarda iş yapsa da daha derin veya karmaşık yapılar için de kullanılabilir hale gelebileceği aktarılmıştır (Zhang, 2021).

Kapalı döngü kontrol teorisi günümüzde tüm teknoloji sektöründe karşımıza çıkmakla birlikte elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla bu alanda da yapılan çalışmalar ile kendisini göstermektedir. Elektrikli Araçların uygulamaları için enerji verimli ve yüksek düzeyde kontrol edilebilir bir sistem esastır. Araç çalışırken hızlanma ve bildirim işlemleri sürekli olarak gerçekleştirilir. Örneğin bir elektrik aracında ani hız değişimlerinde daha hassas denetime sahip bir kontrolcü için performans testleri yapılmıştır. Test ünitesi olarak BLDC motor kullanılmış, PI ve PID tabanlı kontroller ile hibrit kontrolcü karşılaştırması yapılmış, neticede hassasiyetin hibritte daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Chandran, 2022).

Elektrikli araçlar üzerine yapılan başka bir bilimsel çalışmada yeni bir karahindiba optimizasyonu PID denetleyicisine (DO-PID) dayalı sensör geri bildirim destekli yeni bir denetleyici kullanarak hız kontrolü sağlanmaktadır. Önerilen kontrolcüden elde edilen sonuçlar, klasik PID kontrol, ateş böceği-PID kontrolör,

öğrenme tabanlı optimizasyon PID kontrolör ve parçacık sürü optimizasyonu-PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, yeni denetleyicinin mevcut denetleyicilerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir (Baidya, 2023).

2.2. Robotik Kontrol Donanımları Hakkında Araştırmalar

Robotik sistem geliştirme temelinde ilk aşama sistemin yapacağı işin tanımını ve görev döngüsünde katkısı olan tüm değişkenleri belirlemek, çalışma ortamına uygun kontrol yöntemini ortaya çıkarmaktır. Mekanik yapı, elektronik sistem bileşenleri ve yazılım geliştirme süreçleri görev odaklı belirlemeler ve planlamalar neticesinde ortaya çıkmaktadır. Robotun elektriksel olarak kontrol edilebilir bütün materyallerini merkezinde toplayan kontrol donanımının modellenmesi ve tasarlanması da diğer aşamalarda olduğu gibi işin tanımı ile ilgilidir. Bu tez çalışmasında da bir robotik sistemin sahip olduğu özellikleri genelleyerek kontrol donanımı tasarımı ve örnek sistem entegrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Literatüre bakıldığında Hava, kara, sualtı gibi farklı alanlarda ve ortam şartlarında görev alması için tasarlanan insansız robotik sistemlerin çalışma mantığına uygun farklı kontrol metotları ve kontrol donanımı tasarımları mevcuttur. Bu noktada, akademik çalışmalar ışığında ortaya çıkan pek çok sistem modellemesi ve deneyim süreci yer almaktadır. En sade haliyle bir mesafe ölçüm mekanizmasına dayalı robotik sistemlerde bile kontrol katmanı, sistem bileşenleri bazında iletişim ve geri beslemeye dayalı dinamik hiyerarşiyi sağlamalıdır. Bu bilgiler ışığında kaynak araştırmasının ikinci kısmı donanım ve sistem modellemesi-tasarlanması üzerine oluşmaktadır.

Kontrol donanımları içerisinde buldukları robotik mekanizmanın, dış ortam değişkenlerine bağlı olarak sensörler vasıtasıyla kararlı eylemlerini sağlamalıdır. Özellikle hata durumlarında yakın temasın mümkün olmadığı şartlarda kontrolün kesintisiz olması önem arz etmektedir. Uzak alanda kontrol edilebilir robotik yapılardan birisi de insansız sualtı araçlarıdır. Okyanus tabanında yer alan tabiatın araştırılmasından, askeri amaçlı olarak mayın tespitinde veya casusluk uygulamalarına kadar günümüzde kullanımı yaygınlaşmıştır. Kore Okyanus Araştırma ve Geliştirme Enstitüsünde Jun ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışma ile ISiMI AUV (Autonomous Underwater Vehicle) adını koydukları sualtı aracı tasarlamışlardır. Tasarlanan sualtı aracı mekanik sistem, kontrol sistemi, ölçüm sistemi ve haberleşme sistemi yapılarının bileşkesinden meydana gelmektedir. Yapının kontrolünü sağlayan

birim üzerinden motorların hareketleri, basınç sensörü iletişimleri, kablosuz haberleşme ve CAN haberleşmesi sağlanmaktadır (Jun ve ark., 2007).

Ko ve arkadaşlarının sundukları çalışmada tarımda kullanılabilir dört motorlu bir otonom kara aracı tasarımı yer almaktadır. Gerçekleştirilen sistem donanımı, aracın ortamda serbest yol planlamaları yapmasına imkan sağlayarak nitelikli bir hareketin ortaya çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Atmega128 merkezli kontrolcü 4WD (Dört Tekerlekten Çekiş) operasyonu gereği dört adet bağımsız sürücüyü ile iletişimde olmak suretiyle araç hareketini yönetmektedir. Araç üzerindeki CCD kamera ile görüntü araçta yer alan bilgisayara iletilir ve bilgisayar ortamında görüntü tabanlı ortam analizi yapılarak hareket planlaması oluşturulmuştur (Ko ve ark., 2013).

Başka bir gerçekleştirilen tez çalışmasında tarım alanı odağında otonom kara aracı ve kontrol donanımı tasarımı yer almaktadır. Robotun otonom hareketinde aç, mesafe ve konum sensörleri ile birlikte kamera görüntüsünün birleştirilmesi yoluyla bileşke veri üzerinden komutların verilmesi önerilmiştir. Tasarlanan kontrol ünitesi içinde batarya kontrol sistemi, bütün sensör verilerini işleyen, diğer kartlarla haberleşen ve robotun motorlarını süren bir anakart ve görüntü işleme görevlerini yerine getirebilecek olan bir mini bilgisayar bulunmaktadır. Anakart aç ve konum sensörleri, mesafe sensörleri, tekerlek hızını ölçen sensörler ve diğer kartlardan bilgiler alarak robotun tekerleklerini motor sürücü vasıtasıyla sürmektedir (Durmuş, 2015).

Bir diğer çalışmada ise RoboCup adı verilen bir organizasyon için tasarlanan robotun detayları paylaşılmaktadır. Sistemin kullanıcı girdileri kapsamında yönetilmesi adına bir kontrol donanımı ve yapay zeka odaklı bir gömülü bilgisayarın koordineli çalışma altyapısı kurulmuştur. Yapay zeka bilgisayarı sensör verilerini işlemekten sorumludur ve bu şekilde hareket organizasyon planlamaları kontrol donanımına aktarmaktadır. Kontrol donanımı içerisinde ARM (Acorn RISC makinesi) ve FPGA (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) tabanlı iki adet çip yer almaktadır. FPGA enkoder verisi okuma ve motor kontrolünde, ARM mimarisi temelli mikrodenetleyici ise kapalı döngü kontrol yönteminin uygulanması için kullanılmaktadır. Komplike sistemin analog ve dijital sinyalleri okuma-kontrol etme yüzeyi oluşturması yoluyla gömülü bilgisayara yarı işlenmiş verileri aktarması, sonrasında bilgisayardan gelen verileri dinamik mekanizmaya yönlendirmesi sağlanmıştır (Turan, 2015).

Robotik kontrol donanım tasarımının test edilebileceği en temel robotik sistemlerden birisi de iki tekerlekli mekanizmalardır. Örnek bir tasarımda kontrol donanımında STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi ve ivmeölçer olarak MPU6050

kullanılmıştır. Robotun sürekli olarak iki teker üstünde dengede kalması adına ivme sensöründen alınan veriler referansında bir PID kontrolcü denetiminde motorlara hareket bilgisi aktarılmıştır. Yapılan çalışma ile PID kontrol metodunun temel bir örnekle nasıl çalıştığına ilişkin deneyimler paylaşılmıştır (You, 2018).

Otonom kara aracı ve kontrol donanımı tasarımı üzerine yapılan bir tez çalışmasında ise Marmara Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında altı tekerlekli bir uzaktan kontrollü arazi aracı tasarımı yapılmıştır. Aracın kontrolü için sistemde yer alan GPS modülü, ivme sensörü ve motor sürücülere gereken kontrol sinyallerinin üretilmesinde kullanılacak bir veri toplama donanımı tasarlanmıştır. Merkezinde ARM mimarisi türünde STM32F103 işlemcisi kullanan donanımın internet tabanlı hareket analizi için de ayrıca ESP32 mikrodenetleyicisine sahip olduğu görülmektedir (Macit, 2019).

Ondokuz Mayıs Üniversitesinde mikroişlemci ile kontrolü sağlanan beş serbestlik dereceli robot tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robotik sistemde amaç otomobillerin gövdelerinin düzgünlük derecelerini ölçmek üzerinedir. Gövde eğriliği ölçümlemek ve aracı test etmek için tasarlanan beş eksenli robot kolun hareketini sağlayan motorlar sürücü üzerinden mikrodenetleyici (STM32F407) sinyalleri ile kontrol edilmektedir. Robot kolun araç yüzeyine temas ederek aldığı veriler mikrodenetleyici üzerinden USB protokolü ile ana bilgisayara ulaştırılmaktadır. Bu çalışmada ayrıca STM32 işlemcisi kullanılmadan önce farklı özelliklerde ve farklı amaçlara hizmet eden 6 adet düşük seviye denetleyici (PIC16F877, PIC18F4550) ve on adet sinyal darbesi tutucu entegrenin (74LS373) kullanıldığı donanım tasarımı yapılmıştır. Ancak bu tasarım STM32 kadar performans sağlamadığı gözlemlenmiştir (Ayaz, 2019).

Kontrol donanımlarının kullanımı insansız hava araçlarında da oldukça yaygındır. Özellikle Pixhawk v.b. donanımlar hazır kontrol yazılımları içerdiğinden kullanım kolaylığı sağlamakta ve hava sistemlerinde yerini almaktadır. Örnek bir çalışma olarak açık hava havuzlarının temizlenmesi adına numune toplayıcısı olarak tasarlanan uzaktan kontrollü İHA söylenebilir. Bu çalışma ile hazır bir kontrol ünitesinin yetkinliği de sınanmıştır. İçerisindeki kontrolcü algoritmanın ve uzak bağlantı yöntemlerinin beraber adapte olması ile birlikte hava aracının hareket kabiliyetinde tam performans alındığı görülmüştür (Guerra, 2019).

Görüntü işleme v.b. gibi hız gerektiren uygulamalar için tek çekirdekli veya benzeri basit donanım bileşenleri yetersiz kalabilmektedir. Akademik bir çalışmada FPGA donanımı ve ROS (Robotik İşletim Sistemi) haberleşme yöntemi ile robotik sistemlerin sensör ağlarını daha iyi ve hızlı yorumlayabileceği bir yapı oluşumu hedeflenmiştir. Yapılan bu test platformunda aktarılan kontrol yazılımının robotik sistemi kontrol etmesinde çok daha hızlı olduğu, veri iletiminin ve yorumlanma performansının daha nitelikli olduğu sonucuna varılmıştır (Podlubne ve ark., 2021).

Kontrol yöntemleri, robotik sistemlerin teknolojik altyapısı ve kontrol donanımı tasarımları hakkında yapılan araştırmalar ile tezde amaçlanan çalışmalar adına kaynaklar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu literatür taramasında hem akademik hem de endüstriyel alanda robotik sistemlerin gelişimleri bazında güncel çalışmaların odak noktaları, genel bir bağlamda bakıldığında birbirleri ile benzerlikleri, eksi ve artı yanları öğrenilmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, yapılan araştırmalara bakıldığında öncelikle kontrol yöntemlerinin sistem bazında optimize edilmeye çalışılmasının gerekliliği öğrenilmiş ve tezde de uygulanmaya çalışılmıştır. Literatürde bir robotik sistemin kontrolcüsü seçilirken yoğun olarak katkısız PID veya çevresindeki benzer yöntemlerin beraber kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu da PID kontrol yönteminin günümüzde de aktif bir şekilde kullanıldığı, bunun sebebi olarak da en pratik ve etkili yöntem olduğu düşünülmektedir.

Kontrol donanımı tasarımı hakkında ise yapılan çalışmalarda ortaya çıkan ortak özellikler bazında kontrol sinyalini üretecek donanımın izole bir yapıya sahip olması, hızlı ve doğru sonuç bulması amacıyla tasarımların gerçekleştirildiği ve uygulandığı gözlemlenmektedir. Tasarlanan kontrol donanımı için bahsedilen izole sinyal aktarımı, hızlı ve nitelikli işlem kapasitesi kriterlerini sağlaması adına planlamalar, analizler gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının literatüre benzer yönleri ile bakıldığında kontrol yönteminin uygulanması ve test edilmesi, donanımda yer alan modüllerin özellikleri bazında var olan uygulamaların geliştirilmesi hedefinde planlama yürütülmüştür.

Literatürde yer alan çalışmalara benzerliği tanımlamak gerekirse bir örnek alma, öğrenme sürecinin çıktılarıdır denilebilir. Ancak tasarımların haberleşme yöntemleri, gömülü sensör modülleri, analog sinyal işleme özellikleri gibi bazı kısımlarda özellikle yüksek güç seviyelerinde işlem yapılması gereken yerlerde her robotik sisteme uygun olmadığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında kontrol donanımının kapsamı artırılarak tek bir robotik sisteme göre değil, farklı özelliklere sahip sistemlerde de uyumlu olacak şekilde kullanılabilmesi amaçlanarak tasarımı yapılmıştır. Tasarım boyunca sürecin nasıl yürütüldüğü detaylı bir şekilde aktararak genel anlamda bir gömülü sistemin hangi aşamalardan geçerek oluşturulduğu ve kullanıldığı, alana yönelik olarak nasıl özelleştirildiği paylaşılmıştır. Bu gömülü sistemin bir robotik elektronik kontrol ünitesine dönüşümü, örnek uygulama ile kullanımı ve analizlerine yer verilmiştir, literatüre bu konu ile ilgili detaylı bir anlatıma sahip örnek bir çalışma olarak girmesi hedeflenmiştir.

Tasarlanan kontrol donanımının içerisine farklı türlerde kontrol algoritmaları eklenerek örnek bir robotik sistemi planlı bir şekilde yönetmesi açısından nitelikleri gözlemlenmiştir. Atılan bu adımlar ışığına akademik ve endüstriyel açıdan yerli diğer çalışmalar içerisine gireceği, milli gelişim ve üretime katkısı olacağı umut edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kontrol ünitesinin tasarım, uygulama ve test süreçleri yer almaktadır. Öncelikle kontrol ünitesinin çalışma testlerinin gerçekleştirildiği robotik sistem türü hakkında genel bilgilendirme yapılmıştır. Sistemin genel yapısı açıklandıktan sonra tez kapsamında yapılan çalışmanın detaylarına inilerek donanımsal tasarımda yer alan adımlar temelinde planlama, üretim ve donanımsal test organizasyonları açıklanmıştır. Sonrasında gömülü kontrol kısmını oluşturan yöntemler açıklanarak kontrol ünitesinin robotik sistem üzerindeki performans çıktıları paylaşılmıştır. Performans kriterleri kapsamında ortaya çıkan sonuçlar referansında kontrol ünitesinin yöntemsel uygulama niteliği analiz edilmiştir.

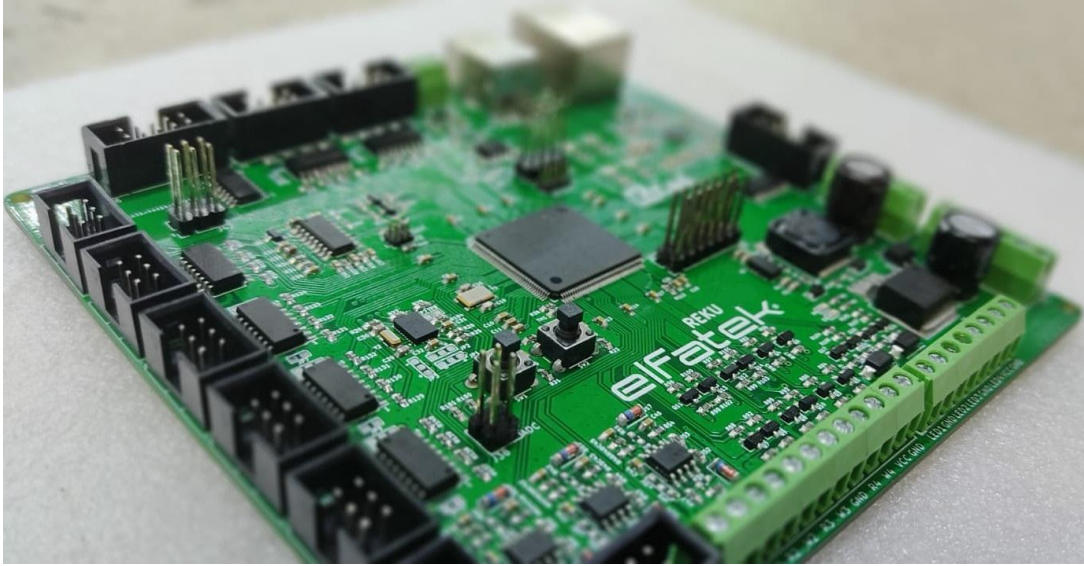
3.1. İnsansız Kara Araçları

İnsansız kara araçları araçlar doğrudan insan kontrollü yapıya sahip geleneksel diğer kara araçlarının aksine uzaktan veya yarı-tam otonom şekilde hareket kabiliyetine sahip teknolojilerdir. Sahip oldukları sensörler, dinamik sistem bileşenleri ve kontrol merkezleri sayesinde kendinden kararlı sistemlere de dönüşebilmektedir. Özellikle insan odağında performansın azaldığı veya riskin arttığı çalışma alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında askeri savunma robotları, bomba imha robotları, rover gibi uzay araştırmalarında kullanılan keşif robotları gibi örnekler verilebilmektedir. Bunların dışında endüstriye hizmet eden türleri de bulunmaktadır. Fabrika içi veya bloklar arası lojistiğin sağlanmasında yük taşıma robotları kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde gelişimi ve üretimi artan otonom otomobiller de insansız kara araçlarına örnek verilebilmektedir. Bu tez çalışmasında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen donanımın uygulamalarının yapılarak gözlemlenmesi adına insansız yük taşıma robotu kullanılmıştır. İlerleyen bölümlerde bu araç daha detaylı açıklanmıştır.

3.2. Kontrol Ünitesinin Donanım Tasarım Süreci

Bu bölümde kontrol ünitesi tasarımının aşamaları ve detaylarına yer verilerek çalışma deneyimleri paylaşılmıştır. Öncelikle tasarımın amaçlanan rolü sağlaması adına içerisinde yer alacak gömülü modüllerin seçimleri, bu modüllerde yer alan devre elemanlarının seçimleri hakkında araştırma yürütülmüştür. Araştırmalar neticesinde alınan kararlar ile modül-eleman seçimleri sağlanmış, devre tasarım aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada şematik tasarım ve simülasyon analizleri yapılarak donanımın gömülü modülleri hem tasarlanmış hem de test edilmiştir. Güç dönüşümü ve kontrolünü sağlayan modüller ayrıca güç analiz programı kullanılarak, haberleşme ve diğer modüller ise genel devre analiz programları ile analiz edilmiştir.

Ön devre hesaplamaları ve analizlerin çıktıları kullanılarak devre tasarım kesinleşmiştir. Şematik planlamalar tamamlandıktan sonra PCB tasarım için çalışma yürütülmüştür. Donanımın gerçek halini belirleyecek ve iç düzenin sağlanacağı bu kısımda eleman yerleşimlerinin iç-dış ortamların olumsuzluklarından etkilenmeyecek düzeyde olmasına dikkat edilmiştir. PCB tasarımı yapıldıktan sonra üretimin sağlanacağı aşamaya geçilmiştir. Bazı kritik modüllerin prototipleri üretilerek donanımsal testler yapılmıştır. Sonrasında bütün donanımın üretiminin sağlanması için bu alanda hizmet veren bir kuruluşla anlaşma sağlanarak tasarlanan PCB elde edilmiştir. Teslim alınan boş PCB'ye elemanlar yerleştirilerek montajları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında gerçek zamanlı donanım testleri yapılarak kullanım uygunluğu ve ileride ortaya çıkabilecek problemler üzerine tespitler sağlanmıştır. Donanım tasarım süreci anlatıldığı gibi aşamalar kaydederek ilerlemiş ve sonuçta aşağıdaki Şekil 3.1 ile görünen yapı ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.1. Robotik Kontrol Ünitesi

Devre Tasarım Programı:

Tez çalışmasında yer alan kontrol ünitesinin şematik ve PCB tasarımları için KiCad programı kullanılmıştır. Genel bir bilgi vermek gerekirse elektronik kartların şematik ve baskı devre tasarımlarının yapılabildiği, devre elemanlarının detaylarının eklenebildiği açık kaynak bir EDA (Elektronik tasarım otomasyonu) programı olup 1992 yılında Jean-Pierre Charras tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde bir ekip tarafından yeni özellikler ile geliştirilmeye devam etmektedir.

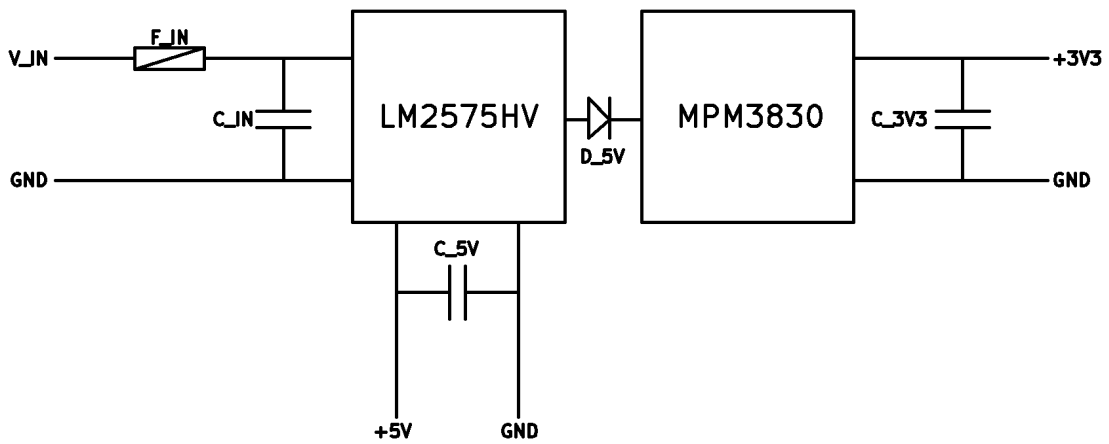
3.2.1. Şematik Tasarım Çalışmaları

Kontrol ünitesi tasarımında ilk adım robotik sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak bir gömülü modül planlaması yapmaktır. Bu planlama dahilinde kart üzerinde yer alacak her bir modül, verilen görevi yerine getirebilecek nitelikte devre hesaplamaları ve eleman seçimleri yapılarak oluşturulmaktadır.

Güç Modülü:

Çalışma kapsamında kontrolcünün giriş beslemesinin 5V-55V gerilim değerleri arasında sağlanması yönünde tercih yapılmıştır. Giriş beslemesinin ters polarlanmasını engellemek adına köprü diyot kullanılmıştır.

Sonrasında girişi 5V seviyesine düşüren LM2575HV ve 5V'tan İşlemcinin besleme geriliminin normal seviyede 3.3V değerinde olması sebebiyle 3.3V seviyesine düşüren MPM3830 regülatör entegreleri kullanılmıştır. Tasarlanan regülatör devreleri ile kontrol ünitesinde yer alan gömülü modüllerin ve 5V gerilimde 1A akım değerine kadar, 3.3V gerilimde 3A akım değerine kadar harici modüllerin güç kaynakları da sağlanmıştır. Ayrıca MPM3830 devresinden geriye doğru akım sızıntısı olmaması adına opsiyonel D_5V koruma diyodu kullanılmıştır.

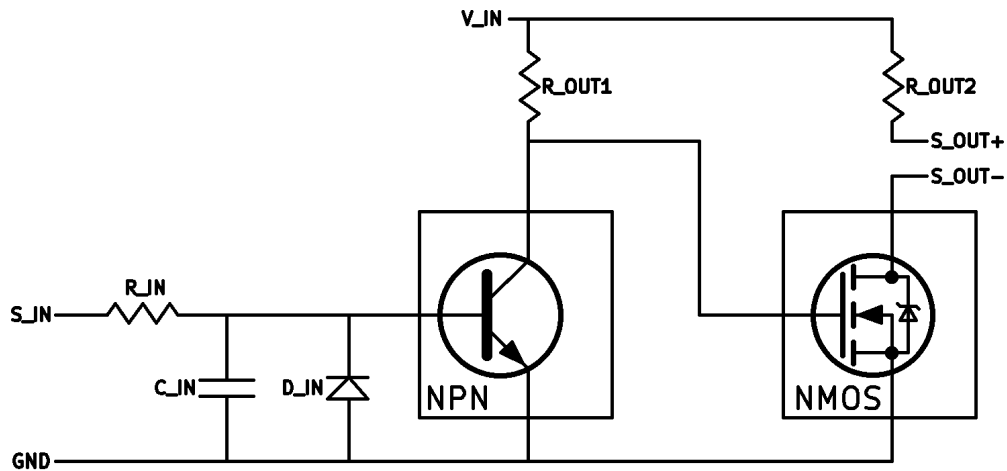


Şekil 3.2. Güç Modülü Şematik Gösterimi

Yüksek Güç Anahtarlama Modülü:

Kontrol ünitesi ile bir far lambası, harici röle veya yüksek voltaj gerektiren harici materyaller gibi yapıların anahtarlama sırasında kullanılması için N kanallı (P4B60HP2F) bir mosfet ile anahtarlama devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki adet harici sistem kontrol edilebilmektedir.

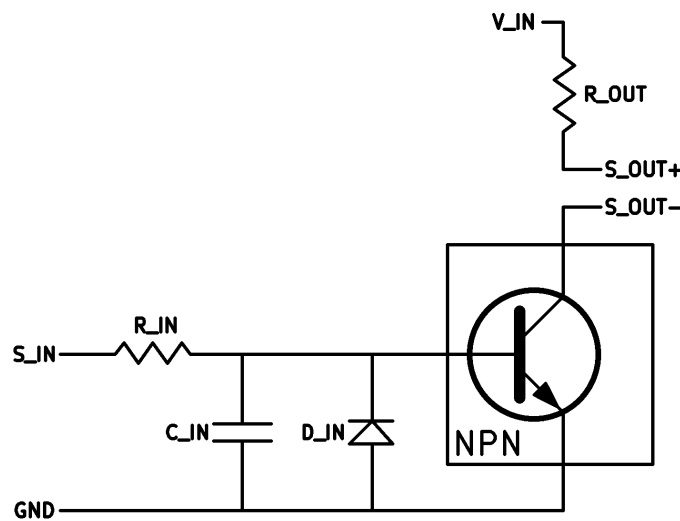
Tasarımda kullanılan mosfetin Drain-Source gerilim kapasitesi 600V (V_IN), Gate-Source gerilim kapasitesi $\pm 30V$, anahtarlama akım kapasitesi 4A, Gate tetikleme akım eşik değeri 2mA ve son olarak toplam güç dağılımı 70W değerlerinde bulunmaktadır. Ayrıca mosfetlerin maksimum sıcaklık dayanım değeri $-50\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır.



Şekil 3.3. Yüksek Güç Anahtarlama Modülü Şematik Gösterimi

Düşük Güç Anahtarlama Modülü:

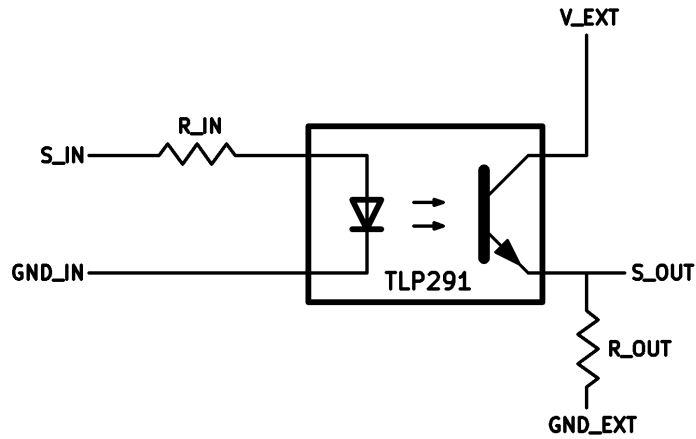
Sinyal lambası, çoklu sensörlerde seçici yapı vb. gibi düşük güçlerde anahtarlabilir dış materyaller için NPN tipte BC817 transistörü ile devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.4 üzerinde görünen anahtarlayıcı çiftlerinden toplamda altı adet bulunup on iki adet harici yapı kontrol edilebilmektedir. Kullanılan transistörlerin Kollektör-Emiter gerilim kapasitesi 45V (V_{IN}), Emitter-Base gerilim kapasitesi 5V, anahtarlabilir akım kapasitesi 500mA, Base tetikleme akım eşik değeri 2mA ve son olarak toplam güç dağılımı 500mW değerlerinde bulunmaktadır. Ayrıca transistörlerin maksimum sıcaklık dayanım değeri $-50\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır.



Şekil 3.4. Düşük Güç Anahtarlama Modülü Şematik Gösterimi

Dijital Sinyal Kontrol Modülü:

Giriş gerilimi (V_{EXT}) seviyesinde dijital sinyal üzerinden donanım kontrolü yapmak adına üç farklı gerilimde çalışabilen toplamda on iki adet çıkışa sahip modül tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’da gösterilen şema üzerindeki devre tasarım bir tanesidir. Lojik sinyal seviyesinin işlemcinin pinlerini aşması ve korumanın sağlanması için ara (yalıtım) katman oluşturması için TLP291-4 adlı içerisinde dört adet optokuplör bulunan paket entegre kullanılmıştır. Kullanılan entegre 170mW maksimum güçte 80V gerilim değerine kadar olan sinyallerin kontrollerinde çalışabilmektedir. Ayrıca entegrelerin maksimum sıcaklık dayanım değeri $-50\text{ }^{\circ}\text{C}/+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır.

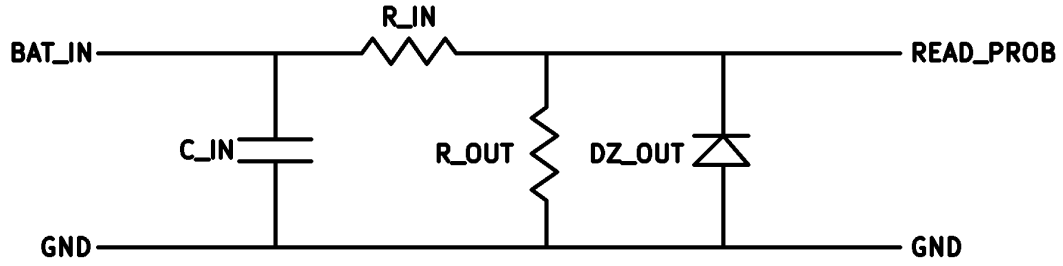


Şekil 3.5. Dijital Sinyal Kontrol Modülü Şematik Gösterimi

Batarya Okuyucu Modül:

Robotik sistemler genellikle şarj edilebilir piller ile birlikte kullanılmaktadır. Özellikle serbest hareket kabiliyetine sahip sistemlerde verilen görevleri yerine getirebilecek süreyi sağlayacak kapasitede bataryalar yer almaktadır. Bu bataryaların kullanımı esnasında şarj seviyelerini ölçümlemek robotun hareket planlamalarında önemli rol oynamaktadır.

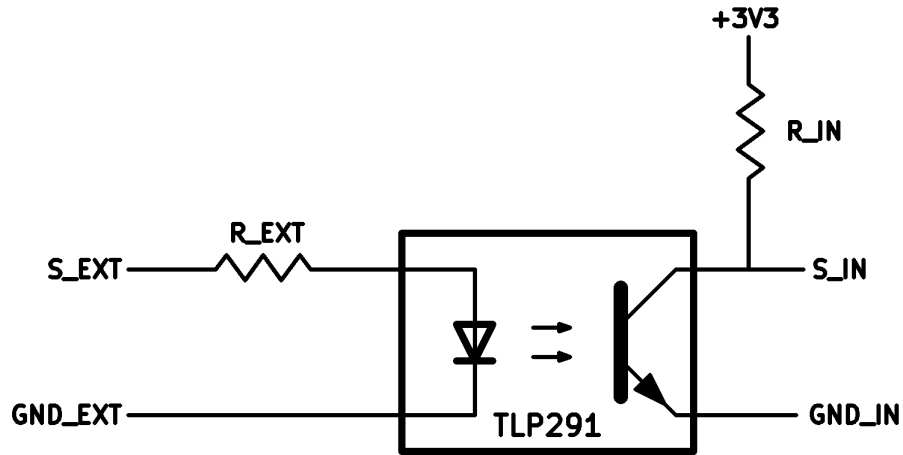
Kontrol ünitesinde bataryalarda yer alan BMS (Batarya Yönetim Sistemi) yapılarından gelen sinyaller doğrultusunda kalan şarjın kritik olup olmadığına karar vermesi adına yalıtımlı okuyucu modül tasarlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.6 üzerinde modül şematik tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Batarya Okuyucu Modül Şematik Gösterimi

Dijital Sinyal Okuyucu Modülü:

Tasarlanan bu modül batarya okuyucu modül ile aynı özelliklere sahip olmakla beraber iki adet TLP291-4 kullanılarak toplamda sekiz adet giriş sinyalini yalıtımlı bir şekilde okuyabilmektedir. Ek olarak düşük gerilim seviyesinde işlemci dijital okuma pinlerini test etmek amacıyla direkt etkileşim portu da tasarıma eklenmiştir. Robotik sistemlerde yer alan acil durdurma butonları gibi güvenlik unsurlarının sinyal takipleri için dijital sinyal okuyucu girişleri kullanılmıştır.

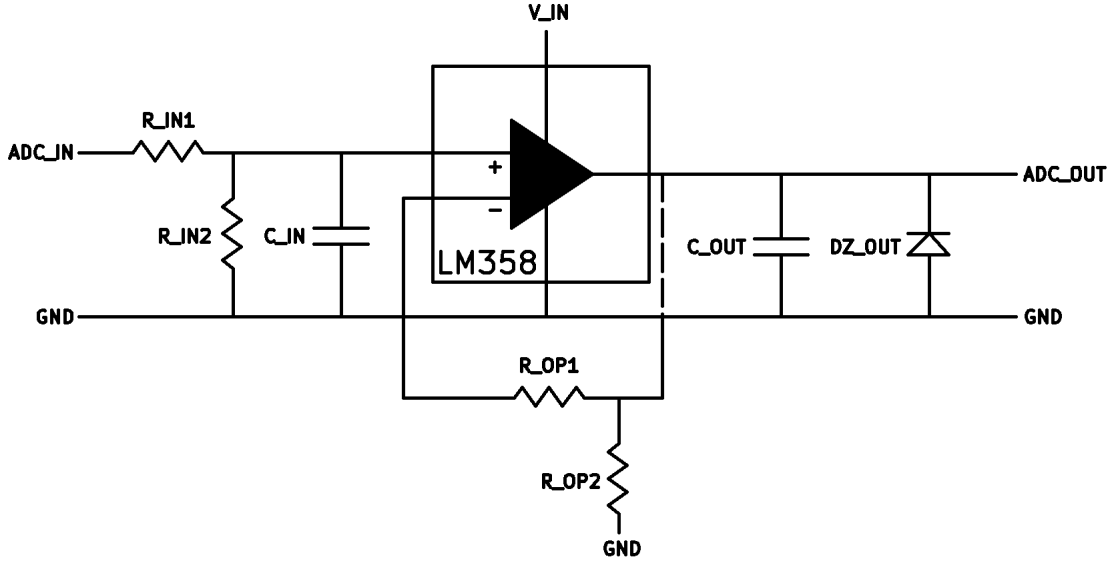


Şekil 3.7. Dijital Sinyal Okuyucu Modülü Şematik Gösterimi

Analog & Dijital Seviye Dönüştürücü Modülü:

Robotik sistemde kullanılan çevre bileşenlerin bazılarında alınan veriler analog olarak elde edilmekte ve gerilim seviyesi yüksek olabilmektedir. Özellikle ultrasonik sensör gibi bazı sensörlerin ilettiği veriler analog sinyal şeklindedir. Bu gibi sinyalleri

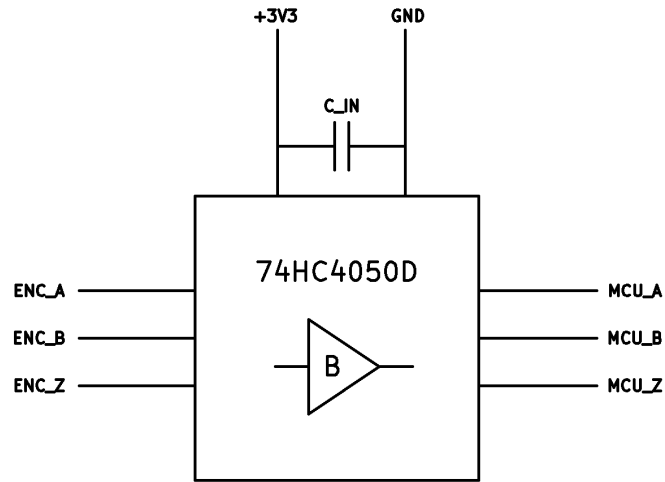
işlemcinin anlamlandırabileceği seviyeye getirmek adına kontrol ünitesinde seviye dönüştürücü modül kullanılmıştır. Tasarlanan devrenin şematik planlaması Şekil 3.8 üzerinde gösterilmektedir. Bu modülün hem analog hem de dijital sinyal dönüştürme aralığı 0-10VDC'den 0-3.3VDC'ye olmaktadır.



Şekil 3.8. Analog & Dijital Seviye Dönüştürücü Modülü Şematik Gösterimi

Enkoder Okuyucu Modülü:

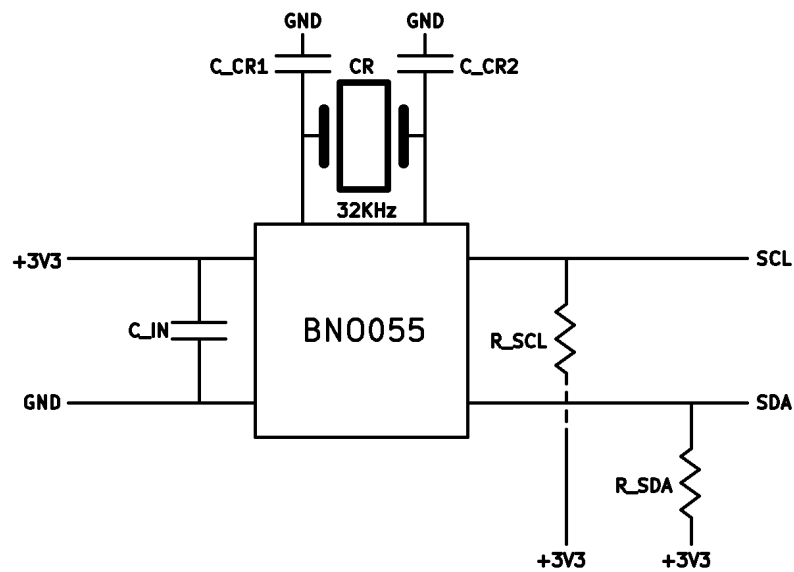
Robotik yapının dinamik hareketleri motorlar üzerinden sağlandığında bu motorlarla birlikte kullanılan enkoderler sayesinde hız, mesafe ve pozisyon bilgisi gelen darbe sinyalleri yorumlanarak hesaplanabilmektedir. Enkoderin sağladığı darbe sinyallerini direkt sinyal çevrimi üzerinden yalıtımlı bir şekilde almak için kontrol ünitesine gömülü okuyucu modül tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda 74HC4050D seviye kaydırıcı entegresi kullanılmıştır. Toplamda dört adet enkoderden veri alınabilmektedir. Kullanılan entegre +7V gerilim değerine kadar olan sinyalleri giriş gerilimine (+3.3V) dönüştürebilmektedir. Ayrıca enkoderlerin beslemeleri de 5V'a kadar direkt olarak kontrol ünitesinden alınabilmektedir. Modülün şematik tasarımı Şekil 3.9 üzerinde yer almaktadır.



Şekil 3.9. Enkoder Okuyucu Modülü Şematik Gösterimi

IMU Sensör Modülü:

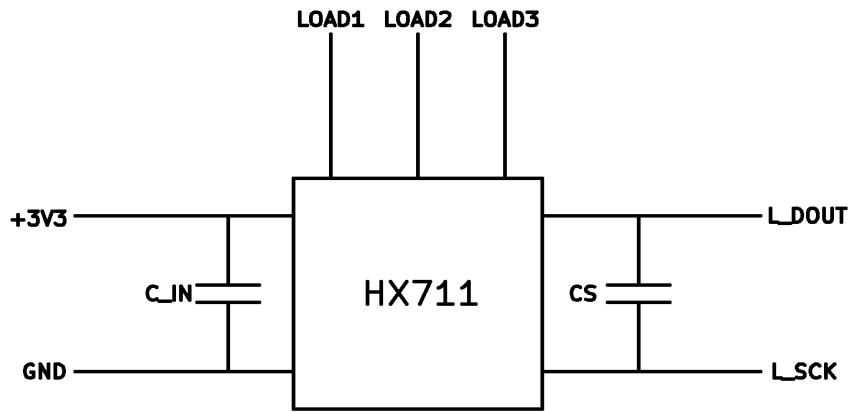
Kontrol donanımına gömülü şekilde tasarlanan eğim ve ivme ölçer sensör modülü robotun harici IMU modülü dışında ikinci bir doğrulayıcı yapı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yedek sensör yapısı olarak da görev almaktadır. Şekil 3.10 üzerinde gösterilen şematik merkezinde BNO055 entegresi kullanılmıştır. Entegre beslemesi 3.3V gerilim değerindedir. İç yapısında Manyetometre, İvmeölçer ve Jiroskop üniteleri mevcut olup, sensör füzyonu mantığında çalışmaktadır. Kontrol donanımı ile gömülü iletişimi IIC üzerinden olmaktadır.



Şekil 3.10. IMU Sensör Modülü Şematik Gösterimi

Yük Ölçüm Modülü:

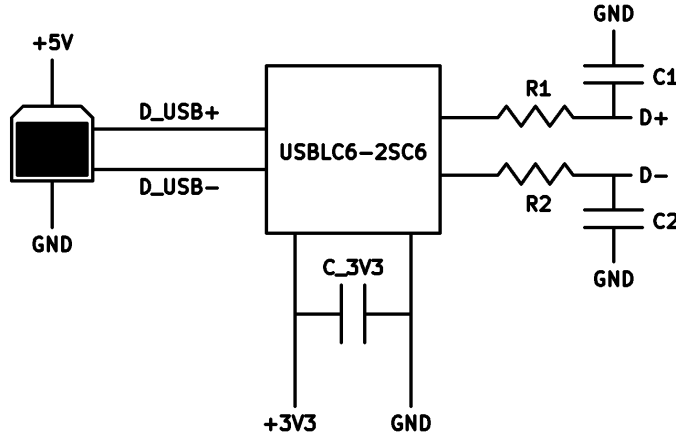
Robotik yapılar görev süreleri içerisinde yük taşımak amacıyla kullanılabilir. Bu gibi durumlarda sistemin sınırlarının bilinmesi taşıma işleminin daha sağlıklı olmasını sağlayacaktır. Gereğinden fazla yüklenmelerin önüne geçilmiş olacaktır. Kontrol ünitesinde HX711 adında genellikle ağırlık ölçümleri için kullanılan bir yirmi dört Bit ADC (Analog Dijital Çevirici) entegresi kullanılmıştır. Yük hücresinin çıkışı aşağıdaki Şekil 3.11’de yer alan modülün LOAD1, LOAD2 ve LOAD3 girişlerine bağlanmaktadır.



Şekil 3.11. Yük Ölçüm Modülü Şematik Gösterimi

USB 2.0 Haberleşme Modülü:

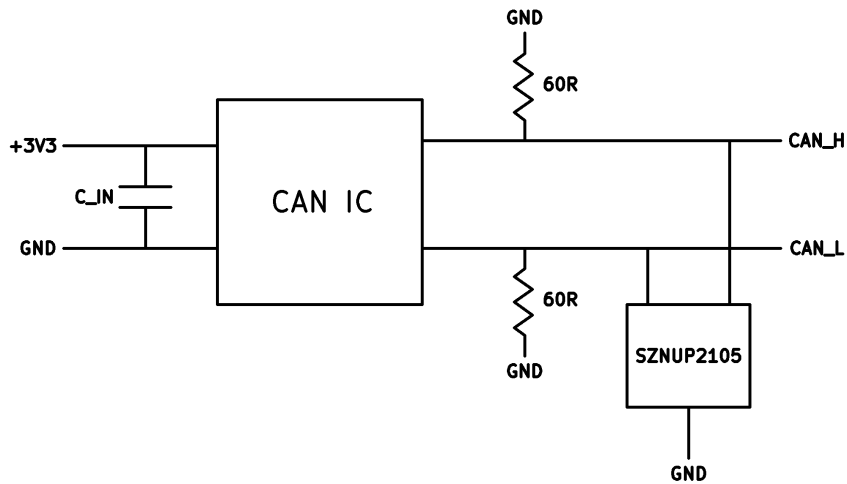
Kontrol ünitesinin diğer ana bileşenler ile iletişimini sağlamak adına oluşturulan protokollerden birisi de USB’dir. Devre tasarımı işlemci ile direkt bağlantı tercih edilmemiştir. Şekil 3.12 üzerinde görüldüğü gibi direkt bağlantıda haberleşme sinyali bozucu etkilerden etkilenebileceği için USBLC6-2SC6 adında içerisinde diyot bağlantısı bulunan koruma entegresi kullanılmıştır. Koruma entegresi haberleşme hattı olan D+ ve D- yollarında oluşacak sızmaları engellemek ile beraber tasarıma bu yollara bağlı 22Ω direnç ve 100nF kondansatör çiftleri kullanılan RC filtre devresi de dahil edilmiştir.



Şekil 3.12. USB 2.0 Haberleşme Modülü Şematik Gösterimi

CAN Haberleşme Modülü:

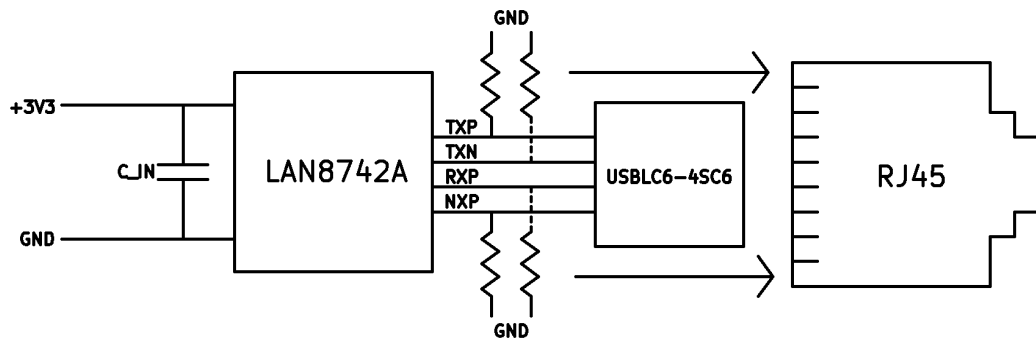
Kontrol panosundaki ana modüller ve diğer çevre bileşenler ile gerektiğinde CAN protokolü üzerinden haberleşmenin sağlanabilmesi amacıyla kontrol ünitesine opsiyonel CAN uyumlu devre tasarım eklenmiştir. Kullanılan SN65HVD234 3.3V gerilimle beslenmekte olup haberleşme donanım filtresi olarak LCR (Bobin, Kondansatör, Direnç) filtre yapısı ile birlikte SZNUP2105L hat koruma diyodu kullanılmıştır. Ayrıca CAN haberleşmesinde her hattın ucunda 120Ω bulunması gerekmektedir. Bu değer iletişim esnasında hat üzerinde oluşan dalga birikimlerini engellemektedir. Şekil 3.13'te CAN haberleşme modülünün şematik planlaması yer almaktadır.



Şekil 3.13. CAN Haberleşme Modülü Şematik Gösterimi

Ethernet Haberleşmesi Modülü:

Otonom görev bilgisayarı v.b. ana bileşenler ile daha hızlı iletişim kurma ihtiyacını karşılaması adına kontrol ünitesine Ethernet modülü eklenmiştir. Tasarlanan devrede sürücü entegresi olarak LAN8742A kullanılmıştır. Entegre RMI (Azaltılmış Ortamdan Bağımsız Arayüz) iletişimi için altyapı oluşturmaktadır. Şekil 3.14 üzerinde çizilen şematik planlama yer almaktadır.



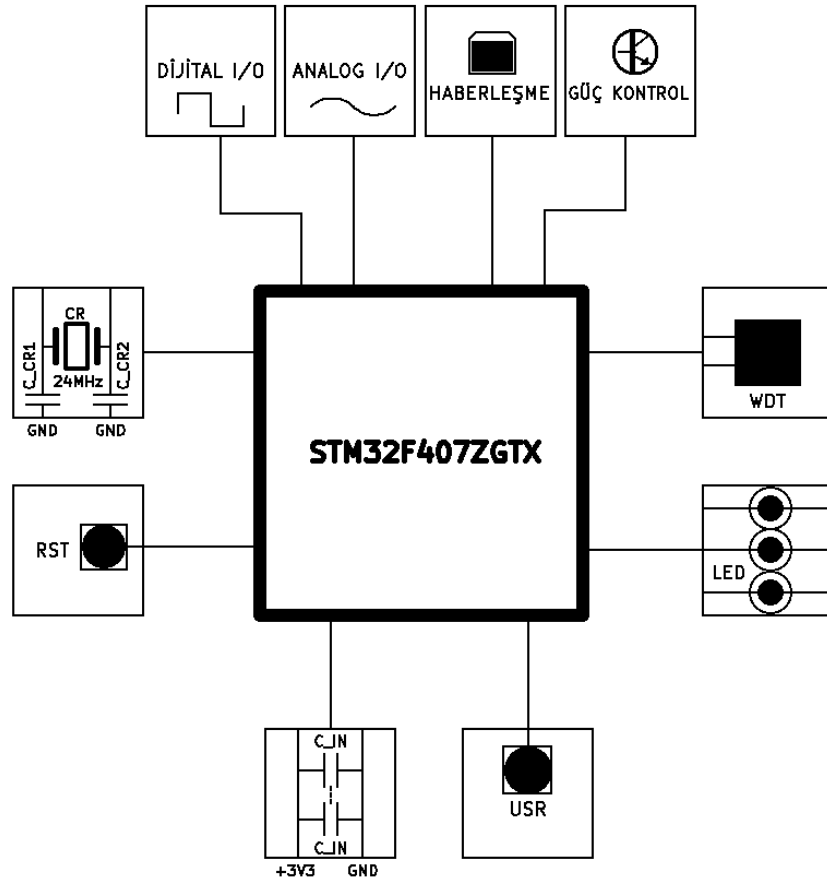
Şekil 3.14. Ethernet Haberleşme Modülü Şematik Gösterimi

Genel Amaçlı Haberleşme & Giriş Çıkış Pinleri:

Filtre ve koruma devreleri ile özelleştirilmiş üst düzey haberleşme protokolleri haricinde genel olarak sensör v.b. yan modüller ile kablolu yakın alan haberleşmesinin sağlanması için IIC, SPI, USART (UART, RS232, RS485), iki kanallı on iki Bit ADC ve genel amaçlı giriş çıkış pinleri tasarıma dahil edilmiştir.

İşlemci Modülü:

Kontrol ünitesinin merkezini oluşturan ve diğer tüm gömülü modüllerin bağlantılı olduğu tasarımın beyin kısmıdır. Modülün devre tasarımında Şekil 15'te görüldüğü üzere harici osilatör, besleme dekaplaj kondansatörleri, sıfırlama ve kullanıcı butonları, programlama ve ayar girişleri, işlemciye bağlı LED göstergeler ve son olarak harici WDT (Güvenlik Zamanlayıcısı) devresi yer almaktadır.



Şekil 3.15. İşlemci Modülü Şematik Gösterimi

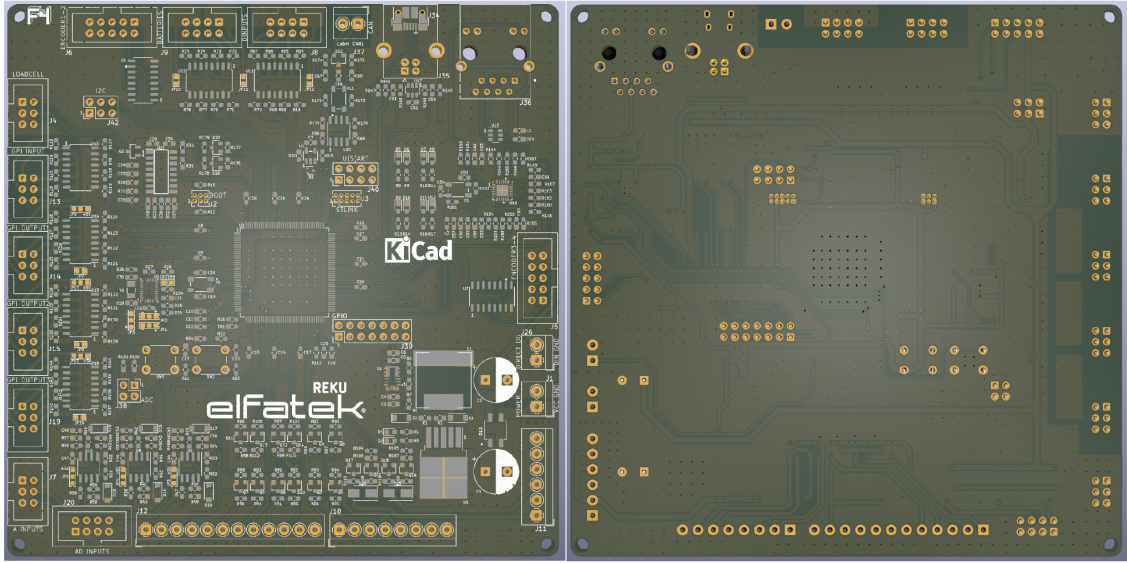
3.2.2. Donanım Tasarım ve Üretim Çalışmaları

Kontrol ünitesinin şematik planlamaları tamamlandıktan sonra devre elemanlarının yerleşim planlamaları yapılarak her modül kendi içerisinde gruplandırılmıştır. Yüksek gücün etkin olabileceği modüller diğer haberleşme ve gömülü sensör modüllerinden mesafeli yerleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.16 üzerinde modül yerleşimleri yer almaktadır.

Dijital Sinyal Kontrol Çıktıları	Enkoder Okuyucu 1	Dijital Sinyal Okuyucu Girişleri	Batarya Okuyucu Girişleri	CAN	USB	ETHERNET
	I2C		Harici İzleyici Güvenlik Modülü	U(S)ART	LED Göstergeler	
	Gömülü Sensör Modülleri			PROG.		
Analog Seviye Dönüştürücü Girişleri			Ek ADC Girişleri		GPIO Portu	
	Dijital Seviye Dönüştürücü Girişleri	Düşük Güç Anahtarlama Kontrol Çıktıları	Yüksek Güç Anahtarlama Kontrol Çıktıları	Besleme Modülü		Direkt Dijital Giriş

Şekil 3.16. Gömülü Modüllerinin Konumları

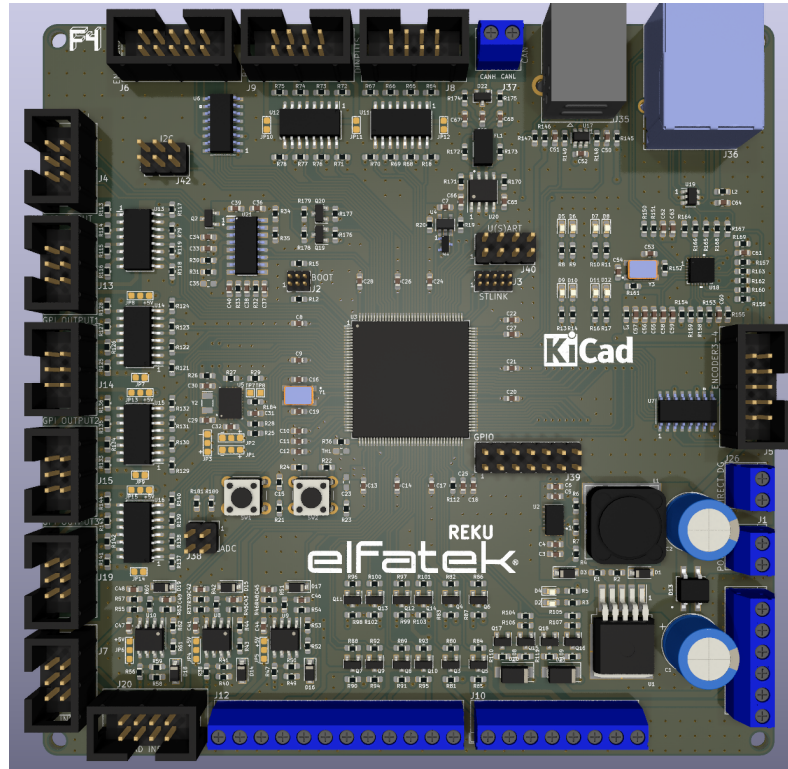
Blok gösterimde yer alan modül yerleşim planlaması gerçekleştirildikten sonra PCB tasarım kısmına geçiş yapılmıştır. Bu kısımda iki katmanlı devre tasarım yapılmıştır. Genel olarak alt katmanda güç hattı ve bazı sinyal hatları, üst katmandan ise kontrol hatları çizilmiştir. Genel sinyal dengesi için GND hattı iki yüzeye de yayılacak şekilde poligon alan oluşturulmuştur. Şekil 3.17’de genel olarak PCB tasarım ve GND alanları görülmektedir.



Şekil 3.17. Genel PCB Tasarım

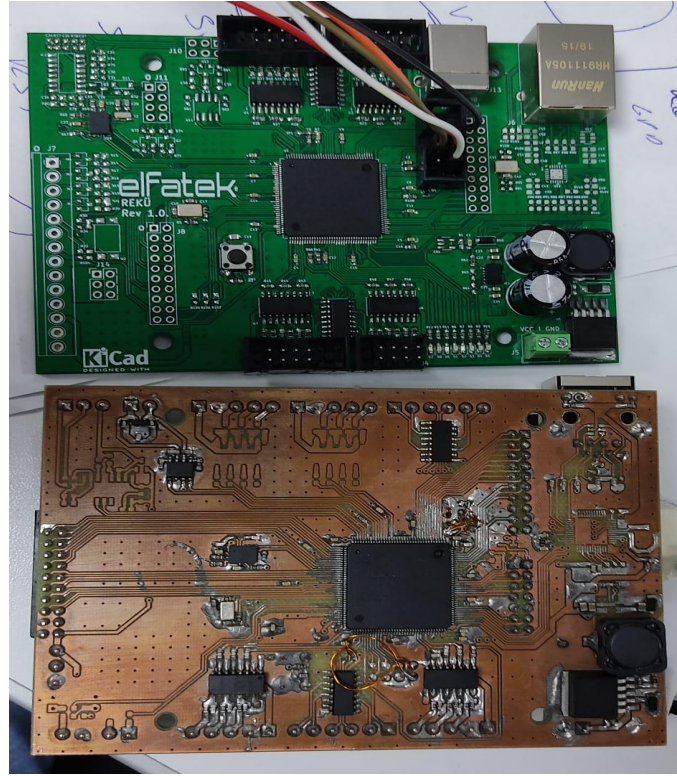
Sağ alt köşede yer alan güç modülünün tam yükte ısınmaması adına özellikle regülatör entegrelerinin bulunduğu yerlerde bölgesel poligon tasarımı yapılmıştır. Ek olarak yalıtımlı dijital sinyal okuma ve yazma modülleri için giriş-çıkış bölümleri ayrılmıştır.

Donanımın malzemesiz hali incelendikten sonra bütün modüllerin üç boyutlu yapıları PCB'ye eklenmiştir. Şekil 3.18'de yer alan form tüm tasarım süreci sonunda tamamlanmış robotik kontrol ünitesidir.



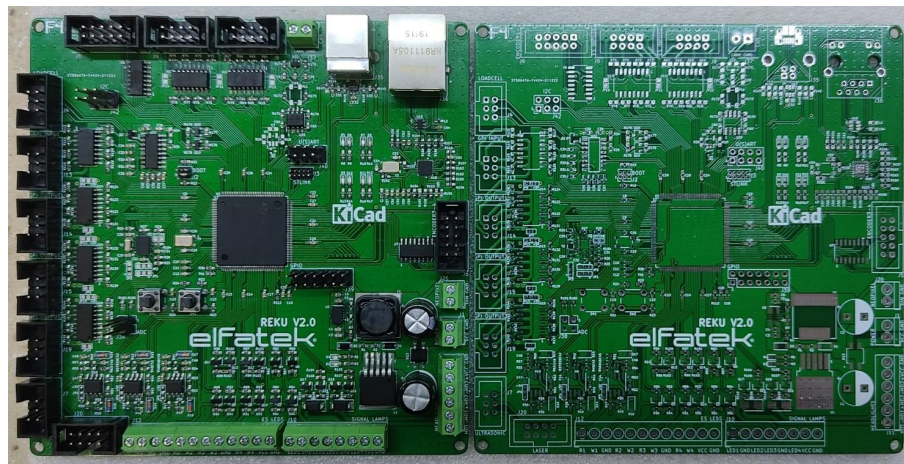
Şekil 3.18. PCB Tasarımın 3 Boyutlu Montajlı Gösterimi

Şematik ve PCB tasarım planlamaları tamamlandıktan sonra gerçek zamanlı test işlemleri için prototip üretimler yapılmıştır. Profesyonel üretime gönderilmeden önce bir prototip üretim makinesi yardımıyla ilk versiyonun yolları ve eleman yerleşim noktaları kazıtılmış, donanımsal testleri yapılacak elemanlar montajlanmıştır. Ek olarak bazı kritik modüller ayrıca tasarlanarak üretilmiştir ve testleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında PCB üretimi yapan bir firmaya tasarım gönderilerek prototip versiyonun profesyonel hali tedarik edilmiş ve bu kart ile de testler yapılmıştır. Son olarak tüm donanımsal temelli test çalışmaları tamamlandığında asıl donanımın üretimi gerçekleştirilerek genel kontrol yazılımı ve robotik sistem kontrol testleri gerçekleştirilmiştir. Modüllerin güç ve sinyal tepkilerini ölçmek amacıyla gerçekleştirilen giriş testlerinde donanım odaklı analizlerin yanında bazı modüllerin ilk çalışma testleri için basit veri okuma yazılımlarından da destek alınmıştır. Şekil 3.19 üzerinde giriş testlerinin yapıldığı donanımlar görülmektedir.



Şekil 3.19. Prototip Üretimler

Gerekli donanım testleri gerçekleştirildiğinde elde edilen analiz sonuçları nihai kontrol ünitesi tasarımı için referans sağlamıştır. Harici modüller ve prototip üretimlerin kullanıldığı test işlemleri ile donanımın kontrol sınırları, uç çalışma koşullarındaki davranışları ve sinyal işleme kalitesi ölçülmüştür. Sonuçlar yorumlanarak gömülü modüllerin devre tasarımlarında görülen eksiklikler giderilmiş ve PCB yerleşim planlaması EMC kurallarına uygun şekilde yapılmaya çalışılmıştır. Neticede Şekil 3.20 üzerinde yer alan donanım ortaya çıkmıştır.



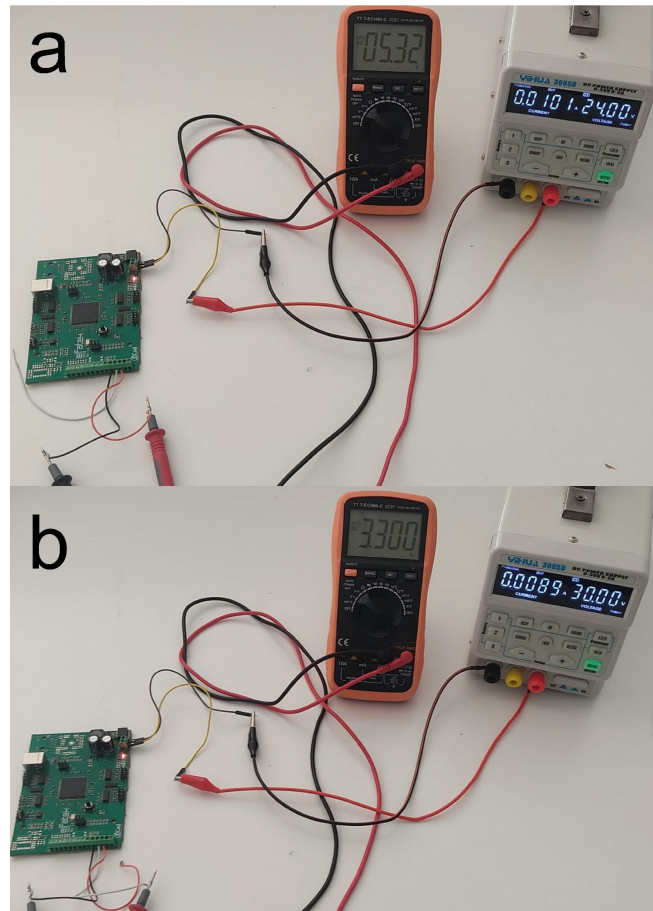
Şekil 3.20. Kontrol Ünitesi-Tamamlanmış Versiyon

3.2.3. Donanım Testleri

Bu bölümde prototipi üretilen kontrol donanımının üzerinde yer alan ve kontrol sinyalinin oluşmasında kritik rolü bulunan birimler test edilmiştir. İlk prototip ile sağlanan tecrübeler doğrultusunda ikinci ve asıl olan donanım gerçekleştirilerek sonuca varılmıştır.

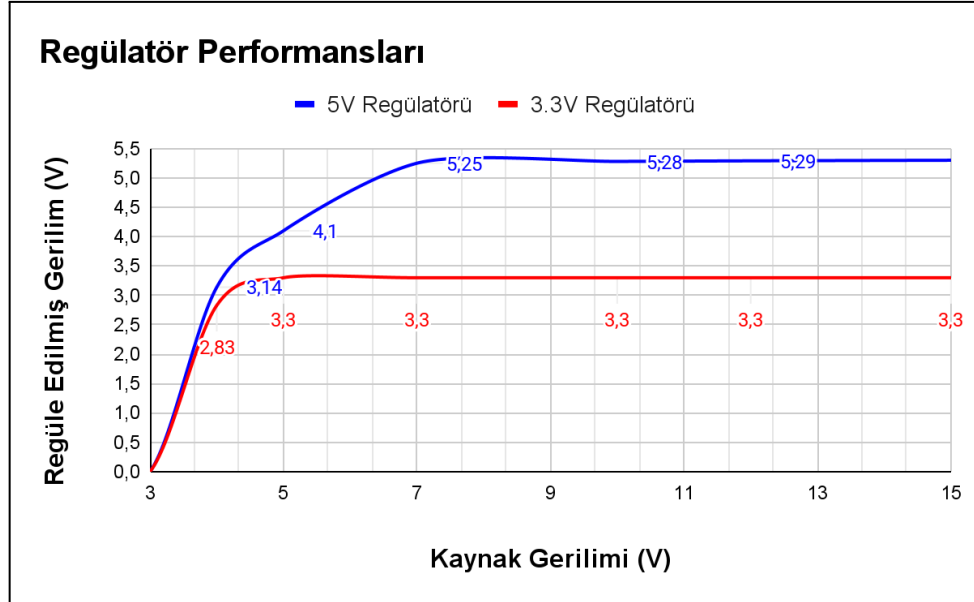
Güç Testleri:

Kontrol donanımını besleme görevinde tasarlanan gömülü güç modülü testleri genel test işlemlerinin başında gelmektedir. Çünkü giriş gücünün doğru sağlanabilmesi tüm donanım adına gereken en öncelikli ihtiyaçtır. Test kapsamında güç modülünün girişine 30V değerine kadar kademeli olarak enerji verilerek 5V ve 3.3V regülatör devrelerinin çıkış performansları gözlemlenmiştir. Ek olarak gömülü sistemin tek başına çektiği akımı ölçümlemek adına gerilim-akım analizi yapılmıştır.



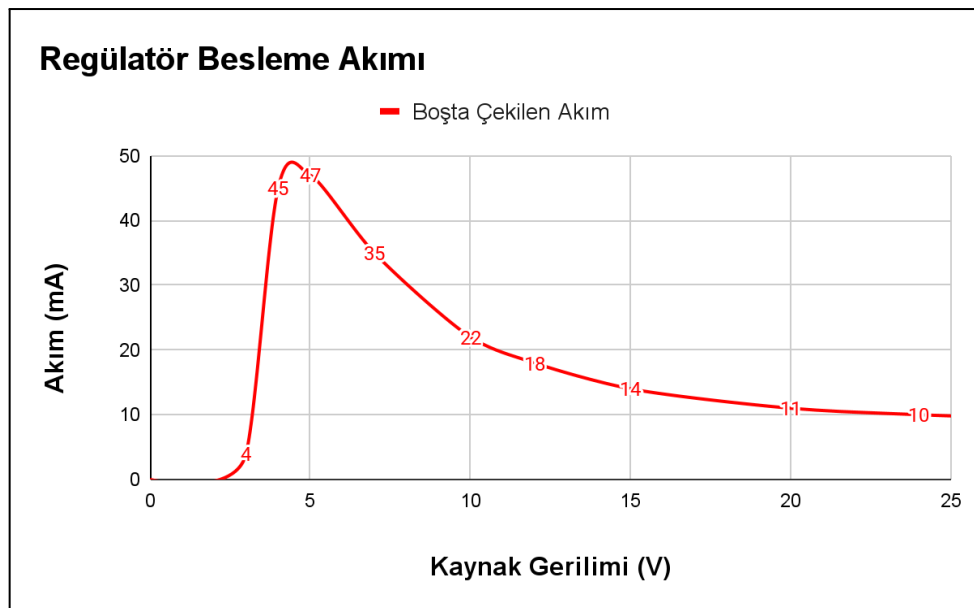
Şekil 3.21. Güç Regülasyon Testleri

Girişe verilen gerilim kademeleri ile güç modülünün çıkış gerilimleri aşağıdaki Şekil 3.22 üzerinde gösterilmektedir. 12V kaynak geriliminden sonra çıkış gerilimlerindeki değişimin sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.22. Güç Modülünde Kullanılan Regülatörlerin Çıkış Performans Grafikler

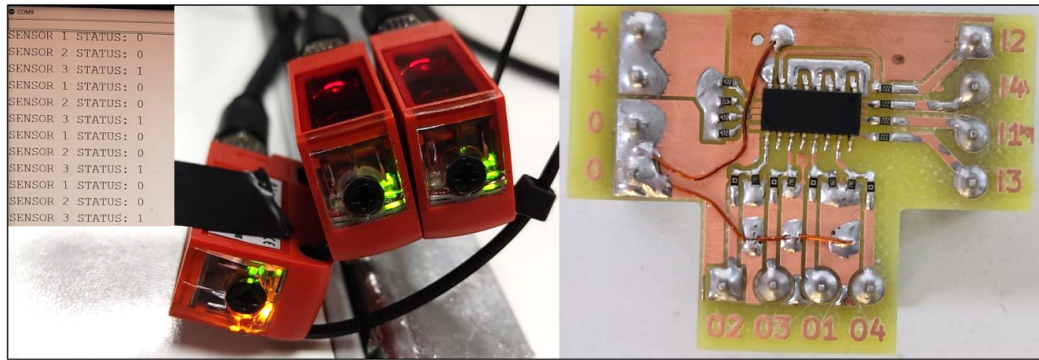
Kontrol ünitesine herhangi bir harici sistem bağlı değilken güç modülünün çektiği akım belirli bir kaynak geriliminden sonra Şekil 3.23'te olduğu üzere yaklaşık 10 mA seviyesine gerilemektedir.



Şekil 3.23. Güç Modülünde Kullanılan Regülatörlerin Boşta Çektiği Toplam Akım Grafiği

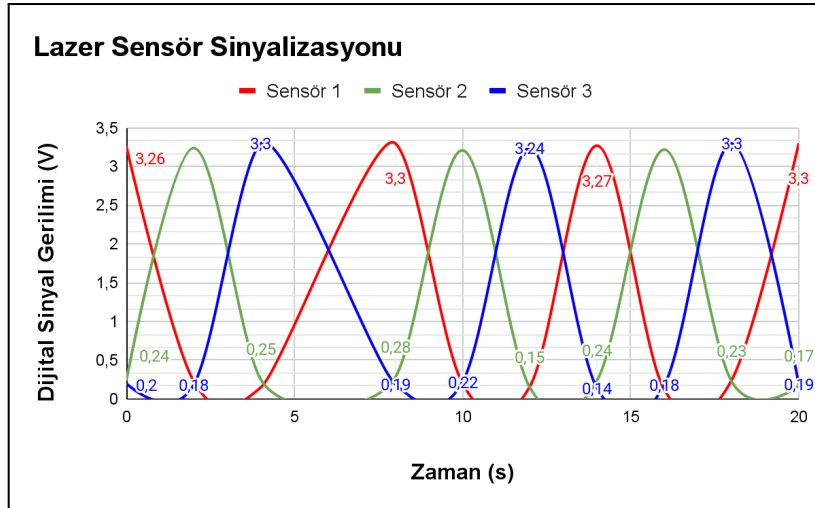
Dijital Sinyal Okuma & Kontrol Testi:

Güç testleri tamamlandıktan sonra kontrol ünitesinde kullanılması planlanan dijital sinyal işlem modülleri ek tasarımlar ile denenerek analiz edilmiştir. Aynı modül tasarımlarındaki amaç donanım testleri esnasında esnek çalıştırma imkanı bularak uç sınırları belirlemektir. Öncelikle lazer sensörler vasıtasıyla dijital sinyal okuma uygulaması geliştirilmiştir. Harici yalıtım modülünün besleme girişlerine (+, 0) 3.3V verildikten sonra lazer sensörler okuma girişlerine (I1, I2, I3, I4) bağlanmıştır. Lazer sensörlerin üzerinde bulunan ayar potu ile mesafe ölçüm aralığı 10 cm şeklinde ayarlanmıştır. 10 cm içerisindeki engeller için 3.1-3.3V lojik 1 seviyesi üretilmektedir. Bunun dışında kalan mesafelerde 0-0.2V lojik 0 seviyesi üretilmektedir. Test bağlantısı ve yardımcı test modülü Şekil 3.24 üzerinde yer almaktadır.



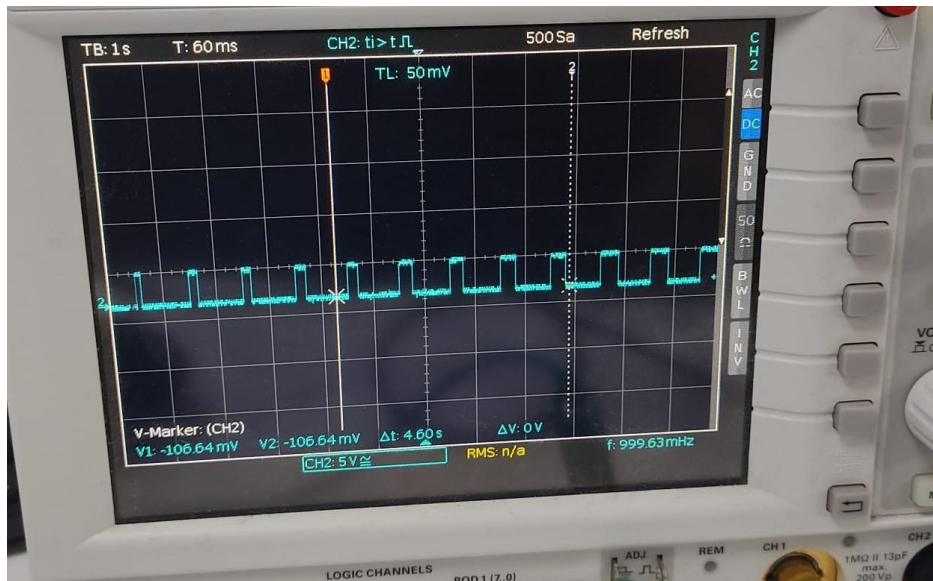
Şekil 3.24. Harici Yalıtım Modülü İle Lazer Sensör Verisi Okuma

Lazer sensörler sırasıyla tetiklenerek Şekil 3.25'te var olan sinyalleri oluşturmaktadır.



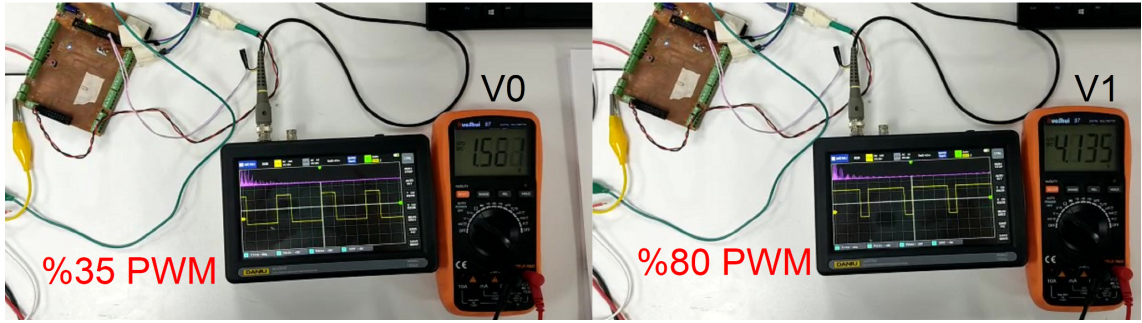
Şekil 3.25. Lazer Sensörlerin Dijital Sinyal Grafiği

Harici yalıtım modülü ile lazer sensör verisi okuma testi yapıldıktan sonra PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyallerinin takibi ile ilgili test işlemi de gerçekleştirilmiştir. Dış kaynaktan alınan darbe sinyallerinin modül çıkışlarında oluşturduğu düşük seviye sinyaller osiloskop ile takip edilmiştir.



Şekil 3.26. Harici Yalıtım Modülü İle Değişken Dijital Sinyal Okuma

Dijital sinyal işlemlerinin ikinci adımı kontrol ünitesinde sinyal üretmek harici sistemlere orantılı bir şekilde aktarmaktır. Konuyla ilgili temel bir uygulama geliştirilerek prototip donanım üzerinde yer alan çıkışlar üzerinden PWM sinyal üretimi gerçekleştirilmiştir.

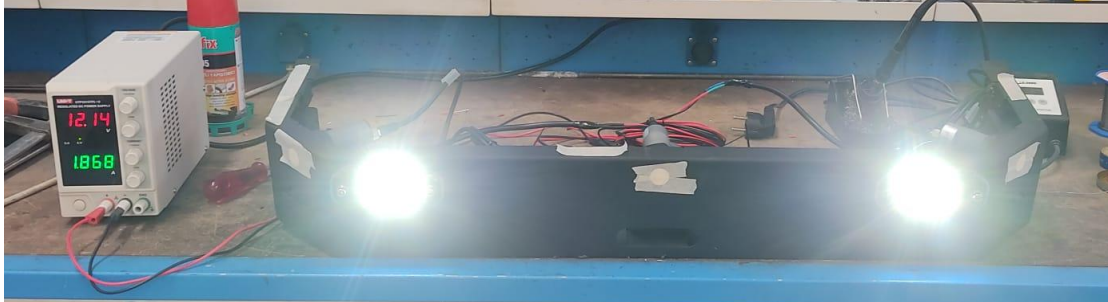


Şekil 3.27. Prototip Üretim İle PWM Sinyal Üretim Testleri

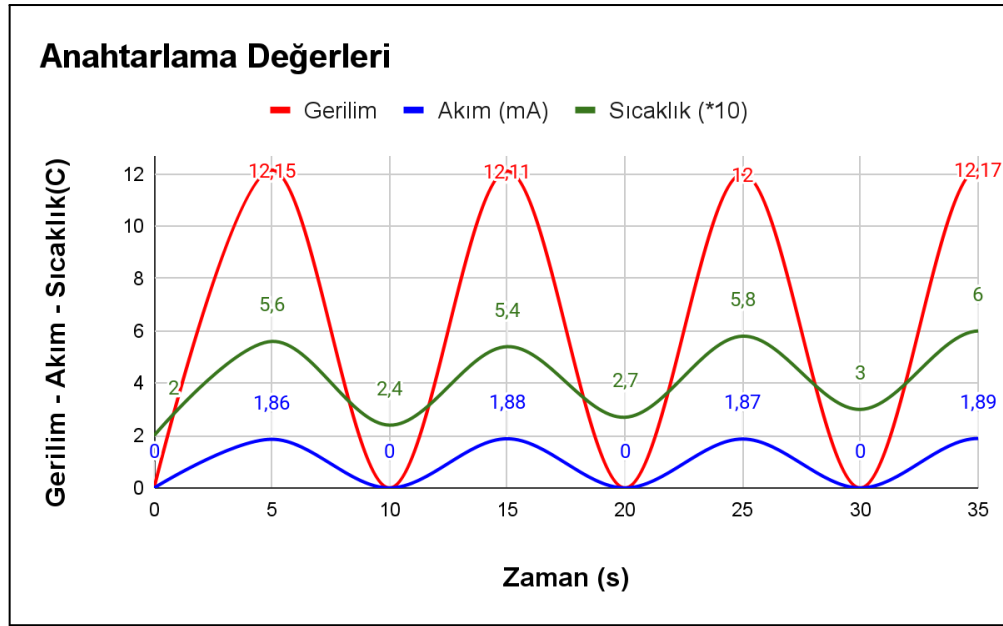
Şekil 3.27 üzerinde yer alan test görsellerinde 5V değerine kadar PWM sinyali üretimi gösterilmektedir. %35 görev döngüsünde yaklaşık 1.6V, %80 görev döngüsünde yaklaşık 4.1V gerilim üretilmektedir. Kare sinyallerin görev döngülerine göre oluşumu dijital osiloskoptan takip edilmiştir.

Yüksek Güç Anahtarlama Testi:

Harici yüksek güç anahtarlama modülü ile far ışıklandırması testi yapılarak anahtarlama esnasında ortaya çıkan değişkenler gözlemlenmiştir. Çıkışta yaklaşık 24W değerinde bir gücü kısa süreli aralıklarla açıp kapatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.28. Far Lambası Çifti İle Yük Testi



Şekil 3.29. Far Lambası Kontrolü Çalışma Grafiği

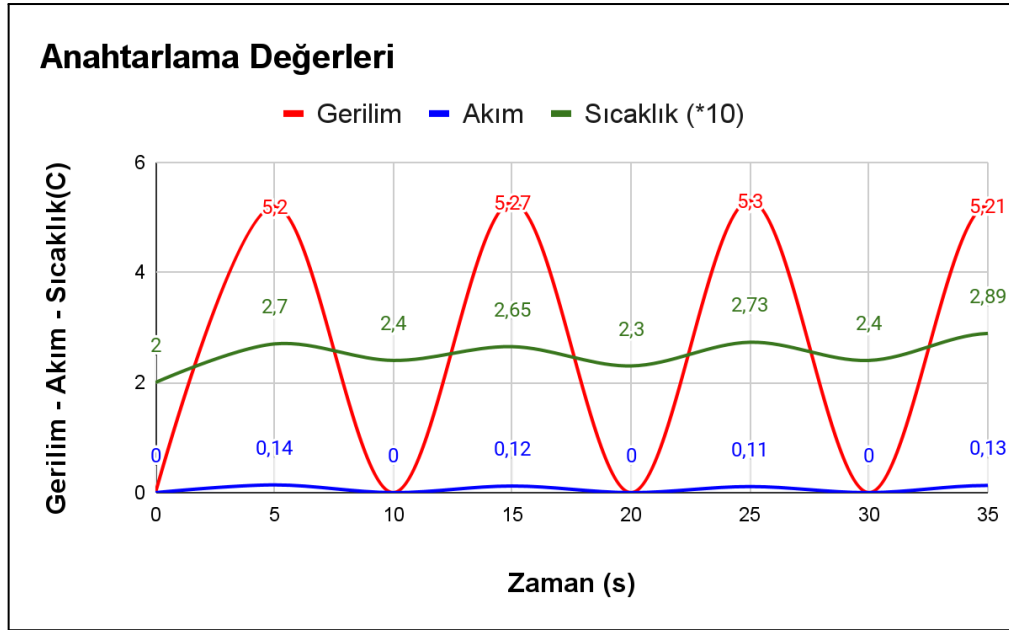
Yapılan anahtarlama test çalışmasında yukarıdaki Şekil 3.29’da görüldüğü üzere mosfetlerin çıkışından alınan yaklaşık 1.85A akım değerinde entegre üzerindeki sıcaklığın tepe değeri 60° C’ye ulaşmaktadır.

Düşük Güç Anahtarlama Testi:

Anahtarlama testlerinden birisi de harici düşük güç anahtarlama modülü ile yapılan test işlemidir. sinyal lambası ışıklandırması testi yapılarak anahtarlama esnasında ortaya çıkan değişkenler gözlemlenmiştir. Çıkışta yaklaşık 800mW değerinde bir gücü kısa süreli aralıklarla açıp kapatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30. Sinyal Lambası Anahtarlama Testi



Şekil 3.31. Sinyal Lambası Kontrolü Çalışma Grafiği

Düşük güç kontrolünde Şekil 3.31 üzerinde yer alan veriler ışığında yaklaşık 5V'luk bir sinyal lambasının anlık 140mA değerinde akım çekmesiyle entegre üzerinde oluşan sıcaklık maksimum 29°C 'yi bulmaktadır.

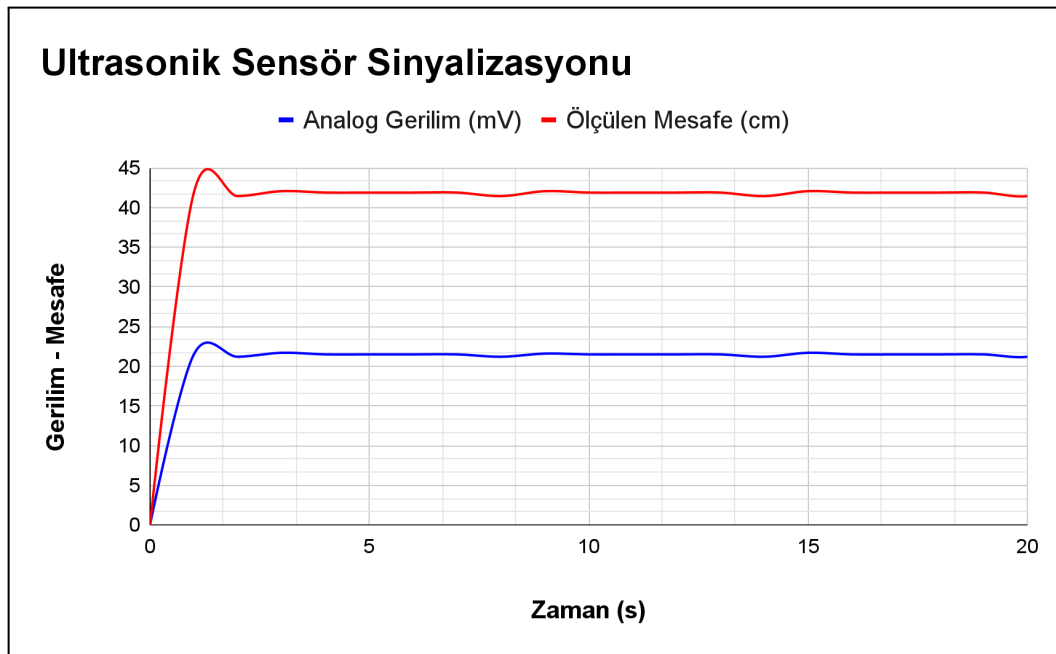
Analog Seviye Dönüştürme Testi:

Güç testlerinden sonra test etmek amacıyla tasarlanmış harici analog seviye dönüştürme modülü ve prototip üretim olan kontrol ünitesi bağlantısıyla ultrasonik sensör verisi işleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada maksimum 10V değerinde bir analog sinyalin işlemcinin okuyabileceği 0-3.3V aralığına dönüştürülmesi ve mesafe ölçümü için ham verinin işlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Uygulanan test düzeneği ve veri yazılımının çıktısı Şekil 3.32'de görünmektedir.



Şekil 3.32. Harici Modül İle Ultrasonik Sensör Okuma

Kullanılan ultrasonik sensörün mesafe tespit aralığı 25cm ile 350cm arasındadır. Test düzeneği yaklaşık 45cm değerine kadar olan engeli görecektir. Harici dönüştürücü modülün çıkışta ürettiği gerilim yaklaşık 215mV değerinde olup 40-45cm mesafeye denk düştüğü Şekil 3.33 üzerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 3.33. Ultrasonik Sensörlerin Analog Sinyal ve Ölçüm Mesafesi Grafiği

3.3. Kontrol Yöntemleri

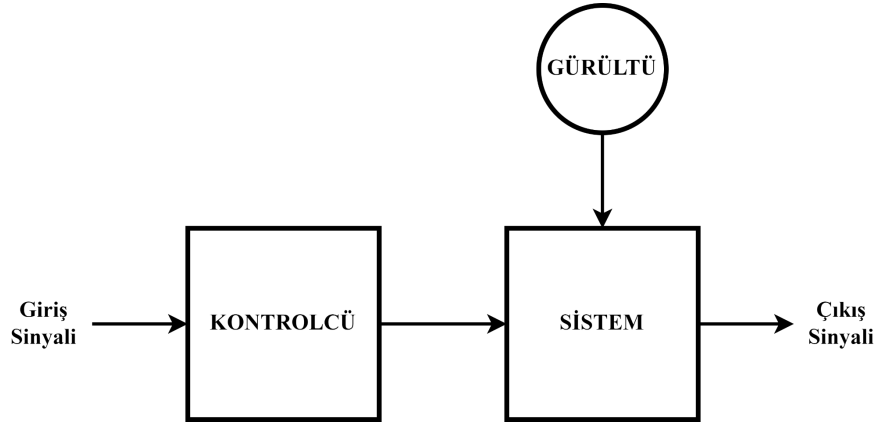
Kontrol yöntemleri, bir sistemi belirli bir davranışa göre kontrol etmek için kullanılan tekniklerdir. Kontrol yöntemleri, farklı tipte sistemler için farklı şekillerde tasarlanabilir ve uygulanabilir. Bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar ise kontrol teorisi bilim dalını oluşturmaktadır. Günümüzde bu bilim alanında geleneksel, modern ve dayanıklı kontrol teorisi sınıflarında çalışmalar yapılmaktadır (Ogata, 2010). Daha detaylı bir sınıflandırma gerekirse doğrusal, doğrusal olmayan, optimal, geri beslemeli ve adaptif kontrol teorileri örnek verilebilir.

Bir kontrolcü gözetiminde çalışan ilk sistem olarak hız kontrollü buhar makinesi verilebilmektedir. Otomatik hız tayini için James Watt tarafından santrifüj regülatörü kullanılmıştır. Günümüze kadar kontrol yöntemlerinin geliştirilmesinde pek çok çalışma yer almaktadır. Nicholas Minorsky ve ekibi gemi kontrolü için çalışmalar gerçekleştirmiştir (Nise, 2010). Nyquist daha kararlı kontrolcü sistemler için çalışmalar yapmış, Hazen pozisyon kontrolünde servolu mekanik yapıları bulmuştur. 1940'lı yıllarda PID kontrol kullanımı yoğunlaşmıştır ve Ziegler, Nichols isimleri bu kontrol yönteminde yer alan katsayıların belirlenmesinde daha nitelikli çözümler önermişlerdir. Evans ismi kök-yer eğrileri çalışması ile geleneksel kontrole büyük bir katkı yapmıştır (Nise, 2010).

Karmaşık yapılı modern sistemlerde çok sayıda denkleme gereksinim duyulmaktadır. Tek girişli-tek çıkışlı sistemlerde iş görebilen geleneksel kontrol teorisi, çok girişli-çok çıkışlı daha karmaşık denklemlere sahip sistemlerde zayıf kalmaktadır. Dijital sistemlerin geliştirilmesi ile birlikte modern kontrol teorisinde durum değişkenleri kullanılarak sentezleme ve zaman domeni analizleri yapılabilmektedir. 1960-1980 yılları arasında karmaşık sistemlerin öğrenmeli ve adaptif kontrolünün yeterli olmadığı noktalarda optimal kontrol üzerine de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1980-1990 yılları aralığında ise, modern kontrol teorisindeki gelişmeler dayanıklı (robust) kontrol üzerine olmuştur. Modern kontrol yönteminde tasarlanan model sistem ile gerçek sistem arasında zaman kararlı performans yetersizliği ortaya çıkabilmektedir. Bu durumun yaşanmaması için hata aralığının belirlenerek sistemin bu hata aralığında kalmasını sağlayacak kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrolcü sistemi kararlı tutmaktır. Bu tasarım yöntemi dayanıklı kontrol teorisi olarak bilinmektedir.

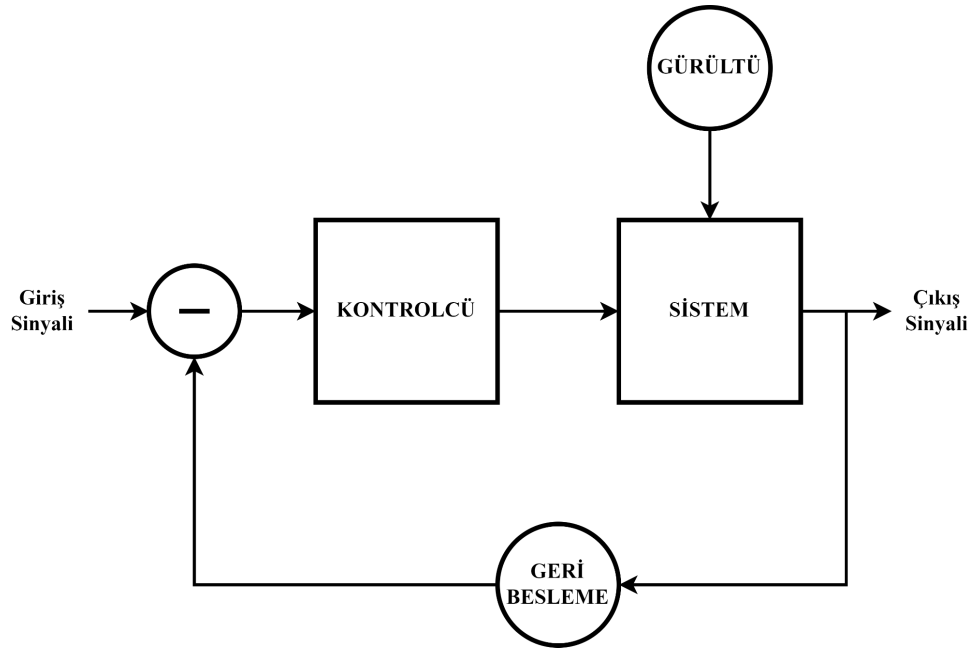
Frekans cevabı ve zaman domeni yaklaşımını içeren bu yöntem matematiksel anlamda karmaşıktır (Ogata, 2010).

Girişi ve çıkışı belirli, matematiksel modeli oluşturulabilen sistemler, açık çevrim veya kapalı çevrim kontrol yöntemleri ile kontrol edilebilmektedir. Açık çevrim kontrol, sistemdeki çıkış değerlerinin hedeflenen değerlerle karşılaştırıldığı ve kontrol edildiği bir sistemdir. Bu yaklaşımda, ölçülen çıkış değeri, hedeflenen çıkış değerinden farklı olduğunda, sistemde bir düzeltme yapılması gerektiği belirtilir. Bu düzeltme, açık bir şekilde belirtilen bir prosedürle yapılır. Açık çevrim kontrol, sistemdeki değişikliklerin takibi için idealdir, ancak dış etkilere karşı savunmasızdır. Aşağıdaki Şekil 3.34 üzerinde açık çevrim kontrolün blok diyagramı yer almaktadır.



Şekil 3.34. Açık Çevrim Kontrol

Kapalı çevrim kontrol, ölçülen çıkış değerlerinin geri besleme döngüsü aracılığıyla sistemin girişine aktarıldığı ve böylece sistem davranışının istenen hedefe doğru ayarlandığı bir sistemdir. Bu yaklaşımda, hedeflenen çıkış değeri ile ölçülen çıkış değeri arasındaki fark geri besleme döngüsü ile hesaplanır ve kontrol edilir. Örneğin, bir oda sıcaklığı kontrol sistemi, oda sıcaklığını ölçer ve termostat aracılığıyla ısıtma veya soğutma sisteminin etkinleştirilmesini sağlar. Kapalı çevrim kontrol, dış etkilere karşı daha dayanıklıdır, ancak sistemi yönetmek için daha karmaşık bir kontrol döngüsü gerektirir. Aşağıdaki Şekil 3.35 üzerinde kapalı çevrim kontrolün blok diyagramı gösterilmektedir.

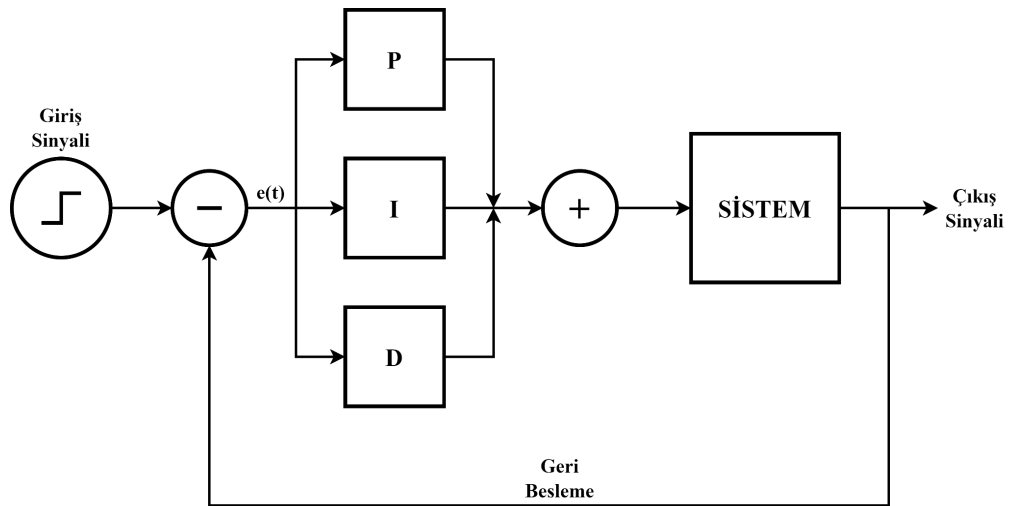


Şekil 3.35. Kapalı Çevrim Kontrol

3.3.1. PID Kontrol

Bu kontrol yöntemi adını Proportional (Oransal), Integral (Toplamsal) ve Derivative (Türevsel) kavramlarının baş harflerinden alan kapalı kontrol çeşitlerinden birisidir. Kontrol mekanizmasında sistemin çıkış verilerinin alındığı bir geri besleme mevcuttur. Geri besleme donanımsal olarak sensör veya enkoder gibi bir takipçi sistem olabilmektedir. Sistemin çıkışındaki bilgi sinyali PID yapısının girişine belirli aralıklarla uygulanarak genel yapının kapalı döngüde istenilen davranışı sergilemesi sağlanmaktadır.

Kontrol döngüsünde girdi olarak adlandırılan değer sistemin istenilen davranışıdır. Çıktı değerinin istenilen davranışa olan uzaklığı ise hatayı vermektedir. Hata ifadesinin sıfıra yaklaştırılması ile sistem kararlı hale gelebilmektedir (Ogata, 2010). PID kontrolün genel yapısı aşağıdaki Şekil 3.36 üzerinde bulunan diyagramda verilmektedir.



Şekil 3.36. PID Kontrol Diyagramı

PID ifadeleri hesaplanırken kullanılan denklem parametrelerinin anlamları şu şekildedir:

- K_p : Oransal Kazanç Sabiti
- K_i : İntegral Kazanç Sabiti
- K_d : Türevsel Kazanç Sabiti
- $e(t)$: Zamana Bağlı Hata değişimi
- T_i : İntegral Zaman Sabiti
- T_d : Türevsel Zaman Sabiti
- $u(t)$: Kontrol Değişkeni

Oransal İfade (P)

Oransal terim hatayı bir katsayı ile çarparak değerini küçültmeyi amaçlamaktadır. Tek başına kullanıldığında hatayı sabit bir değerde tutma eğilimi göstermekte olup hatayı minimize etmek için yetersiz kalabilmektedir. Denklem 3.1’de P ifadesinin hesaplanması yer almaktadır.

$$P = K_p * e(t) \quad (3.1)$$

Toplamsal İfade (I)

Toplamsal terim ile hatanın alanı hesaplanarak sistemin hata tecrübesi bulunabilmektedir. Süreç içerisinde ortaya çıkan toplam hata bir katsayı ile çarpılarak integral ifadesinin sistemin ürettiği çıkışa karşı tepki hızı ayarlanmaktadır. Bu katsayı

ile sistem cevabı hızı ters orantılıdır. Denklem 3.2 ile bu ifadenin zamana bağlı olarak hesaplanmasına yer verilmiştir.

$$I = K_p * \frac{1}{T_i} * \int e(t)dt \quad (3.2)$$

Türevsel İfade (D)

Toplamsal terim tek başına sistemin gelecekteki hatasını tahmin edememektedir. Ayar noktası (katsayı) değiştirildiğinde orantılı bir şekilde tepkisi değişmektedir. Türevsel terim ile birlikte gelecekteki hatanın tahmin edilmesi sağlanmaktadır. Anlık hata ve bir önceki hata arasındaki farkın türevi ile süreç içerisindeki hata değişimi gözlemlenmektedir. Türevsel terim bir katsayı ile çarpılarak sistemin tepki cevabı hızını artırarak daha kısa sürede kararlılık sağlayabilmektedir. Denklem 3.3'te yer alan parametreler ile D ifadesi hesaplanmaktadır.

$$D = K_p * T_d * de(t)/dt \quad (3.3)$$

P , I ve D ifadeleri belirlendikten sonra sistemin girişine uygulanacak sinyal hatayı en aza indirecek şekilde sağlanmış olmaktadır. PID kontrolörün zaman domenindeki gösterimi Denklem 3.4'deki gibidir.

$$u(t) = K_p * [e(t) + T_d * \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt] \quad (3.4)$$

PID katsayılarından K_d sıfır belirlendiğinde PI kontrol, K_i sıfır belirlendiğinde ise PD kontrol üretilebilmektedir. Ayrıca PID parametrelerinin ayarlanmasında Ziegler Nichols, Bulanık Mantık, Kök-Yer Eğrisi ve Bode Çizimi, Bulanık Mantık, PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu), Genetik Algoritma, ve yapay zekâ yöntemleri kullanılmaktadır.

3.3.2. Doğrusal Karesel Kontrol

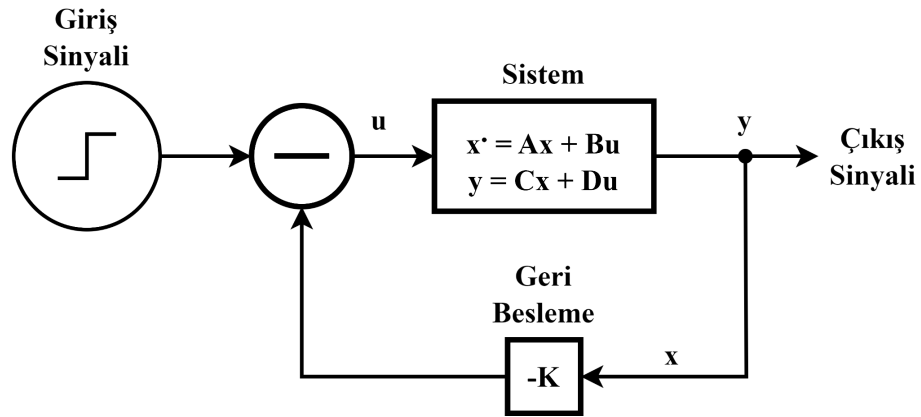
Kapalı kontrol yöntemlerinden birisi de LQR kontrolüdür. Bu kontrol yöntemi önceden belirlenmiş bir maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle bir sistem davranışının optimize edilmesine dayanmaktadır. LQR kontrol, sistemin kontrol edilen çıkış değişkenlerini önceden belirlenmiş bir referans değerine yaklaştırmak için geri besleme sağlamaktadır [Ogata, 2010]. Genellikle uçak veya roket yakıtlarının tasarruflu kullanılması gibi optimum performans gerektiren uygulamalarda karşımıza çıkmakta, lineer sistemlerin stabilizasyonu, takibi ve hassasiyeti gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

LQR kontrol yöntemi, kontrol edilen sistemin matematiksel modeli ve sistemin performansını belirleyen maliyet fonksiyonunun matematiksel ifadesi kullanılarak hesaplanır. Bu maliyet fonksiyonu, kontrol edilen sistemin hedeflenen performansı ile ilgili bir dizi kriteri tanımlar. LQR, maliyet fonksiyonunu minimize eden geri besleme denetleyicisini hesaplamak için matris hesabı kullanır.

Bu tür optimal kontrol yöntemleri lineer sistemlerin matematiksel modellerinin bilinmesi durumunda oldukça etkili bir kontrol stratejileri olabilmektedir. Ancak, gerçek dünya sistemlerinde lineer olmayan davranışlar gösteren sistemler için LQR kontrolü daha zorlu hale gelebilmektedir [Ogata, 2010].

Şekil 3.37. üzerinde LQR kontrolün temel blok gösterimi yer almaktadır. Bu gösterimde yer alan ifadelerin anlamları şunlardır:

- x : Durum değişkenleri vektörüdür ve sistemin geçmiş durumlarına ve şu anki durumu hakkında bilgi vermektedir.
- u : Kontrol edilen sisteme uygulanan giriş değişkenlerini ifade eden vektördür.
- y : Kontrol edilen sistemin çıkışları hakkında bilgi veren vektördür.
- K : Geri besleme kazanç matrisidir.
- A : Durum uzayı matrisi, sistemin dinamiğini açıklayan matristir.
- B : Kontrol sinyallerinin sisteme nasıl uygulandığını tanımlayan matristir.
- C : Sistemin ölçülebilir çıkış değişkenlerini belirleyen matristir
- D : Kontrol sinyalleri ile çıkış değişkenleri arasındaki doğrudan etkileşimi belirleyen matristir.



Şekil 3.37. LQR Kontrol Diyagramı

LQR kontrol yöntemi ile denetimi gerçekleştirilecek sistemin istenilen davranışı sergilemesi için kontrol akışı boyunca belirli kontrol kazanç parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametreler tıpkı PID kontroldeki K_p , K_i ve K_d gibi her biri farklı bir etkiye sahip kazanç ifadeleridir. Q ve R katsayıları olarak da isimlendirilen kazanç ifadeleri LQR kontrol stratejisinin eki ağırlığı için hesaplanması gereken iki katsayıdır.

Q matrisi, kontrol edilen sistemin çıkış değişkenlerine ve durum değişkenlerine ilişkin hedeflenen performans ölçütlerini içeren bir ağırlık matrisidir. Bu matris, kontrol edilen sistemin nasıl davranması gerektiği hakkında bir takım önceden belirlenmiş kriterleri ifade eder. Örneğin, Q matrisi, sistemin belirli bir çıkış değişkenine daha fazla veya daha az hassasiyet göstermesini sağlayabilir.

R matrisi ise, kontrol sinyalindeki değişkenlere ilişkin hedeflenen performans ölçütlerini içeren bir ağırlık matrisidir. R matrisi, kontrol sinyalindeki değişkenlerin optimize edilmesinde kullanılır ve kontrol edilen sistemin davranışını etkileyebilir. Q ve R matrisleri, LQR kontrol stratejisi için en uygun matrislerin hesaplanması için belirlenmelidir. Bu hesaplama, kontrol edilen sistemin matematiksel modeli, performans ölçütleri ve istenilen çıkış değişkenleri ile kontrol sinyalleri gibi faktörlere dayanmaktadır.

LQR kontrol stratejisi, bir performans ölçütü veya maliyet fonksiyonu minimize edilerek durum uzayı geri beslemesi kullanarak bir sistemin performansını optimize etmeyi amaçlar. Bu maliyet fonksiyonu aşağıdaki Denklem 3.5'te görünmektedir.

$$J = \int_0^{\infty} (X^T * Qx + U^T * Ru)dt \quad (3.5)$$

$$u = -K * x \quad (3.6)$$

Denklem 3.5'te yer alan maliyet fonksiyonu, kontrol edilen sistemin enerji tüketimini ve kontrol sinyallerinin maliyetini içermektedir. LQR kontrol stratejisi, bu maliyet fonksiyonunu minimize ederek, sistemin istenen davranışını elde etmeyi amaçlar.

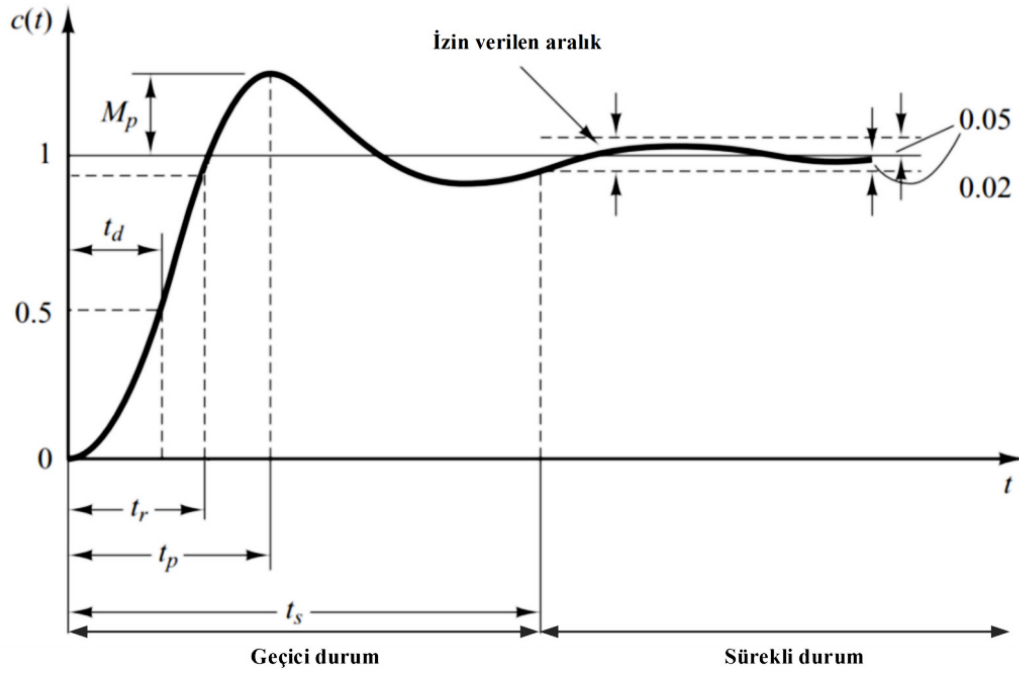
LQR kontrol stratejisi için en uygun geri besleme kontrolü, maliyet fonksiyonunu minimize eden K matrisi kullanılarak hesaplanır. K matrisi, durum değişkenlerinin ve kontrol girişlerinin bir lineer kombinasyonunu ifade eder ve bu kombinasyon, kontrol edilen sistemin istenen davranışını elde etmek için en iyi geri besleme kontrolünü sağlamaktadır.

3.3.3. Kontrol Yöntemlerinin Performans Değerlendirmeleri

Kontrol yöntemlerinde özellikle geri beslemeli kontrol sistemlerinde, kontrolör ve sistem cevabı için performans karşılaştırmaları yapılırken hata performans kriterlerinden yararlanılır. Şekil 3.38'de kapalı çevrim ikinci dereceden bir sistemin birim basamak cevap eğrisi verilmiştir.

Buna göre sistemin performansını etkileyen geçici ve sürekli durum olmak üzere iki hata süreci vardır. Şekil 3.38'de t_r yükselme zamanını, t_p tepe zamanını, t_s yerleşme zamanını, M_p maksimum aşım miktarı (%), t_d gecikme zamanını gösteren performans parametrelerini ifade etmektedir.

Yükselme zamanı kontrol yöntemlerinde yaygınca referans değerinin %90'ına kadar geçen süreyi, yerleşme zamanı ise ulaşılması hedeflenen değerinin %2-%5'lik tolerans değerine gelinceye kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Bu yerleşme süresi dâhilinde sistemin cevabı geçici durumu belirtirken, bu sürenin sonrası ise sistemin sürekli durumunu veya hatasını ifade etmektedir (Ogata, 2010).



Şekil 3.38. Birim Basamak Cevap Eğrisi (Dursun, 2016)

Sistem performansını ölçmek ve kıyaslamak amacıyla uluslararası hata kriterleri ifadeleri de bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında da kontrol donanımının simülasyon ve gerçek zamanlı sistem çalışmalarında üç farklı hata kriteri açısından değerlendirmelerde bulunmaktadır. Bunlar ISE (Toplam Karesel Hata), IAE (Toplam Mutlak Hata), ITAE (Toplam Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata) kriterleridir ve hesaplamalarında sırasıyla 3.7, 3.8 ve 3.9 denklemleri kullanılmaktadır.

$$ISE = \int e^2 dt \quad (3.7)$$

$$IAE = \int |e| dt \quad (3.8)$$

$$ITAE = \int t \cdot |e| dt \quad (3.9)$$

PID kontrol yöntemi gözetimindeki sistemler eğer doğrusal, zamanla çok değişmeyen ve modelleme oranı yüksek ise denetim sistemi uyumlu çalışabilmektedir. Ancak bu kriterlerin dışında kalan yapılarda ek kontrolcülerden faydalanılabilir veya uyumlama çalışmaları referansında adaptif PID kullanılabilir.

Örneğin bir dc motorun hız kontrolü gibi uygulamalarda, motorun konumlandığı ortama bağlı olarak meydana gelecek olan parametrik değişimler, bozucu etkiler ve yüklenme durumundaki değişikliklerden PID kontrolörler negatif etkilenmektedir ve kullanımı kısıtlanmaktadır. Daha iyi bir kontrol akışının sağlanması için sistemin iyi modellenmiş olması ve bu modelleme üzerinde farklı kontrol yöntemlerinin deneysel olarak işletilmesi gerekmektedir (Nouri ve ark., 2008).

Bu tez çalışmasında da kontrol donanımında kullanılan kontrol yöntemleri belirtilen performans kriterleri bazında değerlendirilmiştir. Bu performans analizleri iki aşamalı olacak şekilde simülasyon tasarımı ve gerçek sistem tasarımı olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Öncelikle simülasyonda benzer sistem tasarımı yapılarak bu sistem üzerinde P, PI, PD, PID ve LQR kontrol yöntemleri sırasıyla test edilmiştir. Ortaya çıkan analizler ilerideki başlıklarda detaylı bir şekilde paylaşılmıştır. Simülasyon analizlerinden sonra aynı ortam şartları ve kazanç parametreleri üzerinden gerçek sistemde test işlemleri gerçekleştirilmiş, en ideal yöntem karşılaştırmalar ile paylaşılmıştır.

Performans analizleri ve farklı yöntemler arası karşılaştırmalar birim basamak grafiğinde yer alan ifadeler ve global hata değerleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

4. KONTROL ÜNİTESİNİN UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu bölümde tasarlanan kontrol donanımının uygulama testlerine yer verilmektedir. Kullanılacağı robotik sistemin yapısı hakkında bilgiler aktarılmış, bu sisteme entegrasyonu gerçekleştirilmiş ve seçilen kontrol yöntemleri bazında test edilmiştir.

4.1. Çalışma Testlerinin Gerçekleştirildiği Robotik Sistem

Tez çalışması kapsamında ortaya çıkan kontrol donanımının gerçek bir sistemde test edilmesi hedef noktalardan birisini oluşturmaktadır. Bu bağlamda deney platformu olarak Elfa Şirketler Grubuna bağlı Sairus firmasında geliştirilen AKİBA insansız yük taşıma robotu kullanılmıştır. Bin beş yüz kiloya kadar yük taşıyabilen aracın iki adet kontrol edilebilir fırçasız dc motorlu tekerleği bulunmaktadır. Aracın içerisinde bulunan kontrol panosuna kontrol ünitesi montajlanarak gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra gömülü yazılım destekli çalışmalara başlanmıştır.



Şekil 4.1. AKİBA Otonom Mobil Kara Robotu

4.1.1. Robotik Sistemin Matematiksel Modelinin Oluşturulması

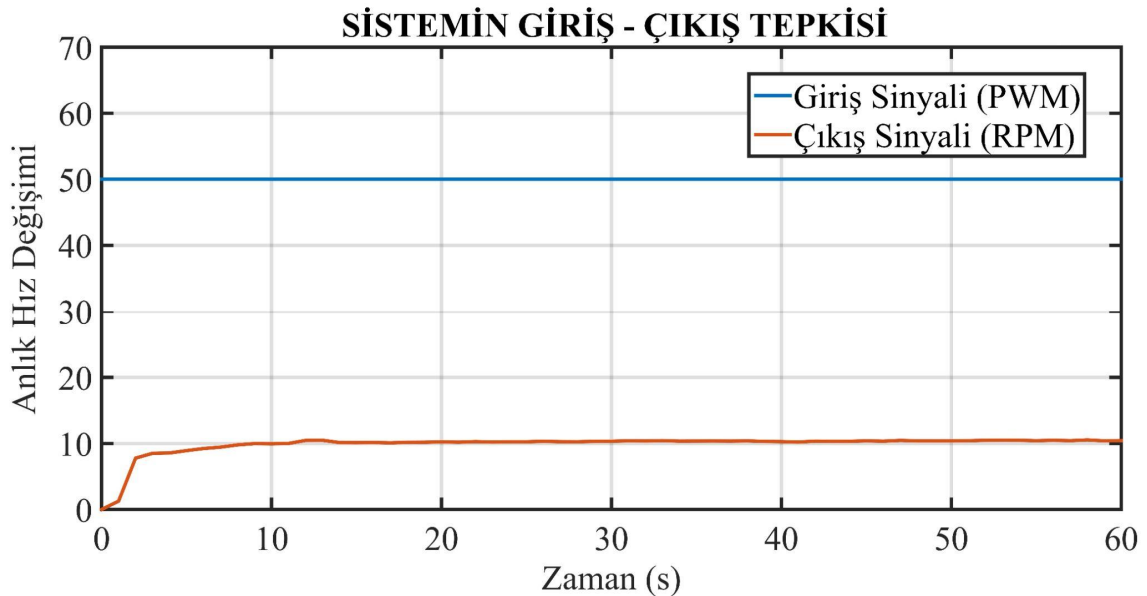
Bir sistemin ölçülebilir fiziksel özelliklerini matematiksel ifadeler ile tanımlamaya matematiksel modelleme denilmektedir. Genellikle birden fazla değişkene bağlı fonksiyon veya fonksiyon kümelerinden oluşmaktadır.

Tezin bu bölümünde matematiksel modeli belirsiz olan AKİBA'nın sistem tanımlama çalışması ile transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu model üzerinden farklı kontrol yöntemleri denenmiştir. Buradaki problem aracın tüm mekanik ve elektromekanik fiziksel özelliklerinin bilinmemesinden kaynaklı net bir fonksiyonun oluşturulamamasıdır.

Problemi aşmak adına MATLAB içerisinde yer alan sistem tanımlama araçlarından faydalanarak transfer fonksiyonunun benzeşim oranını artırma çalışması gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle araca sabit bir değerde PWM sinyali uygulanarak araç motorlarının miline bağlı enkoderlerden alınan bilgiler ile her bir tekerleğin hızı RPM (Dakikadaki Tur Sayısı) cinsinden belirlenmektedir. Bu işlem yapılırken sisteme etki eden hiçbir geri beslemeli kontrolcü eklenmemiştir. Çünkü sistem tanımlama çalışmalarında ilk etapta transfer fonksiyonunu en yüksek oranda bulabilmek adına aracın ham tepkilerine ihtiyaç vardır.

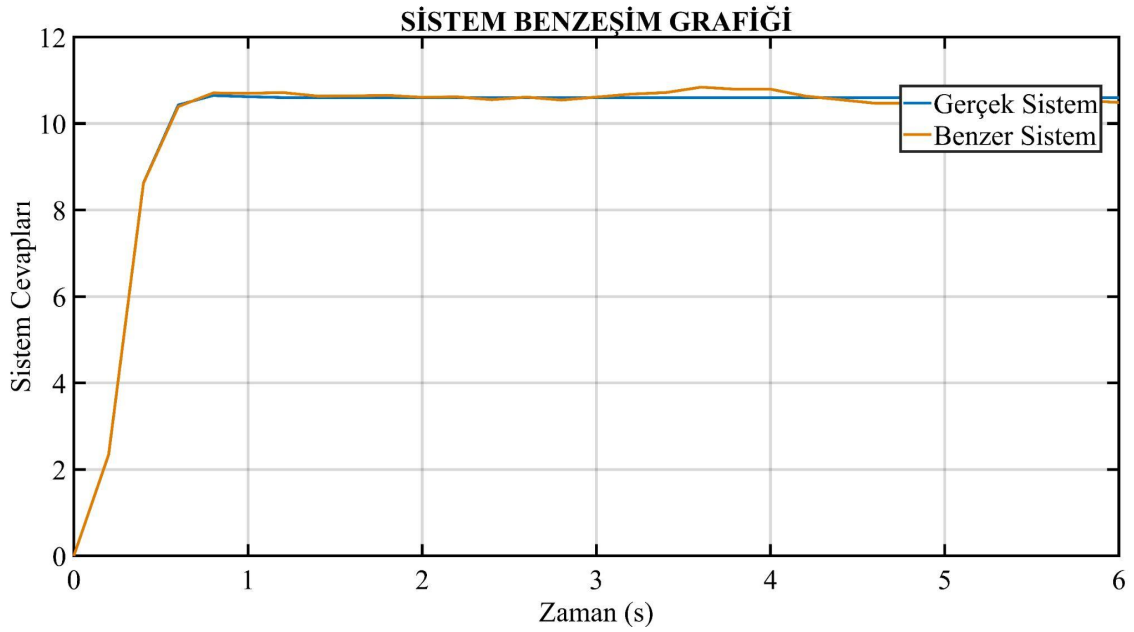
Veriler toplandıktan sonra elde edilen bu giriş-çıkış verileri sistem tanımlama aracına aktararak bir grafik oluşturulmuştur. Grafik üzerinden yapılan ayarlamalar ile transfer fonksiyonu belirli bir benzeşim oranında ortaya çıkmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.2 üzerinde sistem tanımlama işlemi için alınan giriş ve çıkış değerleri görünmektedir.



Şekil 4.2. Araçtan Toplanan Giriş ve Çıkış Verileri

Aracın motorlarına uygulanan %10 oranında PWM sinyali sonucu herhangi bir kontrol yöntemi uygulanmadan yaklaşık 12 RPM hız değeri alındığı bilinmektedir. Bu

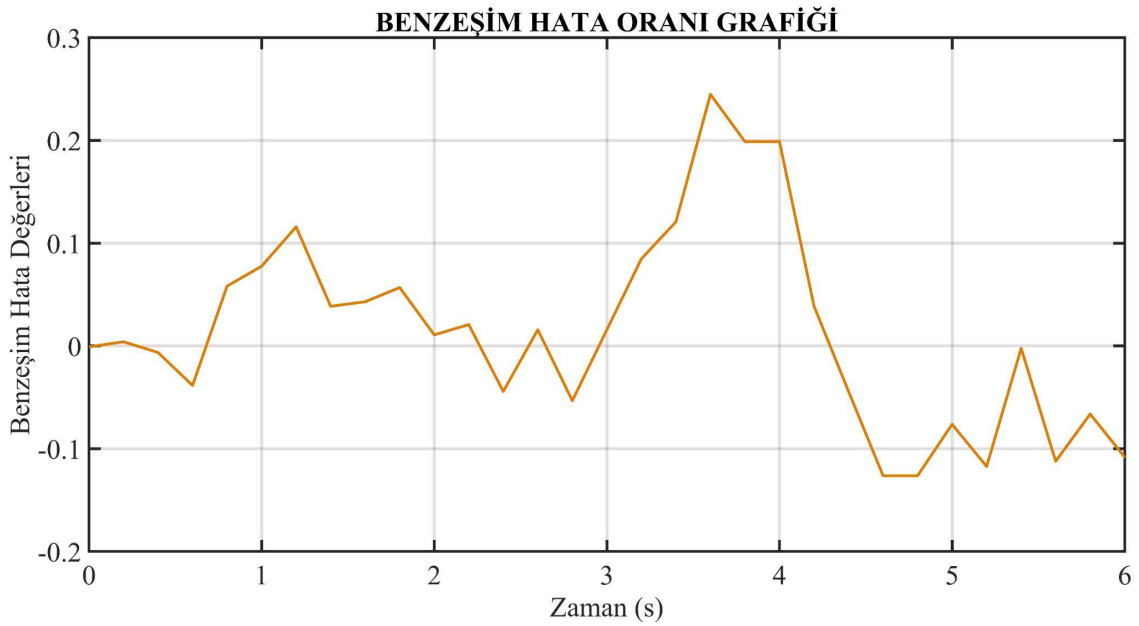
değerler referansında sistem tanımlama işlemi gerçekleştirildiğinde Şekil 4.3'te bulunan yakınsama ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.3. Sistem Tanımlama İşlemleri Sonucu

Yukarıdaki grafik üzerinde de görüldüğü üzere benzer sistemin sonucu gerçek sistemle birebir aynı olmamaktadır. Bunun sebebi olarak aracın tüm dinamiğinin ve her koşulda vereceği tepkilerin bilinmemesidir. Yine de belirli bir oranda yaklaşım sağlanarak tüm değişkenleri bilinmese bile aracın hassas kontrol mekanizmasını tasarlamak adına yardımcı olacaktır.

Şekil 4.4 üzerinde görüntülenen grafikte yakınsamanın gerçek sisteme benzeşim oranı hatası görünmektedir. Benzeşim oranının % 95.23 olarak hesaplandığı göz önüne alındığında hata seviyesi kabul edilebilir değerdedir.



Şekil 4.4. Benzeşim Hata Oranı Çıktısı

Elde edilen benzer sistem parametrelerine bakıldığında sistem kutup sayısı (P) 4, sıfır sayısı (Z) 1, oturmuş sistem hatası (FPE) 0.009031 ve ortalama hata (MSE) 0.006451 değerlerinde hesaplanmıştır. Bu değerler ışığında sistem tanımlama aracı ile hesaplanan transfer fonksiyonu aşağıdaki Denklem 4.1'deki gibidir.

$$TF = \frac{14.69}{s^2 + 14.32s + 69.35} \quad (4.1)$$

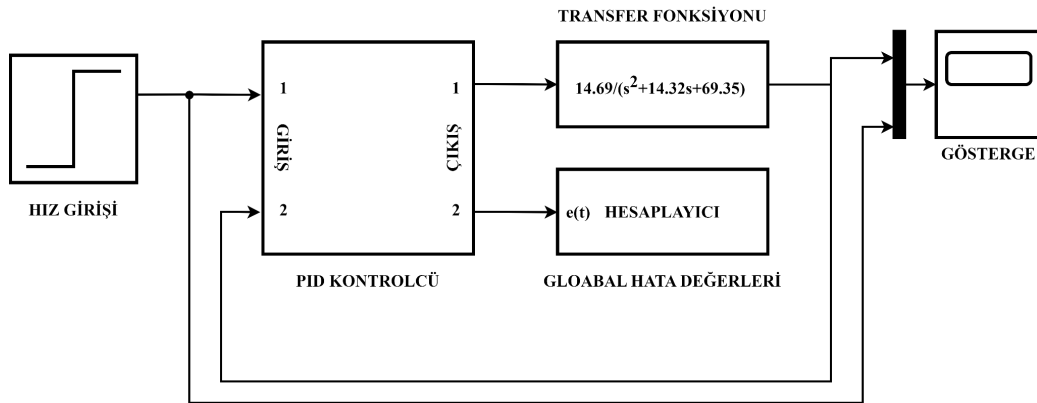
Belirlenen transfer fonksiyonu gerçek sistemi tanımlamak için belirlenmiş en yakın matematiksel modellemedir. Bu ifade üzerinden yapay sisteme kontrol teorisi uygulanarak farklı şartlarda ve yöntemlerde ortaya çıkan hata değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma çalışmaları hem simülasyon ortamında hem de simülasyonun çıkardığı kazanç katsayılarının gerçek zamanlı uygulanması aşamalarından oluşmaktadır. Neticede tez kapsamında tasarlanan kontrol ünitesine farklı türlerde kontrolcüler yazılımsal olarak aktarılarak hem donanımın hem de kontrolcü denetiminin performansları incelenmiştir.

4.1.2. Simülasyon Analizleri İçin Yapılan Tasarım

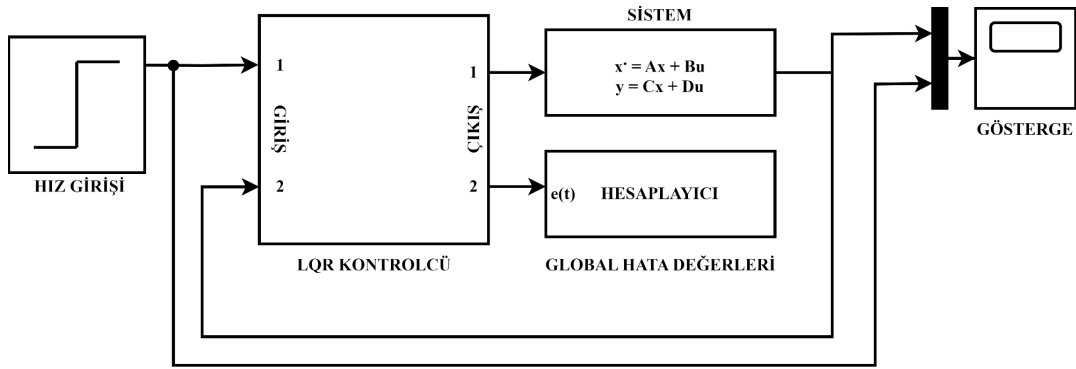
Aracın transfer fonksiyonu hesaplandıktan sonra simülasyon ortamında bu matematiksel modelleme kullanılarak P, PD, PI, PID ve LQR kontrolcileri ile hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan hata kriterleri ve birim basamak cevap parametreleri üzerinden performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

Öncelikle PID temelli kontrol tipleri üzerinden testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde kullanılan ve simülasyon için hazırlanan blok tasarım aşağıdaki Şekil 4.5 üzerinde paylaşılmaktadır. PID uygulamaları gerçekleştirildikten sonra LQR kontrole uygun bir simülasyon tasarımı gerçekleştirilerek test işlemine devam edilmiştir. LQR kontrol tasarımı Şekil 4.6’da gösterilmektedir.

Bu tasarımlarda RPM cinsinden istenilen hız girişi verilmekte ve aracın transfer fonksiyonu ile oluşturulduğu matematiksel modellemeye kontrolcü bloğunda bahsedilen kontrolcü tipleri uygulanmaktadır. Uygulanan kontrolcülerin performansları global hata değerleri bloğunda hesaplanmaktadır. Son olarak göstergede grafiksel çıktılar elde edilmektedir.



Şekil 4.5. PID Temelli Tümlleşik Sistem

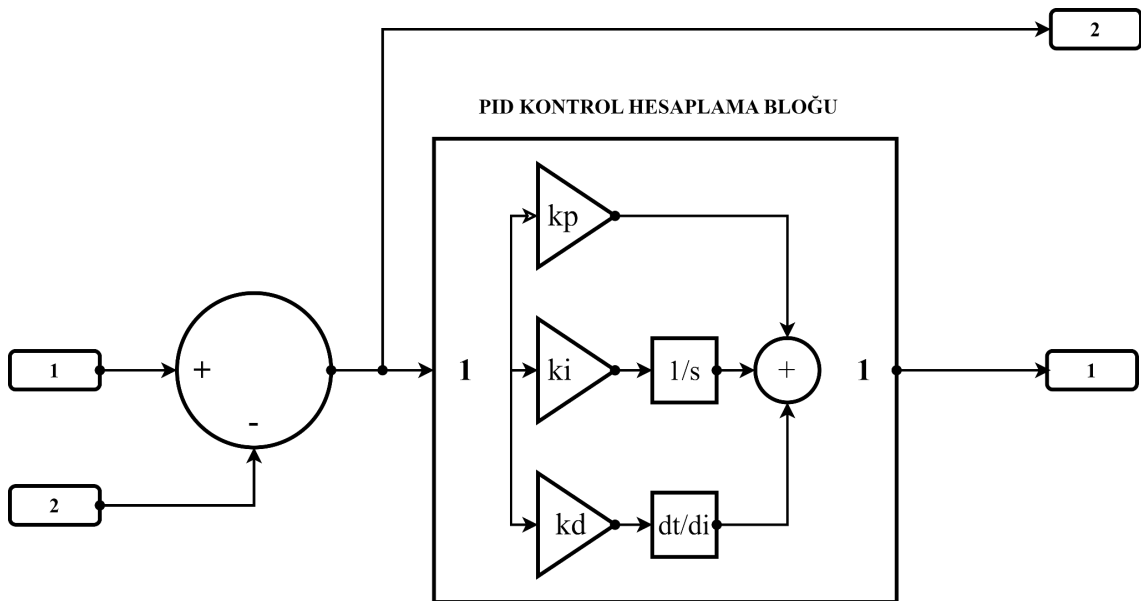


Şekil 4.6. LQR Temelli Tümlleşik Sistem

Tümlleşik sistemi oluşturan blokların iç detayları şu şekildedir:

PID Kontrolcü

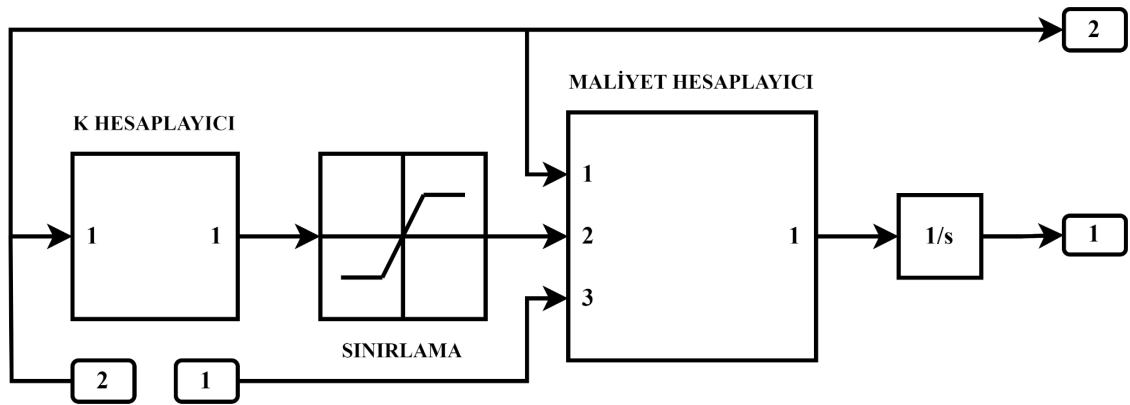
Bu blok içerisinde PID kontrolcünün kazanç değerleri el ile veya tuning ile belirlenmektedir. Kazanç değerlerinin (K_p, K_i, K_d) pasif veya aktif bırakılması ile bloğun P, PI, PD veya PID kontrolcüye dönüşmesi sağlanmaktadır. İç yapısı Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. PID Kontrolcü Bloğu İç Yapısı

LQR Kontrolcü

Bu blok içerisinde LQR kontrol hesaplamalarının yapıldığı yardımcı birimler yer almaktadır. K hesaplayıcısı geri besleme değerinin hesaplanarak maliyet fonksiyonuna katıldığı birimdir. Sınırlama ifadesi ile sistemin RPM cinsinden hızı sınırlanarak LQR çıktısının aşırı tepkileri sönmülmüş olur. Maliyet hesaplayıcı biriminde ise durum fonksiyonuna etki edecek hız miktarının hesaplamaları yer almaktadır. İç yapısı Şekil 4.8’de verilmiştir.



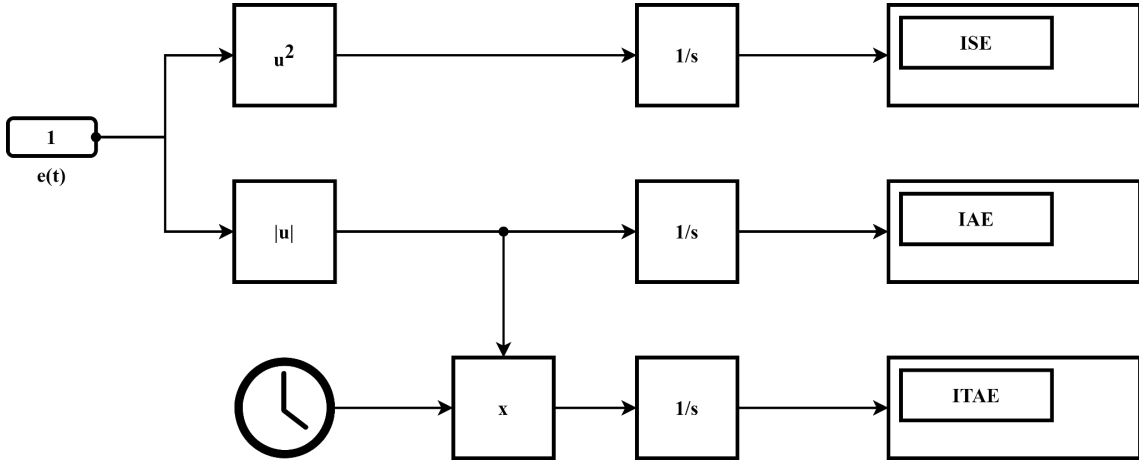
Şekil 4.8. LQR Kontrolcü Bloğu İç Yapısı

Sistem Bloğu

LQR kontrolün simülasyon düzeninde insansız kara aracının durum uzay fonksiyonunu oluşturmaktadır.

Global Hata Değerleri Hesaplayıcı

Bu yapıda farklı türlerdeki kontrolcülerin sistem üzerindeki etkilerini görmek için kontrol bilim dalında kabul almış performans değerlendirmek için kullanılan hata parametreleri hesaplanmaktadır. Tasarım aşağıdaki Şekil 4.9 üzerinde görünmektedir.



Şekil 4.9. Global Hata Değerleri Bloğu İç Yapısı

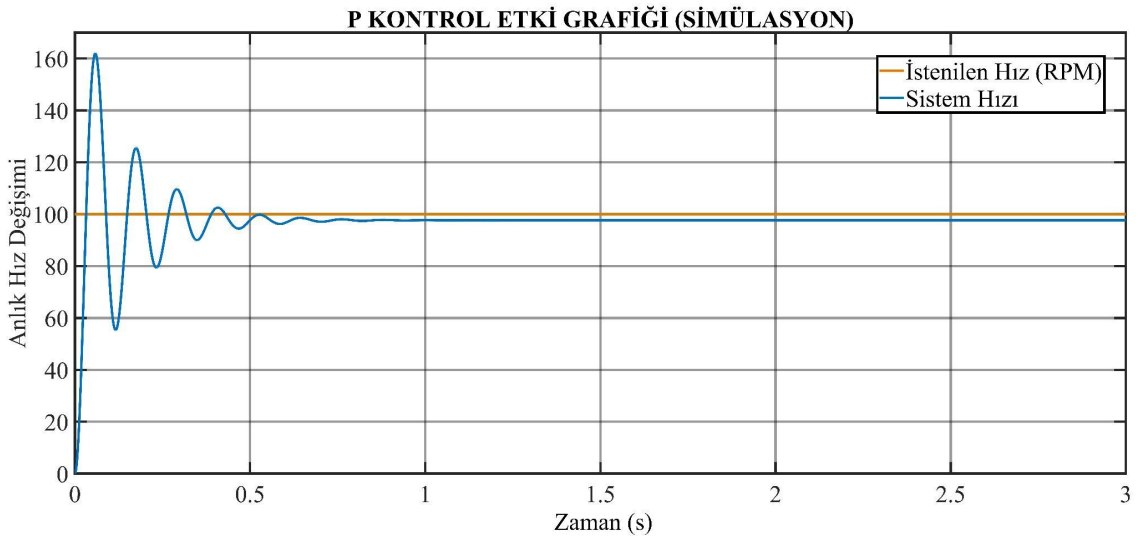
MATLAB Simulink ile gerçekleştirilen sistem tasarımı aracın bir denetim mekanizmasının etkisi altında RPM cinsinden anlık hız değerlerini gösterecektir. Aracın istenilen hıza ne kadar sürede ulaştığı ve sürekli olarak bu hız değerinde hangi kontrol cevabı parametreleri ile kaldığını analiz etme imkanı sunacaktır.

4.1.3. Simülasyon Analizleri

Tezin bu bölümünde önceki başlıklarda açıklanan tasarlanmış simülasyon sistemi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aracın transfer fonksiyonunu hesaplama sürecinde yüksüz durumda örnekler alındığı için kontrolcü performansı değerlendirme işleyişi de yüksüz, 100 ms döngü süresinde ve 100 RPM istenen hız girişinde gerçekleştirilmiştir.

MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon sisteminde ilk olarak sadece P ifadesinin denetiminde olan bir kontrol akışı oluşturulmuştur. P tipi kontrol olarak da isimlendirilen kontrolcünün aracın matematiksel modeline etki etmesi Şekil 4.10 üzerinde yer alan grafik gibidir.

- P kontrol kazanç katsayıları: $K_p : 19499.68$, $K_i : 0$, $K_d : 0$, $N : 0$



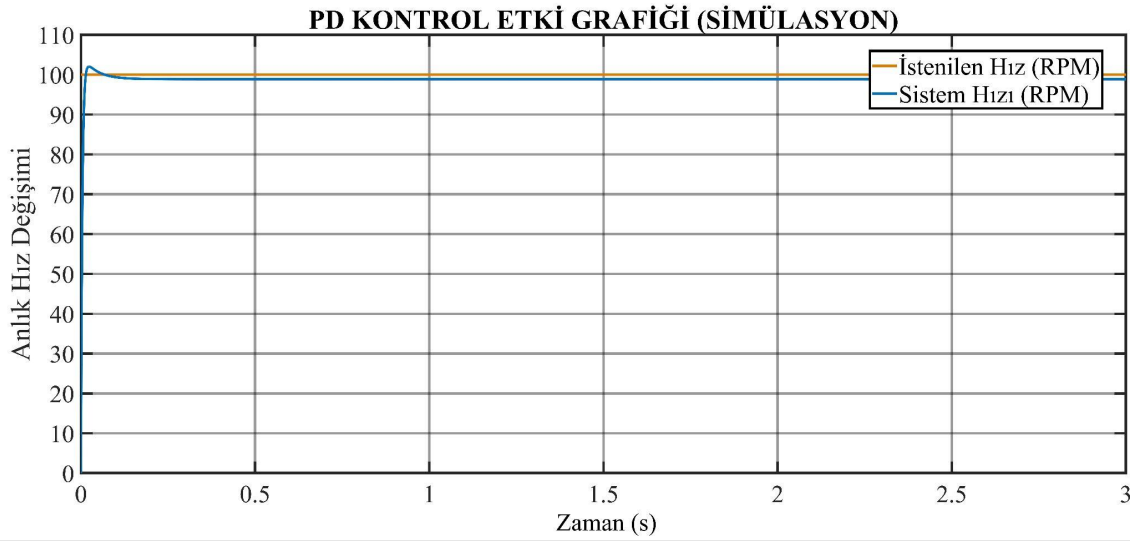
Şekil 4.10. P Tipi Kontrolör İle Aracın Hız Değişimi

P tipi kontrolde K_p kazanç ifadesi sistem tuning edilerek hesaplanmıştır. En iyi sonucu veren değer seçilerek sistem denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu hali ile P tipi kontrolcünün aracın hareket kontrolü için yetersiz olduğu görünmektedir.

Yerleşme zamanı yaklaşık bir saniye süren denetimli sistemde ilk anda oluşan osilasyon çok fazladır ve yaklaşık %65 civarındadır. Ek olarak P tipi kontrolde istenilen hız değerinin biraz altında anlık hız değeri oluşmaktadır ve bu durumda sürekli durum hatası 0 olmamaktadır.

P tipi kontrol testi yapıldıktan sonra sırada PD tipi kontrolün denetimi incelenmiştir. Sistem girişine yine 100 RPM hız sinyali uygulanarak tepkisi analiz edilmiştir. Sonuç Şekil 4.11’de yer almaktadır.

- PD kontrol kazanç katsayıları: K_p : 1202.205, K_i : 0, K_d : 16.30, N : 3334.86

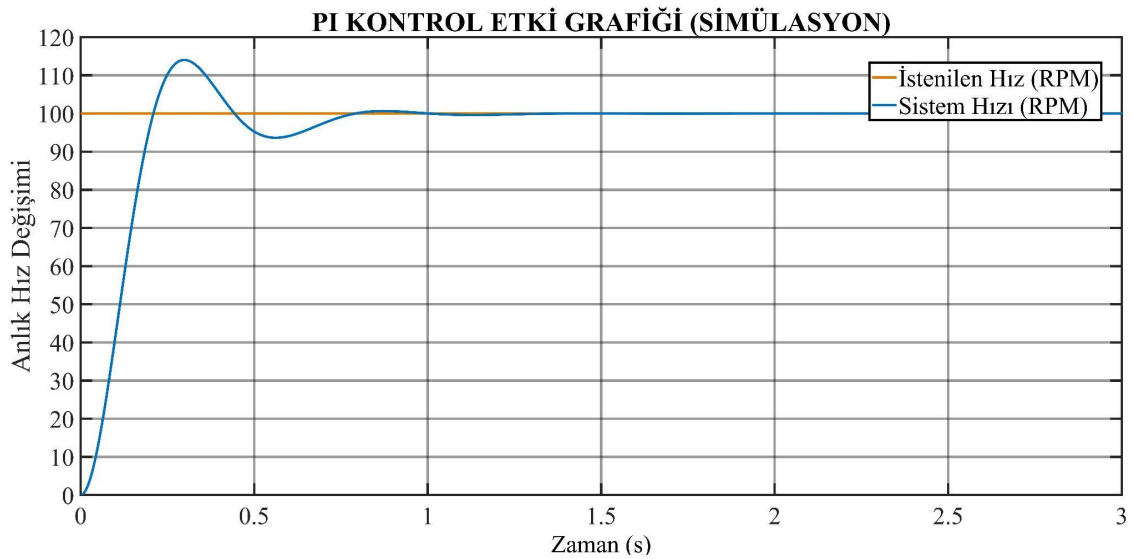


Şekil 4.11. PD Tipi Kontrolör İle Aracın Hız Değişimi

PD tip kontrolcü için I ifadesi etkisiz kalacak şekilde bir tuning operasyonu yapılarak gerekli kazanç ifadeleri hesaplanmıştır. Bu ifadeler sisteme uygulandığında P kontrolcüyü göre çok daha sakin ancak yine de istenilen sürekli durum hatası değerinde olmayan bir yapı görünmektedir.

Sıradaki incelenecek kontrolcü tipi PI kontrolüdür. Bu kontrol tipi sisteme uygulanırken 100 RPM giriş hızında tepkiler analiz edilmiştir. Bu tepki eğrisi Şekil 4.12 üzerinde verilmektedir.

- PI kontrol kazanç katsayıları: K_p : 19.18, K_i : 96.97, K_d : 0, N : 0

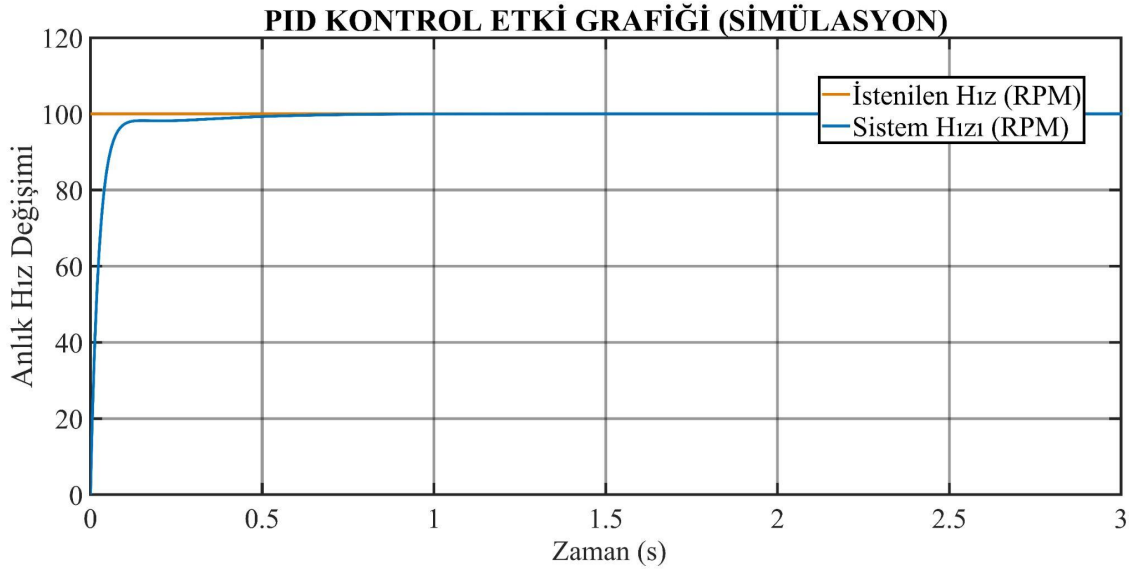


Şekil 4.12. PI Tipi Kontrolör İle Aracın Hız Değişimi

PI tipte bir kontrolcü için bu sefer D ifadesi etkisiz bırakılmaktadır. Kontrolcünün kazanç katsayıları yine tuning ile en uygunu bulunacak şekilde hesaplanmıştır. Neticede PI kontrolcüsünün sürekli durum hatasının 0 olduğu ancak yerleşme süresinin daha uzun sürdüğü görünmektedir. Ayrıca referans hız eğrisini aşım miktarının yaklaşık %10 olduğu, bu değer pratik uygulama için tolerans aralığı dışında kaldığı söylenebilir.

Son olarak PID tip kontrolcü ile sistem denetimi sağlanmıştır. Diğer kontrolcülerin bulunduğu simülasyon ortam şartları gibi bu kontrolcü için de aynı hız girdisi ve döngü süresi şartı sağlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çıktılar aşağıdaki Şekil 4.13. üzerinde gösterilmektedir.

- PID kontrol kazanç katsayıları: K_p : 30.17, K_i : 142.6, K_d : 1.59, N : 2897.744



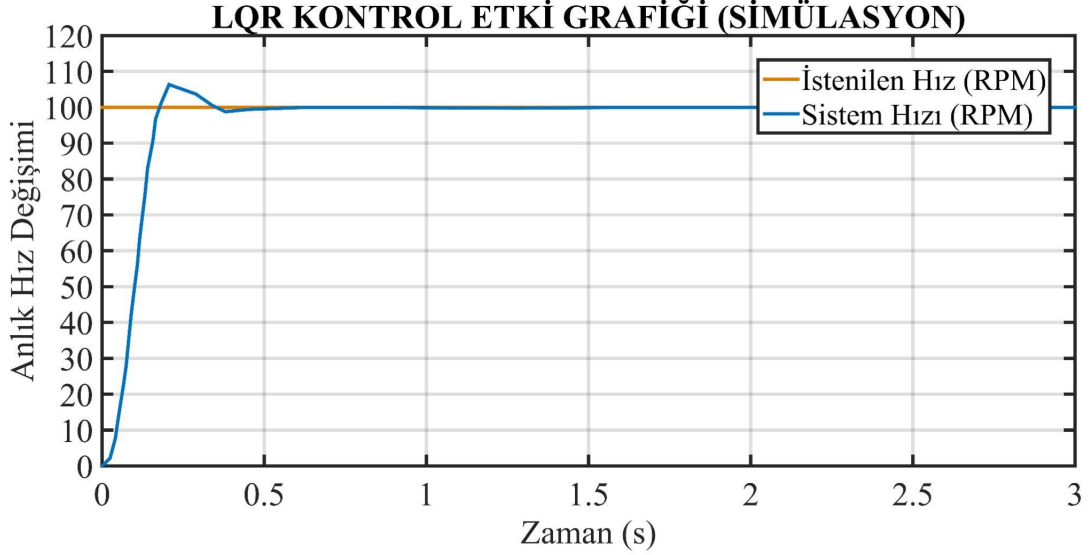
Şekil 4.13. PID Tipi Kontrolör İle Aracın Hız Değişimi

PID kontrolcüsü etkisi altındaki sistemin cevabına bakıldığında referans hız eğrisine en ideal oturma hızının bu tip kontrolcüde sağlandığı görünmektedir. Aşım değeri ve sürekli durum hatası sıfır olan sistem cevabında yerleşim süresi yaklaşık 0.6 saniye olmaktadır.

PID temelinde gerçekleştirilen farklı tipteki kontrol uygulamalarından sonra araç sisteminin optimal kontrol ile nasıl bir tepki vereceğini deneysel anlamda tespit etmek amacıyla bu kontrol türünün bir alt üyesi olan LQR yöntemi ile simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Aynı simülasyon şartları uygulanarak PID kontrole ile performans

karşılaştırılması yapılmıştır. Test çıktısı Şekil 4.14 üzerinde yer alan grafikte görülmektedir.

- LQR kontrol kazanç katsayıları: $Q: 1.0e + 10$, $R: 100$



Şekil 4.14. LQR Tipi Kontrolör İle Aracın Hız Değişimi

Analizde kullanılan maliyet fonksiyonunun kazanç katsayıları en uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Grafiğe bakıldığında sistem cevabının oturma hızının PID kontrole göre biraz daha yavaş kaldığı söylenebilir. Ayrıca aşımın yaklaşık %7 gibi bir değer ile uygun aralığın biraz üstünde olduğu tespit edilmiştir.

Tüm kontrolcüler analiz edildiğinde global hata hesaplama bloğundan ve tuning parametrelerinden alınan değerlere bakıldığında aracın simülasyon modelini en iyi kontrol eden denetim mekanizmasının PID olduğu görünmektedir. Tüm analiz sonuçları Çizelge 4.1 ile paylaşılmaktadır.

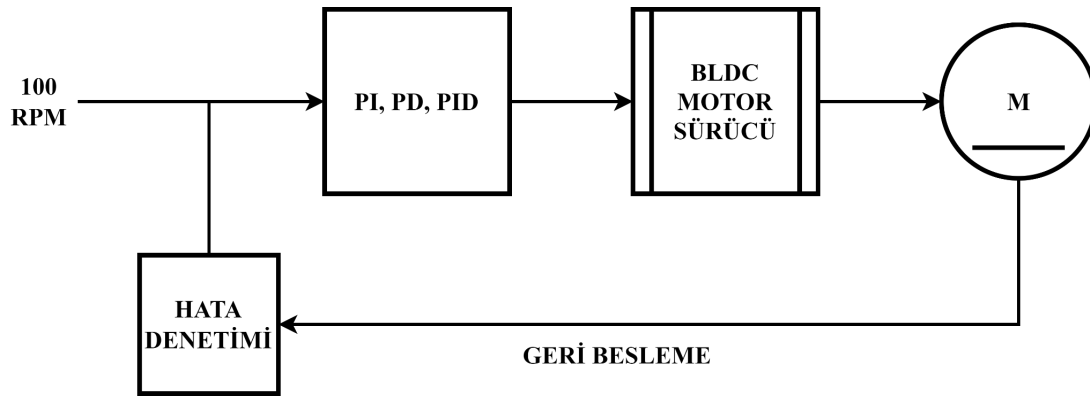
Çizelge 4.1. Kontrolcülerin Simülasyonda Global Hata Performansları

Değerler	P	PD	PI	PID	LQR
ISE	3.485	0.007942	3.896	0.0008	0.03362
IAE	1.059	0.02191	1.001	0.00032	0.41
ITAE	0.983	0.09768	0.1818	1.405e-07	1.025

T_r	0.00396s	0.014s	0.15s	0.154s	0.0104s
T_s	0.54s	0.0727s	1.07s	0.444s	1.116s
M_p	%65	%5	%0	%0	%7.1
ess (RPM)	2.38	2.09	0.78	0.008	0.082

4.1.4. Gerçek Sistem Analizleri

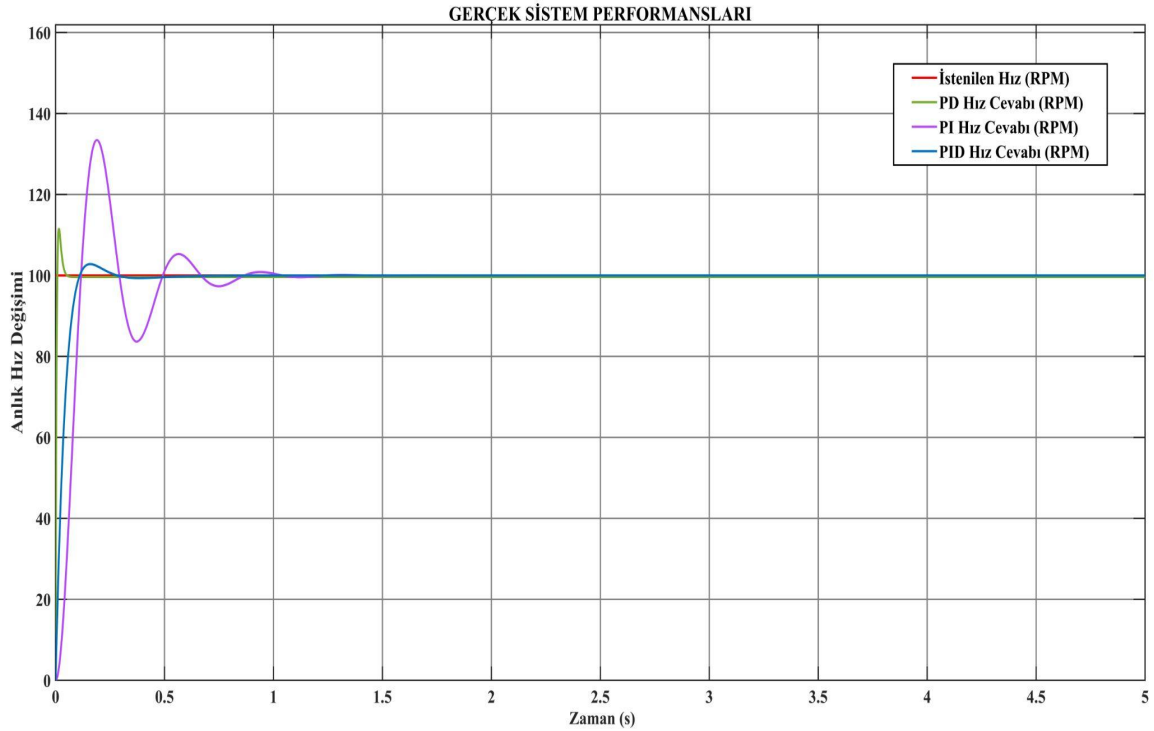
Simülasyon ortamında elde edilen kontrolcü parametreleri referansında insansız yük taşıma aracının kontrol panosuna dahil edilen donanım içerisinde hazırlanan kontrol algoritması ile hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde benzetim modelinin gerçek sistem ile kontrol edilebilme anlamında farkları ortaya çıkmaktadır. Gerçek sistemin temsili şeması aşağıda görünmektedir.



Şekil 4.15. Gerçek Sistem Kontrol Diyagramı

Tasarlanan kontrol donanımına sırasıyla aktarılan kontrol tipleri arasında P tipi ve LQR tipi kontroller bulunmamaktadır. P tipi kontrolde ideal bir ortamda bile osilasyonun ve hız aşımının ilk anda kontrol dışı olması ve LQR tip kontrol için de optimal kontrol etkisinin tam olarak görülebilmesi adına yüksek işlem gücünün gerekmesi sebep olarak gösterilebilir. Gerçek sistemde ise aracın anlık olarak çok yüksek hızlara çıkmasını engellemek ve uygun akışı sağlamak adına en az iki (PD, PI gibi) ifadedi kontrolcüler ile gerçek sistem analizleri gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen gerçek sistem testlerinde bir karşılaştırma unsurunun oluşturulması adına simülasyondaki kazanç katsayı değerleri kullanılmıştır. Araca tıpkı simülasyon testlerinde olduğu gibi 100ms kontrol döngüsünde 100 RPM hız girişi sağlanmıştır. Aracın anlık hız değişimleri Şekil 4.16 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Gerçek Sistem Üzerinden Alınan Sonuçlar

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında 100 RPM referans hız değerinde aracın özgül ağırlığı (220 Kg) ile birlikte istenilen sabit değerde hızlanması her kontrolcü için bir süre sonra sağlanmıştır. Ancak PI tipte kontrol araç için başlangıç anında dengesizlik oluşturmakla beraber hız değişimlerinde de potansiyel olarak aynı agresifliği göstereceği düşünülmektedir. PD kontrolcüye bakıldığında PI'a göre %10.8 gibi çok daha küçük bir aşma değeri ile daha dengeli kontrol sağladığı görülmektedir. PID kontrolcüye bakıldığında ise hem aşma değerinin hemde yerleşme zamanının pratikteki uygulama için en ideal sonucu ürettiği gözlemlenmiştir.

Tüm kontrolcülerini gerçek sistem analizi kapsamında performansları Çizelge 4.2 ile paylaşılmıştır. Elde edilen veriler ışığında aracın hız kontrolünde PID kontrolcüsünün kullanılabileceği görülmektedir. Ek olarak kontrol donanımının kontrol akışını saptadığı en uygun tür olduğu da söylenebilir.

Çizelge 4.2. Kontrolcülerin Gerçek Zamanlı Global Hata Performansları

Değerler	PD	PI	PID
ISE	0.022	0.645	0.0194
IAE	0.246	1.36	0.386
ITAE	0.490	2.56	0.625
T_r	0.113s	0.227s	0.161s
T_s	0.132s	1.09s	0.73s
M_p	%10.8	%38.7	%3.2
e_{ss} (RPM)	0.0073	0.0091	0.00034

Simülasyon ortamında ve gerçek sistem üzerinde yapılan insansız bir kara aracının motor hızı denetimi çalışmaları ile tez kapsamında yürütülen kontrol ünitesi tasarımı, gerçek zamanlı kontrol uygulaması yordamıyla test edilmiştir. Hem PID kontrolün ve türevlerinin genel matematiksel ifadesi bilinmeyen bir robotik sistem için nasıl uygulanması gerektiği hem de bu kontrolcüler arasında en uygun olanının seçilme süreci hakkında elde edilen tecrübeler tezin bu bölümünde paylaşılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin sonuçlar bölümünde en başından son anına kadar süre gelen çalışmaların özetlenerek açıklanması ve elde edilen sonuçların yorumlanması, tezin sağladığı ve ileride sağlayacağı düşünülen akademik-endüstriyel katkıların neler olabileceği hakkında fikirler paylaşılmıştır. Öneriler kısmında ise tez kapsamında yapılan işlere ek olarak daha nelerin yapılabileceği ve geliştirmelerin hangi doğrultuda devam ederse bulunduğu konumdan çok daha ileriye götürebileceği hakkında düşünceler yer almaktadır.

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada bir robotik sistemin kontrol panosunda genel kontrolden sorumlu olabilecek potansiyele sahip robotik elektronik kontrol ünitesi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle elektronik devre tasarımı için şematik planlamalar yapılmış, sonrasında PCB tasarımı gerçekleştirilerek prototip kartlar elde edilmiş ve gerekli montajlamalar yapılarak donanım test edilebilir hale getirilmiştir. Test işlemleri iki adımda yönetilmiş olup bunlar kontrol ünitesinin sahip olduğu bileşenleri bazında ayrı ayrı donanımsal çalışma testleri ve son olarak gerçek bir robotik sistemde (AKİBA) kontrol yöntemini içerecek şekilde yapılan uygulama testleridir.

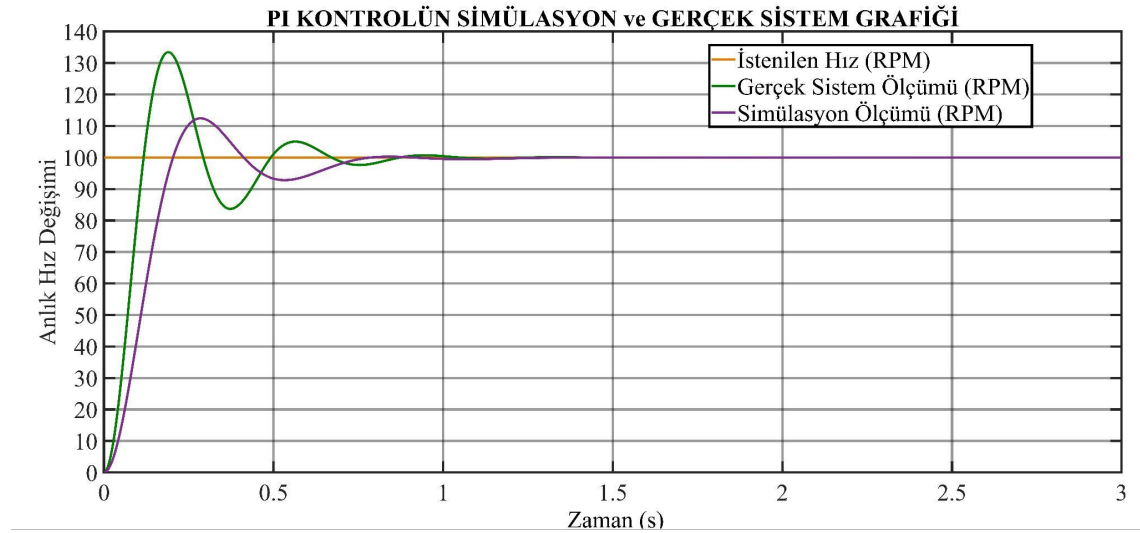
Donanımsal testlerde elektronik kartın besleme ve güç regülasyonu, yalıtım istasyonlarının çalışma kapasitesi gibi testler yer almakta olup başlıklar halinde paylaşılan süreçler neticesinde elde edilen güç dönüştürme ve yalıtımlı sinyal kontrol çalışmalarında istenilen sonuçlara %96.3 yakınlıkta işlem yapılabildiği görülmüştür. Bu oran voltaj regülatörlerinin 5V çıkış beklentisi için yaklaşık 5.3V (%94.34) ve 3.3V çıkış beklentisi için 3.3V (%100) elde edilmesi, yalıtımlı dijital sinyal okumada lojik 1 için 3.3V beklentisinde yaklaşık ortalama 3.28V (%99.4) ve lojik 0 için 0.2V beklentisinde yaklaşık 0.22V (%91) değeri alınmasıyla, yalıtımlı dijital sinyal kontrolünde 3.3V tetikte 12V beklentisinde ortalama 12.15V (%98.77) ve 5V beklentisinde ortalama 5.3V (%94.34) ölçülmesi sonuçları referansından hesaplanmaktadır.

Gerekli fiziki testler yapıldıktan sonra öncelikle uygulama için kullanılacak platformun tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Bu platform materyallerde daha detaylı açıklanmış olan insansız tam otonom veya uzaktan kontrollü yük taşıma aracıdır. Adı AKİBA olan bu aracın iki adet kontrol edilebilir tekerleği vardır. Uygulama testlerinde de bu tekerlerin takılı olduğu BLDC motorların hız ve yön kontrolleri üzerine durularak bir kontrol ünitesinin sahip olması gerektiği en önemli özelliğine yoğunlaşmıştır. Bu özellik robotik sisteme hareket kabiliyeti kazandırmak açısından yetkin ve gürbüz çalışan bir kontrol metodudur denilebilir. İlk adımda aracın tüm sistemine bakıldığında genel bir matematiksel modellemesinin çıkarılması çok zor olduğu anlaşılmış ve bu soruna etkili bir çözümün arayışı neticesinde MATLAB programı yordamıyla sistem tanımlama aracının kullanılmasına karar verilmiştir. Kontrol ünitesi aracın kontrol panosuna yerleştirilerek motor sürücüsüne belirli bir oranda PWM sinyali uygulanarak RPM cinsinden hız çıktısı alınmıştır. Bu şekilde sistem tanımlama aracına aktarılabilecek giriş ve çıkış değerleri sağlanmıştır. Elde edilen veriler referansında sistemin matematiksel modellemesi için seçilen transfer fonksiyonu yöntemi üzerinden %95 ya yakın seviyede benzeştirilen denklem bulunmuştur. Bulunan transfer fonksiyonuna uygulanan P, PI, PD, PID ve LQR kontrol tiplerinin simülasyonda; PI, PD, PID kontrol tiplerinin gerçek sistemdeki etki sonuçları gözlemlenmiş ve paylaşılmıştır.

P tipi kontrolün dördüncü bölümde yer alan Şekil 4.8'e bakıldığında çıktılarına bakıldığında sistem cevabının kaotik olduğu ve yerleşim süresi çok kısa olsa bile ilk anda ortaya çıkan maksimum-minimum aşma değerlerinin sistemi dengesiz hale getirdiği, her hız yenilemesinde bu dengesizliğin yaşanacağı öngörülmüştür. Bu kontrol yöntemi sistem gözetimi için son derece yetersiz kalmaktadır. Simülasyon ortamında global hata değerleri "Simülasyon Analizleri" başlığı altında verilmektedir ancak gerçek sistemde değerler aralık dışında kaldığı için paylaşılmamıştır.

LQR kontrolün ise maliyet fonksiyonu hesaplama işleminin PID kontrol denkleminde daha yoğun olmasından ötürü simülasyon katsayılarının gerçek sisteme tam olarak etki edemeyeceği ve karşılaştırma unsurunun zayıf olacağı düşüncesi ile gerçek sisteme aktarılmamıştır. Yine de simülasyon analizlerinde ortaya çıkan aşma miktarı ve yerleşme süreleri göz önüne alındığında bu sistem için ideal bir kontrolcü olarak seçilemeyeceği düşünülmektedir.

Gerçek sistem analizlerinde öncelikle PI kontrol testi yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.1 üzerinde görüldüğü gibi sistemin simülasyon ortamındaki PI kontrolünde aşma değerleri, gerçek zamanlı testlere göre çok daha azdır. Yerleşim süresi ise iki sistem için yakın değerlerde olup aracın istenilen hareketi anlık olarak gerçekleştirmesinde yetersiz kalmaktadır.



Şekil 5.1. PI Tipi Gerçek Zamanlı ve Simülasyon Performans Karşılaştırmaları

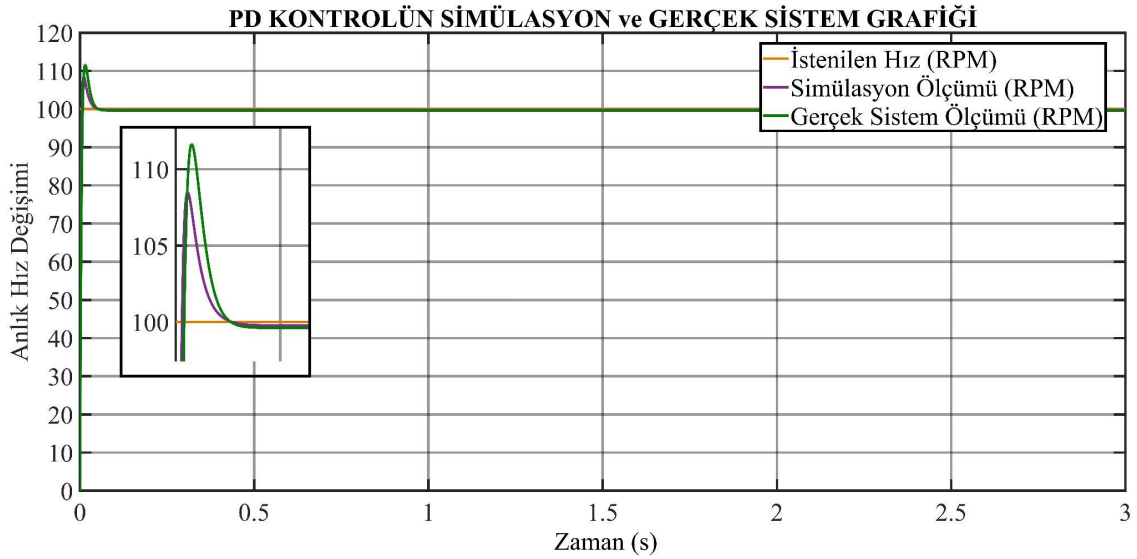
Yapılan ortam analizleri neticesi ek olarak aşağıdaki Çizelge 5.1 üzerinde verilmiştir. Hata ve birim basamak kriterleri ışığında gerçek sistemde aşma oranının fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.1. PI Tipinde Gerçek Ortam ve Simülasyonda Global Hata Performansları

PI-Ortam & Performans	ISE	IAE	ITAE	T_r	T_s	M_p	e_{ss} (RPM)
Gerçek Sistem	0.645	1.36	2.56	0.227s	1.09s	%38.7	0.0091
Simülasyon	3.896	1.001	0.1818	0.15s	1.07s	%10	0

PD tipi kontrolcü karşılaştırılması gelindiğinde ise önceki PI kontrolcüsüne göre nispeten daha dengeli bir akışın olduğu söylenebilir. Aşağıdaki grafikte bu dengenin

nasıl sağlandığı görülmektedir. Ayrıca PD’de gerçek sistem ve simülasyon çıktıları birbirine yakın olmaktadır. Bu tip kontrolde analiz edilen problemler aşma miktarı ve sürekli durum hatası olmaktadır.



Şekil 5.2. PD Tipi Gerçek Zamanlı ve Simülasyon Performans Karşılaştırmaları

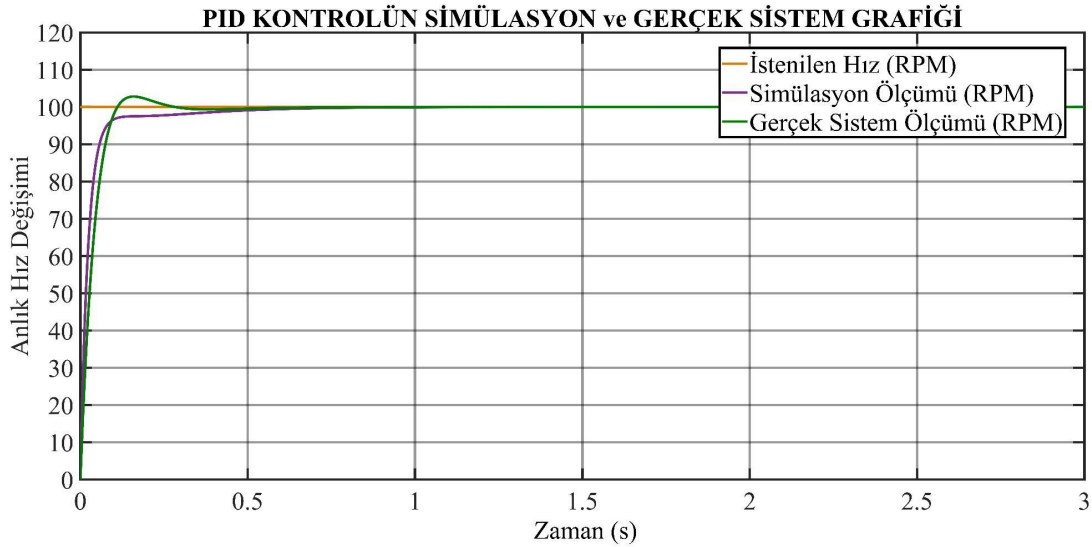
Çizelge 5.2 üzerinde kontrolcünün gerçek sistem ve simülasyon çıktıları yer almaktadır. Araç hareket testinde ilk anda aşma miktarının istenilen davranışın dışında olduğu ve sürekli durum hatasının iyileştirilmeye yatkın olduğu söylenebilmektedir.

Çizelge 5.2. PD Tipinde Gerçek Ortam ve Simülasyonda Global Hata Performansları

PD-Ortam & Performans	ISE	IAE	ITAE	T_r	T_s	M_p	e_{ss} (RPM)
Gerçek Sistem	0.022	0.246	0.490	0.113s	0.132s	%10.8	0.0073
Simülasyon	0.007942	0.02191	0.09768	0.014s	0.0727s	%5	2.09

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar içerisinde gerek simülasyonda gerekse de gerçek araç sisteminde hassas hareket kontrolü için en iyi opsiyonun PD olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak aşma miktarı ve sürekli durum hatasının minimize edilebileceği düşünülerek PID kontrol için de analizler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.3’te PID kontrol yönteminin grafik çıktısı yer almaktadır. Grafiği yorumlamak

gerekirse tıpkı PD tipte olduğu gibi PID tipte de hem gerçek sistemin hem de simülasyonun yakın sonuçlar çıkardığı ancak gerçek sistemin aşma miktarının ve yerleşme süresinin çok daha uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. PID Tipi Gerçek Zamanlı ve Simülasyon Performans Karşılaştırmaları

PID için hazırlanan aşağıdaki Çizelge 5.3'e bakıldığında aracın kontrolünde en uygun yöntemin PID olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3. PID Tipinde Gerçek Ortam ve Simülasyonda Global Hata Performansları

PID-Ortam & Performans	ISE	IAE	ITAE	T_r	T_s	M_p	e_{ss} (RPM)
Gerçek Sistem	0.0194	0.386	0.625	0.161s	0.73s	%3.2	0.00034
Simülasyon	0.0008	0.00032	1.405e-07	0.154s	0.444s	%0	0

Tüm analizler neticesinde modellenmiş sistemde ve gerçek sistemde insansız yük taşıma aracı için en verimli kontrolcünün PID olduğu sonucuna varılmıştır. PID kontrolcünün simülasyondaki performansına ve gerçek sistemdeki performansına bakıldığında sistem tanımlama oranının yeterliliği de görülmüş olup analiz başlıkları altında verilen tablolarda yer alan global hata değerleri ve birim basamak cevabı parametreleri ışığında bu araç için bu kontrol ünitesinin içerisinde PID kontrolün kullanımının olumlu olduğu kanısına varılmıştır.

Tez çalışmasının en başından en sonuna kadar hedeflenen kullanışlı ve endüstriyel çözüm potansiyeli oluşturabilecek bir kontrol ünitesi tasarımına, tüm test sonuçları itibarıyla yaklaşıldığı düşünülmektedir. Hem yerli üretime katkısının amaçlandığı hem de bu konuda yapılacak ilerideki çalışmalar için iyi bir zemin oluşturduğu umut edilmektedir.

5.2. Öneriler

Tez kapsamında atılan tüm adımların bugünü temsil ettiği ancak yarın için ideal temeller arasında yerini alacağı umuduyla akademi ve endüstri ortamında üstüne daha pek çok geliştirmenin eklenebileceği düşünülmektedir. Bu düşünce ile çalışmada şu gibi eklentilerin daha pozitif boyutları beraberinde getireceği öngörülmektedir:

- Tasarımın donanımsal boyutuna bakıldığında dijital ve analog sinyal işleme taraflarında izolasyon katmanı artırılarak güvenlik daha ideal bir hale gelebilir.
- Donanımda yer alan ARM mimarisi ile tasarlanmış mikrodenetleyicinin yerine kullanım kapasitesini ve yelpazesini genişletecek FPGA veya MPU (Mikroişlemci Birim) gibi, hem MCU hem de çok çekirdekli başka bir yapının koordineli çalışabileceği üst bir sistem tasarlanabilir.
- Kontrol yetkinliği açısından bakıldığında ise daha farklı kontrol metotlarını (Bulanık Mantık, Optimal Kontrol v.b.) içeren çalışmalar ile daha hassas bir işleyiş mekanizması oluşturulabilir.
- Mevcut sistem insansız hava araçları, sualtı sistemleri veya farklı alanlarda iş yapan kara araçları gibi robotik sistemlerde test edilerek eksiklikleri görülebilir ve uygulama ağı genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Anurag, K., & Kamlu, S. (2018, January). Design of LQR-PID controller for linearized magnetic levitation system. In *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)* (pp. 444-447).
- Ayaz, K. (2019). Mikroişlemci Denetimli Beş Serbestlik Derecesine Sahip Robot İle Yüzey Ölçümü (Master's thesis, Ondokuz Mayıs Üniversitesi).
- Baidya, D., Dhopte, S., & Bhattacharjee, M. (2023). Sensing System Assisted Novel PID Controller for Efficient Speed Control of DC Motors in Electric Vehicles. *IEEE Sensors Letters*.
- Correll, N., Hayes, B., ve diğerleri. (2019). Introduction to Autonomous Robots. The MIT Press.
- Carlucho, I., De Paula, M., & Acosta, G. G. (2019). Double Q-PID algorithm for mobile robot control. *Expert Systems with Applications*, 137, 292-307.
- Chandran, P., Kingston, N. J., & Muthukrishnan, N. (2022, October). Hybrid Controller Design of Bldc Motor For Electric Vehicle Applications. In *2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)* (pp. 1-7).
- Durmuş, H. (2015). Otonom robot ve kontrol birimi tasarımı (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dursun, E. H. (2016). *Değişken Yüklü DC Motorun Kayan Kipli Kontrolü* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya).
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2014). Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson.
- Guardeño, R., López, M. J., & Sánchez, V. M. (2019). MIMO PID controller tuning method for quadrotor based on LQR/LQG theory. *Robotics*, 8(2), 36.
- Guerra, E., Grau, A., Bolea, Y., & Munguia, R. (2019, September). Sampling Operation with Robotic UAV. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1583-1586).
- Gadekar, K., Joshi, S., & Mehta, H. (2020, July). Performance Improvement in BLDC Motor Drive Using Self-Tuning PID Controller. In *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (pp. 1162-1166).
- Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, P. M., Ma, S. J., Kim, Y., Oh, J. H., & Lim, Y. K. (2007, June). Design, implementation and free running test of ISiMI; an AUV for cruising in ocean engineering basin environment. In *OCEANS 2007-Europe* (pp. 1-6).
- Ko, M. H., Kim, K. C., Ryuh, B. S., Suprem, A., & Mahalik, N. P. (2013, October). Development of autonomous traveling for agricultural robot drive platform by using a single camera. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 1, pp. 2078-0958)*.
- Mindell, D. A., & Kwiattkowski, P. G. (2016). Robot Safety: Human-Robot Interaction. Cambridge University Press.
- Miki, T., Khrapchenkov, P., & Hori, K. (2019, May). UAV/UGV autonomous cooperation: UAV assists UGV to climb a cliff by attaching a tether. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 8041-8047).
- Macit, A. (2019). Gerçek zamanlı işletim Sistemi tabanlı insansız Otonom Bir Kara taşıtı (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Nise, N. S., 2010, Control Systems Engineering, John Wiley & Sons, Inc. , p.

- Najm, A. A., & Ibraheem, I. K. (2019). Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1087-1097.
- Osinski, C., Silveira, A. L. R., Stiegelmaier, C., Bergamini, M. G., & Leandro, G. V. (2018, November). Control of ball and beam system using fuzzy PID controller. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)* (pp. 875-880).
- Ogata, K., 2010, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, Pearson p. 1-30.
- Patel, H., Potkonjak, M., ve diğerleri. (2018). *Embedded Systems: Design, Analysis and Verification*. Springer.
- Podlubne, A., Mey, J., Schöne, R., Aßmann, U., & Göhringer, D. (2021). Model-based approach for automatic generation of hardware architectures for robotics. *IEEE Access*, 9, 140921-140937.
- Raafi'u, B., Darwito, P. A., Fauzan'Adziimaa, A., Hadi, H. S., Patrialova, S. N., & Raditya, M. (2019, October). Comparative Study of Fuzzy-PID and Fuzzy-PI Control Systems on DC Motor Speed for Four-Wheeled Mobile Robotic. In *2019 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)* (pp. 129-133).
- Spong, M.W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. Wiley.
- Siciliano, B., & Sciavicco, L. (2010). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer.
- Shekhar, S., Saha, P. K., & Thakura, P. R. (2019, June). Optimal pid tuning of bldc drive using lqr technique. In *2019 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Green Technology (ICISGT)* (pp. 57-574).
- Tummescheit, H., Metter, M., & Zurawski, R. (Eds.). (2016). *Industrial Communication Systems*. CRC Press.
- Turan, G. (2015). *A NEW GENERATION EMBEDDED SYSTEMS DESIGN FOR ROBOCUP SSL ROBOTS* (Master's thesis, Boğaziçi University)
- Nouri, K., Dhaouadi, R. ve Benhadj Braiek, N., 2008, Adaptive Control of a Nonlinear DC Motor Drive Using Recurrent Neural Networks, *Applied Soft Computing*, 8 (1), 371-382.
- You, G., & Zeng, W. (2018, October). Design of two-wheel balance car based on STM32. In *2018 9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)* (pp. 775-779).
- Zhang, H., Assawinchaichote, W., & Shi, Y. (2021). New PID parameter autotuning for nonlinear systems based on a modified monkey–multiagent DRL algorithm. *IEEE Access*, 9, 78799-78811.
- Wu, Q., Qi, J., Wu, C., & Wang, M. (2020, July). Design of ugv trajectory tracking controller in ugv-uav cooperation. In *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 3689-3694).