

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KIPLI KONTROL
TEKNİKLERİ KULLANILARAK MİKROİŞLEMCİLİ BİR
KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ**

MUSTAFA YILDIRIM

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İLHAMİ YİĞİT

YOZGAT – 2022

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KIPLI KONTROL
TEKNİKLERİ KULLANILARAK MİKROİŞLEMCİLİ BİR
KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ**

MUSTAFA YILDIRIM

Tez Danışmanı
Prof. Dr. İLHAMİ YİĞİT

YOZGAT - 2022

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa YILDIRIM

...../...../.....

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KIPLİ KONTROL TEKNİKLERİ KULLANILARAK MİKROİŞLEMCİLİ BİR KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

MUSTAFA YILDIRIM

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İLHAMİ YİĞİT

Kontrolcüler sistemlerin verimliliğini artırması, maliyetlerini düşürmesi, çıktı kalitelerini artırması gibi birçok faydaları sebebiyle yıllardan beri geniş kullanım alanı bulmaktadır. Endüstride genellikle PID kontrolcü tarzı klasik kontrolcüler tercih edilmektedir. Ancak gelişen teknoloji, karmaşıklaşan sistemler ve sistemleri modellemenin gittikçe zorlaşmaya başlamasıyla yeni kontrol algoritmalarına ihtiyaç doğmakta, mikroişlemcili kontrolcüler gittikçe yaygın hale gelmektedir. Bu çalışmada, açık kaynaklarda yer almaya başlayan modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinin pratikte de uygulanabilir olduğu geliştirilen mikrodenetleyicili bir kontrolcü ile ortaya konulmuştur. Bu amaçla, bir asılı sarkaç sisteminin açısal konum kontrolü modelden bağımsız kayan kipli kontrol yöntemlerinden yararlanılarak geliştirilen mikroişlemcili kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. IMU algılayıcısından aktarılan veriler değerlendirilerek hesaplanan sarkaç açısı referans açı değeri ile karşılaştırarak elde edilen kontrol sinyali ile pervaneyi döndüren fırçasız doğru akım motoru sürülmektedir. Ayrıca, mikrodenetleyici ile geliştirilen özgün arayüz sayesinde kullanıcıdan komut alınabilmekte ve sistemin çıktıları kullanıcıya yansıtılabilmektedir. Çalışmada çok sayıda benzetim ve deney yapılmış olup elde edilen cevap eğrilerinden, klasik PID kontrolcü ile de karşılaştırarak, modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinden yararlanılarak geliştirilen mikroişlemcili kontrolcünün basit ve gürbüz yapısıyla tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüş, gelecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2023, 78 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol, Mikroişlemcili Kontrolcü, Asılı Sarkaç Sistemi, IMU Algılayıcı, Modelleme, Benzetim, Deneysel Çalışma

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR BASED CONTROLLER USING MODEL FREE SLIDING MODE CONTROL TECHNIQUES

MUSTAFA YILDIRIM

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE**

DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING

THESIS ADVISOR: PROF. DR. İLHAMİ YİĞİT

Controllers have been widely used for years due to many benefits such as increasing the efficiency of the systems, reducing the costs and increasing the output quality. Classical controllers such as PID controllers are generally preferred in the industry. However, with the developing technology, complex systems and modeling of systems becoming increasingly difficult, the need for new control algorithms arises, and controllers with microprocessors are becoming more and more common. In this study, it has been demonstrated with a developed microcontroller that the model free sliding mode control techniques, which have started to take place in open sources, are also applicable in practice. For this purpose, the angular position control of a suspended pendulum system was carried out with a microprocessor controller, which was developed using model free sliding mode control methods. The brushless direct current motor that rotates the propeller is driven with the control signal obtained by comparing the reference angle with the pendulum angle value calculated by evaluating the data transferred from the IMU sensor. In addition, thanks to the original interface developed with the microcontroller, commands can be taken from the user and the outputs of the system can be reflected to the user. In the study, a large number of simulations and experiments were carried out. Comparing the obtained response curves with the classical PID controller, it was seen that the microprocessor based controller, which was developed by using model free sliding mode control techniques, gives satisfactory results with its simple and robust structure, and suggestions were made for further studies.

2022, 78 PAGE

KEYWORDS: Model Free Sliding Mode Control, Microprocessor Based Controller, Suspended Pendulum System, IMU Sensor, Modeling, Simulation, Experimental Study

ÖNSÖZ

Çalışma boyunca bilgi birikimiyle yol gösterici olan, yardımlarını esirgemeyen ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. İlhami YİĞİT'e, maddi manevi destekleriyle yanımda olan aileme ve iş arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Mustafa YILDIRIM

...../...../.....

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Tez Onay Sayfası	ii
Tez Beyan	iii
Özet	iv
Abstract	v
Önsöz	vi
İçindekiler	vii
Tablolar Listesi	ix
Şekiller Listesi	x
Simgeler ve Kısaltmalar	xiii
GİRİŞ.....	1
1. ASILI SARKAÇ SİSTEMİ	3
2. KONTROL YÖNTEMLERİ	6
2.1. Pid Kontrol	6
2.2. Kayan Kipli Kontrol	7
2.3. Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol	8
3. DENEY DÜZENEĞİ	10
3.1. Mikroişlemcili Kontrol Ünitesi	11
3.1.1. Mikroişlemci Bölümü	12
3.1.2. TFT LCD Ekran Bölümü	16
3.2. IMU Sensörü	19
3.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru ve Pervanesi	20
3.4. Elektronik Hız Ünitesi(ESC)	21
3.5. Batarya	22
3.6. Tork Ayarlı Mentеше	23
4. SİSTEMİN MODELLEMESİ	25
4.1. Sarkaç Sisteminin Modellenmesi	25
4.2. Kontrol Algoritmaları	31
4.2.1. Pid Algoritması	31
4.2.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması	32
4.2.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli	

Kontrol Algoritması	34
4.2.4. Kontrol algoritması ve referans açısı seçimi	35
5. DENEYSEL VE BENZETİM SONUÇLARI	37
5.1. Deneysel Sonuçlar	37
5.1.1. PID Algoritması Deney Grafikleri	37
5.1.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Deney Grafikleri	39
5.1.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Deney Grafikleri	40
5.1.4. Sistemin Regülatör Özelliğinin Gözlemlenmesi	42
5.1.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	43
5.2. Benzetim Sonuçları	43
5.2.1. PID Algoritması Benzetim Grafikleri	43
5.2.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Benzetim Grafikleri	47
5.2.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Benzetim Grafikleri	50
5.2.4. Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi	53
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55
EKLER	57
ÖZGEÇMİŞ	

TABLULAR LİSTESİ

Tablo	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. STM32H743 Mikrodenetleyicisi Teknik Özellikleri (STMicroelectronics, t.y.)	13
Tablo 3.2. MPU-6050 Sensör Birimi Teknik Özellikleri (InvenSense Inc.,t.y.).....	19
Tablo 3.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru Teknik Özellikleri (Promodel Ltd. Şti., t.y.)	21
Tablo 3.4. Elektronik Hız Ünitesi Teknik Özellikleri (Promodel Ltd. Şti., t.y.)	22
Tablo 3.5. Lityum Polimer Batarya Teknik Özellikleri (Grepow Inc., (t.y.).	23



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Asılı sarkaç sistemi.	3
Şekil 2.1. PID Kontrolcü blok diyagramı (PID, t.y.)	7
Şekil 2.2. Kayan kipli kontrol ulaşma ve kayma fazları (Yiğit, 2021: 209-215)	8
Şekil 3.1. Deney düzeneği genel görünümü	10
Şekil 3.2. Deney düzeneği genel şeması	11
Şekil 3.3. Mikroışlemcili kontrol ünitesi	12
Şekil 3.4. NUCLEO-H743ZI2 Geliştirme Kiti (STMicroelectronics, t.y.)	12
Şekil 3.5. Klasik Euler Açıları (Euler angles, t.y.)	14
Şekil 3.6. Havacılık Sektöründe Euler Açıları (Euler angles, t.y.)	15
Şekil 3.7. Tamamlayıcı Filtre (Venkata, 2016)	16
Şekil 3.8. Arayüz açılış sayfası	17
Şekil 3.9. Arayüz sayfaları: a) Ana ekran b) Parametre sayfası c) Değer atama sayfası	17
Şekil 3.10. Arayüz sistem sayfaları: a) Asılı sarkacın hareketlerinin ve açısının gözlemlenmesi b) Asılı sarkacın açısının gözlemlenmesi	18
Şekil 3.11. MPU-6050 Sensör Birimi	19
Şekil 3.12. Fırçasız Doğru Akım Motoru (Promodel Ltd. Şti., t.y.)	20
Şekil 3.13. Fırçasız Doğru Akım Motoru Teknik Çizimi (Promodel Ltd. Şti., t.y.)	20
Şekil 3.14. Fırçasız Doğru Akım Motoru Pervanesi (T-motor. ,t.y.)	21
Şekil 3.15. Elektronik Hız Ünitesi (Promodel Ltd. Şti., t.y.)	22
Şekil 3.16. Lityum Polimer Batarya (Grepow Inc., (t.y.)	23
Şekil 3.17. Tork ayarlı menteşe (Mensan Menteşe Ltd. Şti., t.y.)	24
Şekil 3.18. Tork ayarlı menteşe boyutları (Mensan Menteşe Ltd. Şti., t.y.)	24
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin Matlab/Simulink benzetimi	25
Şekil 4.2. PWM-Volt Dönüşümü	26
Şekil 4.3. Sarkaç sistemi karakteristik açı-güç eğrisi	27
Şekil 4.4. Asılı sarkacın 60 dereceden serbest bırakılmasıyla elde edilen açı eğrisi	28
Şekil 4.5. Sarkaç sistemi Matlab/Simulink benzetimi	30
Şekil 4.6. Matlab/Simulink benzetiminde sarkaç sistemi modelleme parametreleri ...	31
Şekil 4.7. PID algoritması benzetimi	32
Şekil 4.8. PID algoritması parametreleri	32
Şekil 4.9. Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması benzetimi	33

Şekil 4.10. Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması parametreleri	34
Şekil 4.11. İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması benzetimi	34
Şekil 4.12. İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması parametreleri	35
Şekil 4.13. Matlab/Simulink açılı algoritma seçim ve parametre atama ekranı	35
Şekil 4.14. Algoritma seçim benzetimi	36
Şekil 5.1. a) 20 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (PID) (Deneysel)	37
Şekil 5.2. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (PID) (Deneysel)	38
Şekil 5.3. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (PID) (Deneysel)	38
Şekil 5.4. a) 20 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	39
Şekil 5.5. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	39
Şekil 5.6. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	40
Şekil 5.7. a) 20 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	40
Şekil 5.8. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	41
Şekil 5.9. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)	41
Şekil 5.10. Sistemin basamak bozucu giriş cevabı: a) PID b) İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol (Deneysel)	42

Şekil 5.11. 20 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (PID)	44
Şekil 5.12. 30 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (PID)	45
Şekil 5.13. 40 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (PID)	46
Şekil 5.14. 20 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	47
Şekil 5.15. 30 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	48
Şekil 5.16. 40 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	49
Şekil 5.17. 20 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	50
Şekil 5.18. 30 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	51
Şekil 5.19. 40 derece basamak girişe sistemin cevabı:	
a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
c	: Viskoz sönüm sabiti
d	: Askı noktasının çubuğun ağırlık merkezine uzaklığı
$e(t)$: Hata sinyali
g	: Yerçekimi ivmesi
J	: Atalet momenti
K_d	: Türevsel kazanç
K_i	: İntegral kazancı
K_p	: Oransal kazanç
L	: Asılı sarkacın uzunluğu
m	: Asılı sarkacın kütlesi
$r(t)$: Referans durum
s	: Kayma yüzeyi
T	: Motorun pervanesinin itme kuvvetinden oluşan moment
u	: Kontrol sinyali
u_{eq}	: Kayan kipli kontrol eşdeğer sinyali
u_{sw}	: Kayan kipli kontrol anahtarlama sinyali
δ	: Kayan kipli kontrol sınır tabaka kalınlığı
θ	: Kontrol edilen açı
λ	: Birinci mertebeden kayma yüzeyindeki kazanç parametresi

Kısaltmalar

Açıklamalar

BLDC	: Fırçasız Doğru Akım (<i>Brushless Direct Current</i>)
DOF	: Serbestlik Derecesi (<i>Degrees of Freedom</i>)
ESC	: Elektronik Hız Kontrol (<i>Electronic Speed Control</i>)
I2C	: Seri Haberleşme Protokolü (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
KKK	: Kayan Kipli Kontrol
LCD	: Sıvı Kristal Ekran (<i>Liquid Crystal Display</i>)
PID	: Oransal İntegral Türev (<i>Proportional-Integral-Derivative</i>)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (<i>Pulse Width Modulation</i>)
TFT	: İnce Tabakalı Transistör (<i>Thin-Film-Transistor</i>)

GİRİŞ

Günümüzde kontrolcülerin endüstride kullanımı büyük önem arz etmektedir. Verimli bir kontrolcü kullanımı doğrudan veya dolaylı olarak ürün kalitesinin yükseltilmesi, maliyetlerin düşürülmesi, rekabet edilebilirliğin sağlanması, üretim kapasitesinin ve karlılık oranının artması gibi birçok fayda sağlamaktadır.

PID kontrolcüler gibi kullanımı kolay ve tatminkâr sonuçlar veren kontrolcüler yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak gelişen teknolojilerle birlikte yeni kontrol algoritmalarının uygulanabilir hale gelmesi ihtiyacı doğmaktadır. Kayan kipli kontrol yöntemi hassas ve gürbüz bir kontrol sağladığından son zamanlarda kullanım oranı artmaya başlamaktadır. Klasik kayan kipli kontrol tekniği model bilgisi gerektirmektedir. Klasik kayan kipli kontrolden farklı olarak tasarımında model bilgisi gerektirmeyen modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinin teorik olarak birçok değerli çalışmaları literatürde yer almaya başlamıştır. Ancak pratikte de uygulanabilir olduğunun ortaya konulması ihtiyacı vardır. Bu tez çalışmasında bağımsız kayan kipli kontrol teknikleri kullanılarak mikroişlemcili bir kontrolcü tasarlanmış olup, modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinin pratikte de uygulaması yapılmıştır.

Tez çalışmasında asılı sarkaç sisteminin açı kontrolü hem deney hem de benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Asılı sarkacın hareketini sağlayan torku elde etmek için gelişen teknolojiye uyum sağlanıp son zamanlarda drone ve elektrik araçlarda yaygın olarak tercih edilen fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Ayrıca, asılı sarkacın açısını ölçmek için klasik yöntem olan potansiyometre veya optik kodlayıcı sensörleri yerine telefon ve tablet bilgisayar gibi akıllı cihazlarda kullanılan IMU sensörü tercih edilmiştir. Mikroişlemcide, IMU sensöründen gelen dijital veriler değerlendirilerek asılı sarkacın açısı hesaplanmakta ve referans açı değerine göre elde edilen hata değerine modelden bağımsız kayan kipli kontrol yöntemleri uygulanarak elde edilen kontrol sinyali ile fırçasız doğru akım motoru sürülmektedir.

Mikroişlemci ile geliştirilen arayüz sayesinde bilgisayar ortamına ihtiyaç duyulmaksızın girdilerin yapılabildiği ve sonuçların gözlenebildiği modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinin kullanıldığı mikroişlemcili bir kontrolcü geliştirilmiştir. Tez çalışması, literatürde hem uygulamasına az rastlanılan kontrol tekniğini kullanması

hem de bir arada kullanımı az olan güncel teknolojileri birlikte kullanması yönleri ile yenilikleri barındırmaktadır.

Tez çalışmasının bölümlerinde asılı sarkaç sistemleri ve kontrol yöntemleri ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. İlerleyen kısımlarda deney düzeneği tanıtılarak düzeneğin çalışma prensibi açıklanıp mikroişlemcinin işlevleri aktarılmıştır. Ayrıca, deneyde yer alan bölümlerin teknik özellikleri ve seçilme sebepleri açıklanmıştır. Diğer bir bölümde, deney düzeneğinin MATLAB/Simulink ortamında matematiksel modellenmesi gösterilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları bölümünde ise hem deney hem de benzetim ortamında elde edilen grafiklere yer verilerek sonuçlar hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Tezin son bölümü olan sonuç ve öneriler bölümünde tez çalışmasının sonucunda elde edilen bulgular ve gözlemlere yer verilerek çalışmanın gelecekte hangi alanlara genişletilebileceğinden bahsedilmiştir.

θ : Kontrol edilen açı

J : Atalet momenti

g : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2)

c : Viskoz sönüm sabiti

Benzetim çalışmaları ile sistemin dinamiğinin ayrıntılı analizi için kontrol edilmesi hedeflenen asılı sarkaç sisteminin matematiksel modelinin bilinmesi gereklidir. 2009 yılında yayınlanan yüksek lisans tez çalışmasında Kızmaz, H., tarafından sistemin matematiksel modeli aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

Dinamik dengeye göre sarkacın asılı olduğu noktaya göre momentler toplamı sıfırdır. Modelde, sistemin hareketinden kaynaklı atalet momenti mevcuttur. Noktasal bir m kütleinin d uzaklığındaki bir noktaya göre moment etkisi Newton'un ikinci kanunu uygulanarak

$$\tau = F d = m a d \quad (1.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada a çizgisel ivmeyi temsil etmektedir. ω açısal hız ve v çizgisel hız olmak üzere

$$v = \omega d \quad (1.2)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt} d \quad (1.3)$$

$$a = \frac{d^2\theta}{dt^2} d \quad (1.4)$$

olup (1.4) eşitliği (1.1) eşitliğinde yerine yazıldığında

$$\tau = m d^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1.5)$$

elde edilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60). Burada $m d^2$ ifadesi noktasal bir kütleinin d kadar uzaklıktaki bir eksene göre atalet momenti olarak tanımlanmaktadır. N adet noktasal kütleinin oluşturduğu bir düzeneğin atalet momenti ise

$$J = \sum_{i=1}^N m_i d_i^2 \quad (1.6)$$

olur. Buradan, sarkaç sisteminin atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

$$J = \frac{1}{12} m (d^2 + L^2) \quad (1.7)$$

Atalet momentinden kaynaklanan tepki momenti ise

$$\tau = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = J \ddot{\theta} \quad (1.8)$$

eşitliği ile ifade edilebilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).Sarkaç modelinde, sistemin kütesinden kaynaklı bir dönme kuvveti ve sistemin kararlı hale gelmesini sağlayan viskoz sönüm sabiti mevcuttur. Yukarıda açıklanan bilgiler neticesinde sarkaç sisteminin matematiksel modeli aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

$$J \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + m_L g d \sin \theta = T \quad (1.9)$$

Buradan, $\theta = x_1$ ve $\dot{\theta} = x_2$ şeklinde değişken değiştirme yapılarak, sistemin davranış denklemleri durum uzayında aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1.10)$$

$$\dot{x}_2 = (-m_L g d/J) \sin x_1 + (-c/J)x_2 + (1/J)T \quad (1.11)$$

2. KONTROL YÖNTEMLERİ

Uygulamada asılı sarkaç sisteminin düşey eksen ile yaptığı açının motor pervanesinin sarkaca sağladığı tork sayesinde arzulanan değere gelmesi hedeflenmektedir.

Uygulanacak kontrol yöntemleri sayesinde sistemin çıktı kalitesi artırılabilir. Referans açığa ulaşılma süresi, aşma değeri ve kalıcı durumdaki salınım değerlerinin istenilen kalitede sağlanması hedeflenmektedir.

Kontrol yöntemleri açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol yöntemleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Açık çevrim kontrol yönteminde sisteme uygulanan kontrol sinyali geri besleme sinyali almadığı için sistemin çıkış değerinden ve bozucu girişlerden etkilenmez. Bu sebeple açık çevrim kontrol çoğunlukla basit uygulamalarda tercih edilir. Kapalı çevrim kontrol yönteminde ise kontrol sinyali sistemin çıkış sinyalinden geri besleme almaktadır. Bu yöntemde, kontrol edilmek istenen çıkış sinyalinin ölçülüp referans giriş sinyali ile karşılaştırılmasından elde edilen hata değeri kullanılarak hata değerinin mümkün olan en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

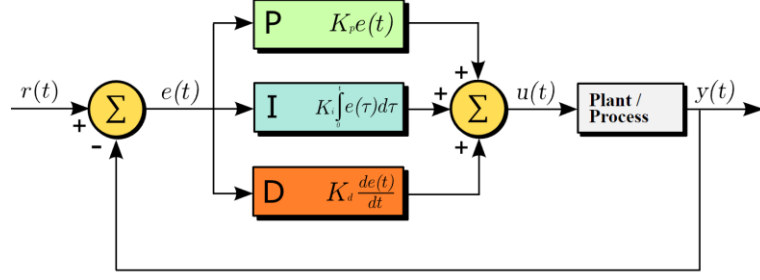
Günümüzde birçok kontrol tekniği kullanılmaktadır. PID ve Kayan Kipli Kontrol teknikleri en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Uygulamada ise klasik kayan kipli kontrol tekniklerinden farklı olarak modelden bağımsız kayan kipli kontrol teknikleri tercih edilmiştir.

Uygulanan kontrol tekniklerinin detayları aşağıdaki bölümlerde belirtilmiştir.

2.1.PID KONTROL

PID kontrolcüler endüstride yaygın olarak kullanılan kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden birisidir. PID kontrolcüler kullanım kolaylığı ve genel olarak hedeflenen sonucu vermesinden dolayı çok tercih edilmektedir.

Oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) olarak üç bileşenden oluşan kontrolcünün blok diyagramı Şekil 2.1'de görülürken, elde edilen PID kontrol sinyali (2.1) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 2.1.PID Kontrolcü blok diyagramı (PID, t.y.)

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

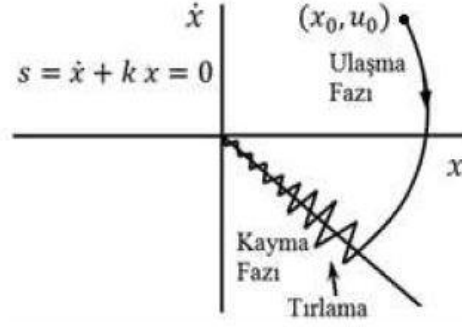
Blok diyagram ve eşitlikte yer alan $e(t)$ hata sinyali $r(t)$ referans durum ile $y(t)$ ölçülen durum arasındaki farkı yansıtmaktadır. PID kontrolcüler sistemin hata değerini azaltmak için üç ayrı parametreyi kullanır. Oransal terim mevcut hatadan kaynaklı olup integral bölümü geçmiş hataların toplamı ve türevsel bölüm gelecekteki hataların tahmini olarak değerlendirilir. Bu üç bileşenin bir araya getirilip $e(t)$ hata sinyalinin K_p , K_i ve K_d kazançları ile kullanılmasıyla elde edilen $u(t)$ çıkış sinyali, sistemin hedeflenen duruma daha da yaklaşmasını sağlamaktadır.

2.2.KAYAN KIPLİ KONTROL

Kayan kipli kontrol, uygun şartlar yerine geldiğinde, dış bozucular ve belirsizliklere rağmen hedeflenen dinamik davranışı sağlayabilen gürbüz bir kontrol yöntemidir (Kalaycı ve Yiğit, 2015: 131-142; Young vd., 1999: 328-342).

Kontrol yönteminin temelleri Emelyanov ile 1950'lerde ilk kez öne sürülmüştür. Vadim Utkin'in 1977 yılında İngilizce yayınlanan makalesi ile önemli ölçüde adını duyuran yöntemin kullanım alanı son yıllarda oldukça artmaktadır (Kalaycı ve Yiğit, 2015: 131-142).

Temeli gürbüz kontrol olarak tanınan değişken yapıli kontrole dayanan kayan kipli kontrol yönteminde sonsuz anahtarlamalı geri besleme tekniği kullanılmaktadır. Doğrusal veya doğrusal olmayan sistemler Şekil 2.2'de görüleceği üzere ulaşma fazı ile durum uzayında tanımlaması yapılan yüzeye çekilirken kayma fazında ise yüzey üzerinde tutulur (Yiğit, 2021: 209-215).



Şekil 2.2. Kayan kipli kontrol ulaşma ve kayma fazları (Yiğit, 2021: 209-215)

Eşitlik (2.2)'de belirtildiği üzere kayan kipli kontrol yönteminde u kontrol sinyali, ulaşma fazında etkin olan u_{sw} anahtarlama sinyali ve kayma fazında etkin olan u_{eq} eşdeğer sinyalinden oluşmaktadır. Kayma fazında kontrol dinamiği yüzey parametrelerine bağlı iken ulaşma fazında sistem parametrelerince belirlenir (Özenç ve Yiğit, 2019).

$$u = u_{sw} + u_{eq} \quad (2.2)$$

Kayan kipli kontrol yöntemi ile kontrolcü tasarımı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama kayma fazına ulaştıracak bir kayan yüzey tasarımından ikinci aşama ise kontrolcü tasarımından oluşmaktadır. Kayma yüzeyi, arzu edilen kapalı çevrim sistem cevabı şekline göre kök yerleştirme metoduyla durum uzayında tasarlanır. İkinci aşamada ise kontrol sinyali Lyapunov kararlılık teoremi ile elde edilirken Lyapunov kayma koşulu sistemi yüzeye ulaşmaya zorlar ve yüzey üzerinde tutar. Sistemin kararlılığı kayma koşulu ve seçtiğimiz kararlı yüzey ile sağlanmış olur (Nguyen, 1998).

2.3.MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KİPLİ KONTROL

Klasik kayan kipli kontrolcü tasarlanırken sistemin model bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı uygulamalarda sistemin modellenmesinde zorluklar yaşanmaktadır. Modelleme için yeterli zaman olmaması, modelleme hatalarının oluşması, sistemin her seferinde alt bileşenlerine ayrılamaması, modellemede kullanılan değişkenlerin belirsiz değişimler gösterebilmesi ve modelleme yapabilmek için yeterli yetkinliğe erişilememesi gibi sebepler modellemede karşılaşılan zorluklar olarak sayılabilir (Yiğit, 2017: 1645-1662).

2021 yılında Ankara 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi'nde yayınlanan bildiriye, klasik kayan kipli kontrolde bahsedilen u_{sw} anahtarlama sinyalinin tek başına kontrol sinyali olarak kullanılmasıyla birçok uygulamada modellemeye gerek

duyulmaksızın istenilen sonuçların belirli bir kalite seviyesine kadar elde edilebildiği belirtilmiştir (Yiğit, 2021: 209-215).

Bildiride birinci mertebeden kayma yüzeyi hata cinsinden (2.3) eşitliğindeki gibi tanımlanmaktadır.

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (2.3)$$

İkinci mertebeden s-kayma yüzeyi ise, integral kontrol terimi de eklenerek,

$$s = \ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eşitlikte K_p oransal, K_d türevsel ve K_i integral kazançlardır.

Kayan kipli kontrol süreksiz ve anahtarlama kontrol yapısından oluştuğu için anahtarlama ve diğer sebeplerden kaynaklı Şekil 2.2’de görüleceği üzere sistemde tırlama hareketi gözlenir. Tırlama hareketi sistemin ömrünü azaltan ve enerji tüketimini artıran bir etkiye sahiptir. u kontrol sinyali elde edilirken ani geçişleri olan “sign” fonksiyonu yerine “sat” doyma fonksiyonu veya “tanh” fonksiyonu gibi yumuşak geçişleri olan “yumuşatma fonksiyonları” tercih edilebilir (Özenç ve Yiğit, 2019).

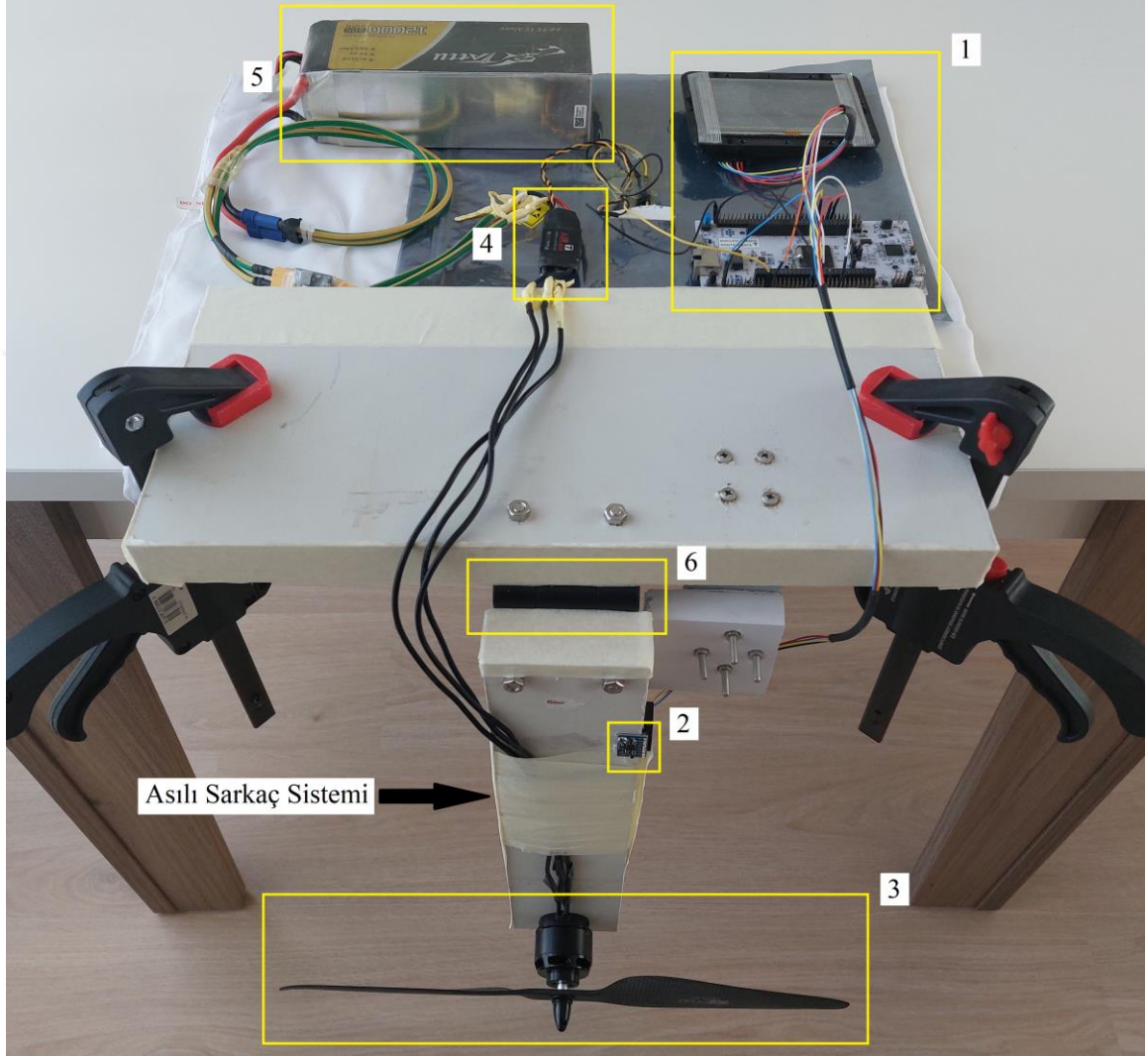
u_{eq} eşdeğer kontrol sinyali kullanılmayıp, u_{sw} anahtarlama kontrol sinyaline yüzeye çekme görevine ek olarak yüzeyde tutma görevinin de eklenmesiyle elde edilen u kontrol sinyali aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$u \approx u_{sw} = \begin{cases} u_{max} & ; s > \delta \\ u_{max} \tanh(s/\delta) & ; \delta > s > -\delta \\ -u_{max} & ; -\delta > s \end{cases} \quad (2.5)$$

Eşitlikte yumuşatma fonksiyonu olarak “tanh” fonksiyonu kullanılmıştır. Yüzeyin δ kadar yakınlarında sürekli ve yumuşak bir sinyal olup dışında ise süreksiz sinyal elde edilmektedir. Uygulamalarda genel olarak deneme-yanılma yöntemi ile belirlenen δ sınır tabaka kalınlığı kontrolcünün gürbüzlüğünü yok etmeyecek kadar küçük ancak tırlamayı da azaltacak kadar büyük seçilmelidir (Yiğit, 2021: 209-215).

3. DENEY DÜZENEGİ

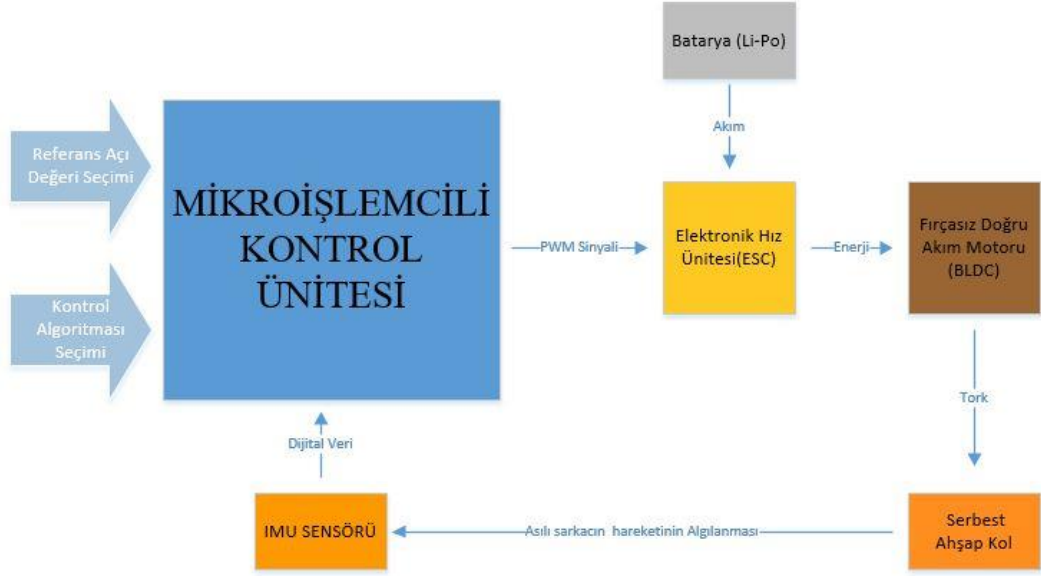
Bu başlık altında deney düzeneğinin bölümlerine yer verilerek sistemin çalışması açıklanmıştır. Şekil 3.1’de deney düzeneğinin genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 3.1. Deney düzeneği genel görünümü

Sistemin bölümlerinin yer aldığı Şekil 3.1’de 1 numaralı bölümde mikroişlemcili kontrol ünitesi, 2 numaralı bölümde IMU sensörü, 3 numaralı bölümde fırçasız doğru akım motoru ve pervanesi, 4. bölümde elektronik hız ünitesi (ESC), 5 numaralı bölümde batarya ve 6 numaralı bölümde ise tork ayarlı menteşe gösterilmiştir.

Deney düzeneğinin bölümlerinin arasındaki bağlantıların gösterildiği ve sistemin çalışma mantığının açıklandığı şemaya Şekil 3.2’de yer verilmiştir.



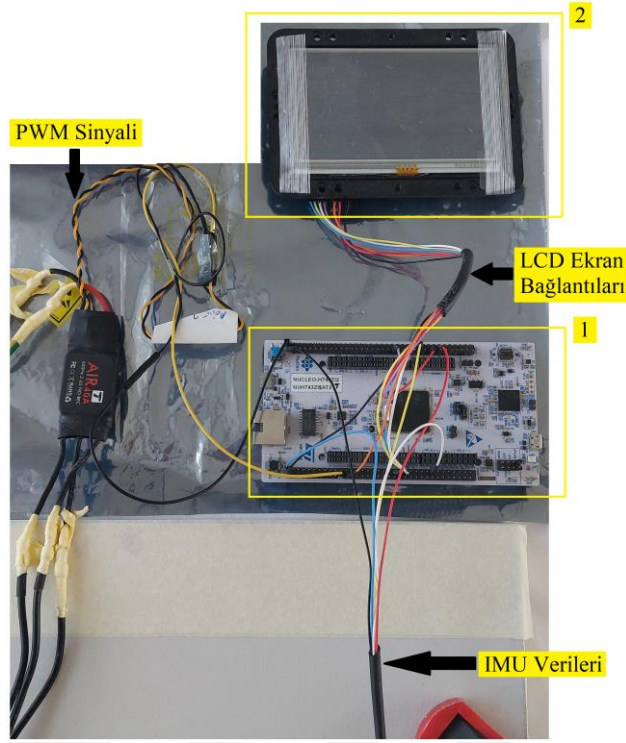
Şekil 3.2. Deney düzeneği genel şeması

Mikroişlemcili kontrol ünitesinde, referans açı değerinin (30 derece vb.) ve sistemin kontrol edilmesinde kullanılacak kontrol algoritmasının (1. mertebeden modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması vb.) kullanıcı tarafından seçilmesine olanak sağlanmaktadır. Mikroişlemcide, IMU sensöründen gelen dijital veriler değerlendirilerek asılı sarkacın açısı hesaplanmakta ve referans açı ile mevcut açı arasındaki fark kontrol algoritmasında kullanılıp çıkışta üretilecek olan PWM sinyalinin doluluk boşluk oranı (duty cycle) belirlenmektedir. Elektronik hız ünitesi sayesinde bataryadan alınan elektrik enerjisi mikroişlemciden gelen PWM sinyali ile sürülerek fırçasız doğru akım motoruna iletilmekte ve motorun devri ayarlanmaktadır. Asılı sarkaç üzerine monte fırçasız doğru akım motorunun devrine göre elde edilen tork sayesinde asılı sarkacın hareket etmesi sağlanmaktadır. Asılı sarkaç üzerinde yer alan IMU sensörü ile hareket algılanarak dijital veriler mikroişlemciye iletilmektedir.

Deney düzeneği bölümlerinin daha detaylı açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

3.1.MİKROİŞLEMCİLİ KONTROL ÜNİTESİ

Deney düzeneğini kontrol etmek için mikroişlemci tabanlı kontrol ünitesi oluşturulmuştur. Kullanıcıdan komut alınabilmesi(başla, dur vb.), kontrol algoritması değişkenlerinin girdi olarak alınabilmesi(lamda vb.), kontrol algoritmalarının(PID, Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritmaları vb.) uygulanması ve deney düzeneğinin sonuçlarının gözlemlenebilmesi için Şekil 3.3'te yer alan kontrol ünitesi oluşturulmuştur.



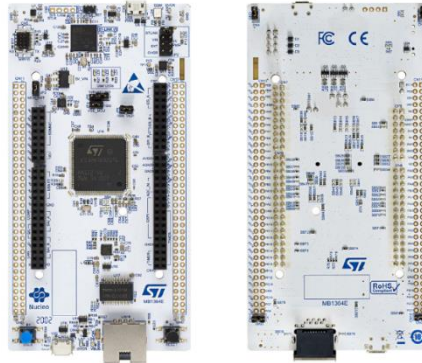
Şekil 3.3. Mikroişlemcili kontrol ünitesi

Şekil 3.3'te görüleceği üzere kontrol ünitesi 2 bölümden oluşmaktadır. 1 numaralı bölümde bünyesinde STM32H743 mikrodenetleyicisini barındıran NUCLEO-H743ZI2 Geliştirme Kiti yer almaktadır. 2 numaralı bölümde ise TFT tipinde LCD ekrana sahip FT800 Ekran Kiti görülmektedir.

Aşağıda kontrol ünitesinin bölümlerinin detaylı açıklamaları yapılmıştır.

3.1.1. Mikroişlemci Bölümü

Uygulamada Şekil 3.4'de yer verilen NUCLEO-H743ZI2 Geliştirme Kiti kullanılmıştır.



Şekil 3.4. NUCLEO-H743ZI2 Geliştirme Kiti (STMicroelectronics, t.y.)

Geliştirme kiti üzerinde STMicroelectrocis'e ait STM32H7 Serisi'nde yer alan STM32H743 mikrodnetleyicisi yer almaktadır. STM32H7 Serisi mikrodnetleyicilerde ARM tabanlı 32-bitlik işlemci olan ARM Cortex M7 işlemcisi ve çevresel birimler vardır. Geliştirme kitinde kod atma ve hata ayıklama işlemleri için STMicroelectronics'e ait STLINK-V3 hata ayıklama aracı yer almaktadır (STMicroelectronics, t.y.). Bu sayede USB kablosu ile bilgisayara bağlanılarak mikrodnetleyiciye kod atma ve hata ayıklama işlemi yapılabilir. Geliştirme kartının çalışması için gerekli olan elektriksel güç iki farklı yolla sağlanabilmektedir. USB kablo ile bilgisayara bağlanarak geliştirme kartı çalıştırılabileceği gibi harici bir güç kaynağı ile kablo bağlantısı sağlanarak da çalıştırılabilir (STMicroelectronics, t.y.).

STM32H743 mikrodnetleyicisinin genel teknik özellikleri Tablo 3.1'de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. STM32H743 Mikrodnetleyicisi Teknik Özellikleri (STMicroelectronics, t.y.)

İşlemci	32-bit Arm Cortex-M7
Memory(Bellek)	2MB'a kadar Flash 1MB'a kadar RAM
Üretici Paket Tipleri	168'e kadar Pin sayısı
Çalışma Frekansı	480 MHz'e kadar çalışabilme
Minimum Besleme Voltajı	1.62 V
Maximum Besleme Voltajı	3.6 V

STM32H743 mikrodnetleyicisi, IMU sensörü ile haberleşmeyi sağlayacak I2C haberleşme bölümü ve ESC'ye PWM sinyalini üretecek zamanlayıcı(timer) çevresel elemanlarını barındırmaktadır (STMicroelectronics, t.y.).

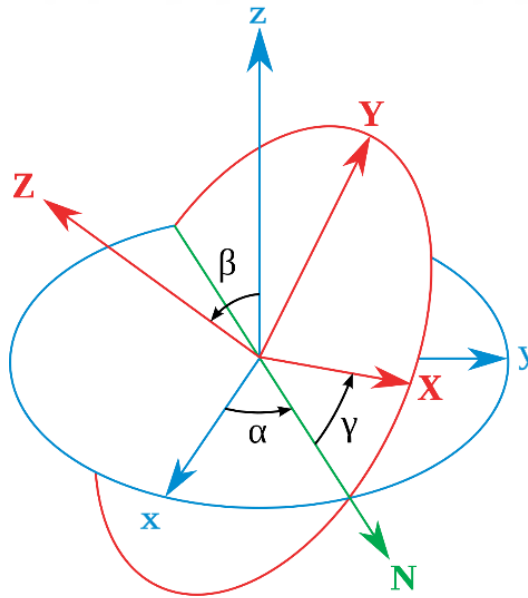
Mikroişlemcide, IMU verileri değerlendirilerek asılı sarkacın eğim açısı hesaplanmakta ve TFT LCD Ekran bölümünden iletilen komutlar doğrultusunda kontrol algoritmaları çalıştırılarak ESC ünitesine iletilen PWM Sinyali elde edilmektedir.

Eğim açısının hesaplanma yöntemi ve uygulanan kontrol algoritmalarının detayları aşağıda açıklanmıştır.

3.1.1.1. Eğim Açısının Hesaplanması

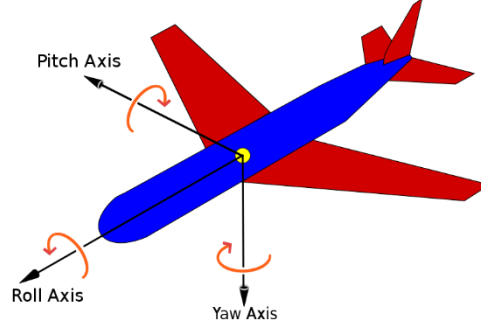
Günümüzde cisimlerin yönelimlerini açıklamak için çoğunlukla Euler açıları ve kuaterniyonlar kullanılmaktadır. Yönelim hesabında kullanılan Euler açıları ve kuaterniyonların birbirine üstünlük sağladığı durumlar vardır. Euler Açılı ile yönelim hesaplamalarında, dönme sırasında bazı durumlarda eksenlerin üst üste gelmesi durumunda özgürlük derecesi kaybı yaşanır. Rotasyon 2 boyutlu uzaya sıkışmak durumunda kalır. Bu olaya “Gimbal Lock” denilmektedir. Kuaterniyonlar 4 boyutlu vektör olarak tanımlanmakta ve “Gimbal Lock” sorunu ile karşılaşılmamaktadır. Kuaterniyonlar ise Euler Açılına göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Fiziksel olarak açıların algılanması daha zordur. Uygulamada tek eksende hareket ve açı ölçümü yapılmaktadır. Bu ekseninde “Gimbal Lock” sorunu yaşanmadığı için Euler Açılı ile yönelim hesabı tercih edilmiştir.

Euler teoreminde, cismin tek bir eksen etrafında tek bir dönüş yapması dönme hareketi olarak ifade edilmektedir. Yönelme ise üç ardışık dönme hareketi ile ifade edilir. Artarda aynı ekseninde dönmeyeceği düşünüldüğünde 12 farklı sıralama ile yönelim tahmini yapılabilmektedir (XYZ, XZY, XYX,). Literatürde en sık kullanılan sıralama ZYX dönme sırasıdır. Her ekseninde yapılan dönüşler belli açıları ile tanımlanır. Şekil 3.5’te klasik Euler açıları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Klasik Euler Açılı (Euler angles, t.y.)

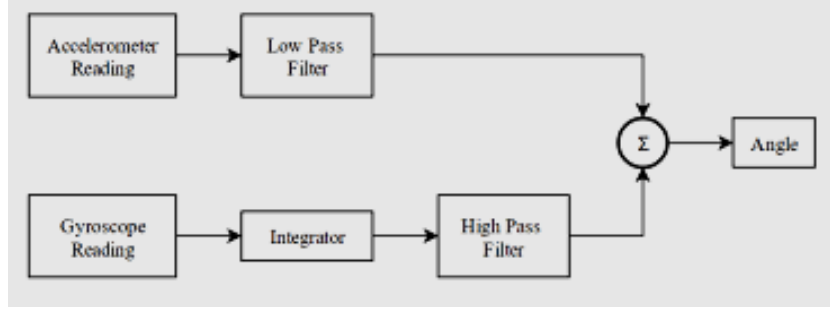
Havacılık sektöründe Şekil 3.6’da görülen Euler açılarının özelleşmiş bir versiyonu olan “Yaw, Pitch, Roll” açıları sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Havacılık Sektöründe Euler Açıları (Euler angles, t.y.)

IMU sensörlerinden elde edilen ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre verileri kullanılarak bir cismin uzaydaki yönelimi elde edilir. Yaw, pitch ve roll açıları IMU sensörlerinden elde edilen veriler sayesinde hesaplanmaktadır. Cismin yönelimindeki ivmelenme ivmeölçerle, açısal hızı jiroskopa ve Dünya'nın manyetik alan bilgileri ise manyetometreyle hesaplanır (Urmat, 2015: 2 ve 29). Jiroskoptan elde edilen veriler yüksek gürültü ortamlarında hatalı sonuçlar doğurmaktadır (Çakıcı, 2019: 21). İvmeölçerden elde edilen veriler ise titreşimlere karşı çok duyarlıdır ve sonuçlarında bozulmalar oluşturmaktadır (Albaghdadi ve Ali, 2019: 71-77). Manyetometre verileri ise ortamındaki manyetik gürültülerden ve ferromanyetik malzemelerden etkilenir (Urmat, 2015: 2 ve 29). Üç sensör verileri birlikte kullanılarak en doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılır. Sadece jiroskoptan elde edilen açısal hız verileri kullanılarak açı değişimi hesapları yapılabilir. Ancak jiroskopların "drift" özelliği vardır. Bu yüzden sadece jiroskop kullanılarak hesaplanan açı değerleri zamanla kayma yapar. Bu kaymaları düzeltmek için bazı filtreler kullanılmaktadır. Tamamlayıcı filtre ve kalman filtre bunlardan bazılarıdır. Yapılan çalışmalarda tamamlayıcı filtrenin sonuçlarının kalman filtre sonuçlarına göre iyi olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, tamamlayıcı filtrenin daha basit algoritmaya sahip olması gömülü uygulamalarda kullanıma daha uygun olmasını sağlamaktadır (Perez Paina vd., 2011: 205-215). Uygulamada tamamlayıcı filtre tercih edilmiştir.

Tamamlayıcı filtre, Jiroskop üzerinden alınan verileri ivmeölçerden gelen veriler ile düzenleyerek roll ve pitch yönelim açılarını düzenler. Yine, jiroskoptan gelen veriler manyetometreden gelen veriler ile düzeltilerek yaw yönelim açısı belirlenir. Ancak, uygulamada sadece roll yönelim açısı gereklidir. Bu sebeple içerisinde sadece ivmeölçer ve jiroskop sensörlerini barındıran MPU-6050 sensör birimi tercih edilmiştir. Uygulamada, jiroskop ve ivmeölçer değerlerine tamamlayıcı filtre uygulanıp roll açısı elde edilmektedir. Şekil 3.7'de tamamlayıcı filtrenin çalışma mantığı anlatılmıştır.



Şekil 3.7. Tamamlayıcı Filtre (Venkata, 2016)

Tamamlayıcı filtre (3.1) eşitliğindeki gibi formülize edilmektedir. α değeri uygulamaların davranışına uygun olarak belirlenmektedir.

$$açı = \alpha \times (açı + jiroskopDeğeri \times \Delta t) + (1-\alpha) \times İvmeölçerDeğeri \quad (3.1)$$

3.1.1.2. Kontrol Algoritmalarının Uygulanması

Uygulamada 3 farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. PID kontrol algoritmasının yanı sıra 2 farklı Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol algoritması uygulanmıştır. 2021 yılında Ankara 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi'nde yayınlanan bildiriye pratik bir modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması önerilmiştir (Yiğit, 2021: 209-215). Bu bildiriye, birinci mertebeden kayma yüzeyi ve ikinci mertebeden kayma yüzeyi için çözümler tanıtılmıştır. Bildiriye tanıtılan teknikler, uygulamada ise “1. Mert. KKK” ve “2. Mert. KKK” olmak üzere 2 farklı kontrol algoritması olarak kullanılmıştır.

IMU sensörü sayesinde hesaplanan asılı sarkacın eğim açısı ile referans eğim açısı arasındaki farktan elde edilen hata değerinin girdi olarak kullanıldığı kontrol algoritmalarının uygulanmasıyla fırçasız doğru akım motorunun (BLDC) hareketi için gereken PWM sinyalinin büyüklüğü hesaplanır. Hesaplanan PWM değeri ESC'ye iletilir.

Fırçasız doğru akım motoru ve ESC ünitesinin çalışma prensipleri doğrultusunda; mikroişlemci tarafından bir saniyede 500 ila 700 arasında örnek toplanmakta ve çıkış PWM sinyali bu sıklıkla güncellenmektedir.

3.1.2. TFT LCD Ekran Bölümü

Kullanıcıdan komut alınabilmesi, kontrol parametrelerinin değiştirilebilmesi ve sistemin izlenebilmesi için TFT tipinde LCD ekrana sahip FT800 Ekran Kiti kullanılmıştır.

Özgün olarak tasarlanan kullanımı kolay arayüz ile kullanıcıdan alınan komutlar mikroişlemciye iletilmekte ve mikroişlemcide işlenen veriler ekran kiti yoluyla kullanıcıya sunulmaktadır. Geliştirilen arayüzün açılış sayfası Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Arayüz açılış sayfası

Arayüz içeriğinde Şekil 3.9’da görülen a) ana ekran sayfası, b) parametre sayfası ve c) değer atama sayfaları yer almaktadır.

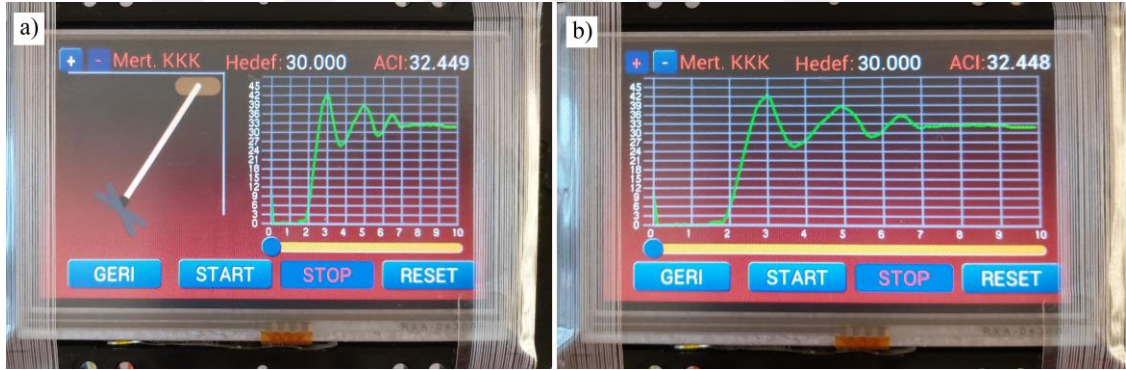


Şekil 3.9. Arayüz sayfaları: a) Ana ekran b) Parametre sayfası c) Değer atama sayfası

Ana ekran sayfası incelendiğinde sol üst kısımda kontrol algoritması seçimi ve sağ üst kısımda ise referans açığı seçimi yer almaktadır. Ayrıca seçilen açığın karşısında asılı

sarkacın anlık açısı yansıtılmaktadır. Sol alt kısımda sistem sayfasına giriş butonu yer alırken sağ alt kısımda ise komutlar yer almaktadır. Bu komutlar ile fırçasız doğru akım motoruna PWM sinyali iletimi başlatıp durdurabilirken kalibrasyon butonu ile de IMU sensörü kalibre edilebilmektedir. Parametre sayfasında kontrol algoritmasının parametreleri yer almaktadır. Bu parametrelerde değişiklik yapmak istediğimizde değer atama sayfasına yönlendirilmekte ve yeni değer atamaya imkân sağlanmaktadır. Ana ekran sayfasında seçilmek istenen kontrol algoritma butonuna kısa süreli dokunulduğunda seçim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Kontrol algoritması butonuna uzun süreli basıldığında ise o algoritmanın bilgilerini içeren parametre sayfasına geçiş yapılabilmektedir. Parametre sayfasında ise parametre adının yer aldığı butona basıldığı takdirde o parametreye değer atama sayfasına geçiş yapılabilmektedir. Geri butonları kullanılarak bir önceki sayfaya dönüş yapılabilmektedir.

Ana ekran sayfasında sistem butonuna basıldığında Şekil 3.10’ da yer alan sayfalara erişilebilmektedir.



Şekil 3.10. Arayüz sistem sayfaları: a) Asılı sarkacın hareketlerinin ve açısının gözlemlenmesi b) Asılı sarkacın açısının gözlemlenmesi

Sistem butonuna basıldığında direkt olarak Şekil 3.10 ‘ da görülen a) asılı sarkacın hareketlerinin ve açısının gözlemlenmesi sayfasına yönlendirilmektedir. Bu sayfa içerisinde sol kısımda asılı sarkacın hareketi simüle edilmekte ve gözlemlenmekte iken sağ kısımda asılı sarkacın açısının grafiği yansıtılmaktadır. Sayfa içerisinde sol üst kısımda yer alan “+” butonuna basıldığında b) asılı sarkacın açısının gözlemlenmesi sayfasına geçiş yapılmakta ve ekranda sadece açı grafiği daha geniş bir şekilde gösterilmektedir. Hareketin de gözlemlendiği önceki sayfaya tekrar geçiş yapılabilmesi için “-” butonu kullanılmaktadır. Geri butonu ile de ana ekran sayfasına dönülebilmektedir.

3.2.IMU SENSÖRÜ

Uygulamada eğim açısını ölçmek için IMU(Inertial Measurement Unit) kullanılmıştır. IMU, yapısında 3 eksenli algılayıcıları (ivmeölçer, jiroskop, manyetometre vb.) barındıran ataletsel ölçme birimidir. Günümüzde hava araçları, giyilebilir teknolojiler ve elektronik cihazlar(telefon, tablet PC vs.) gibi birçok alanda IMU'lar kullanılmaktadır.

Uygulamada InvenSense firmasının MPU-6050 sensör modülü IMU olarak kullanılmıştır. MPU-6050 ünitesinde 3 eksenli ivmeölçer ve 3 eksenli jiroskop bulunmaktadır. IMU'larda Serbestlik derecesi DOF (Degrees of Freedom) olarak ifade edilmektedir. MPU-6050'de 3 eksenli İvmeölçer ve 3 eksenli jiroskop bulunduğundan 6 DOF IMU olarak ifade edilmektedir.

MPU-6050, hem ivmeölçer hem de jiroskop için her ekseninde 16 bitlik çözünürlük ile çıkış verebilmektedir. Uygulamada, I2C ile bu ham veriler mikrodenetleyici tarafından alınmakta ve işlenmektedir. Mikrodenetleyici tarafından uygulanan işlemler ile bu ham verilerden istenilen eğim açısı elde edilmektedir.

Şekil 3.11'de MPU-6050 sensör birimine ve Tablo 3.2'de ise elektriksel ve fiziksel özelliklerine yer verilmiştir.



Şekil 3.11. MPU-6050 Sensör Birimi (InvenSense Inc.,t.y.)

Tablo 3.2. MPU-6050 Sensör Birimi Teknik Özellikleri (InvenSense Inc.,t.y.)

Çalışma Voltajı	2.375-3.46 V
Normal Çalışma Akımı	3.9 mA
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40 +85 °C
İletişim	I2C
Gyro Hassasiyet Aralığı	$\pm 250^\circ/s$, $\pm 500^\circ/s$, $\pm 1000^\circ/s$, $\pm 2000^\circ/s$

İvmeölçer Hassasiyet Aralığı	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Boyutlar	15.6 mm * 20.3 mm

3.3.FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU VE PERVANESİ

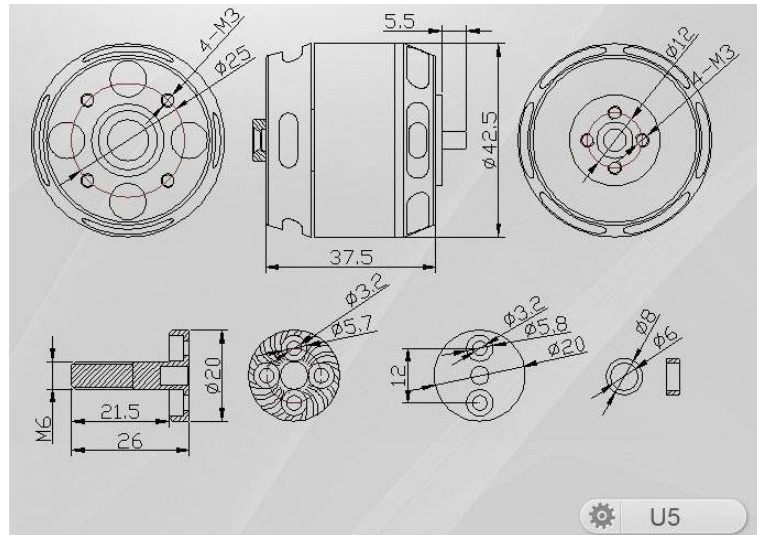
Fırçasız doğru akım motorları(BLDC), yüksek hız kabiliyetleri ve düşük ataletlerine ek olarak fırçalarının bulunmaması sebebiyle hassas hız kontrolü gerektiren birçok uygulamada kullanılmaktadır (Gedikpınar ve Güldemir, 2002: 273-279).

Uygulamada Şekil 3.12’de görülen motor kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Fırçasız Doğru Akım Motoru (Promodel Ltd. Şti., t.y.)

Motorun teknik çizimi Şekil 3.13 ve teknik özellikleri Tablo 3.3’de görülmektedir.

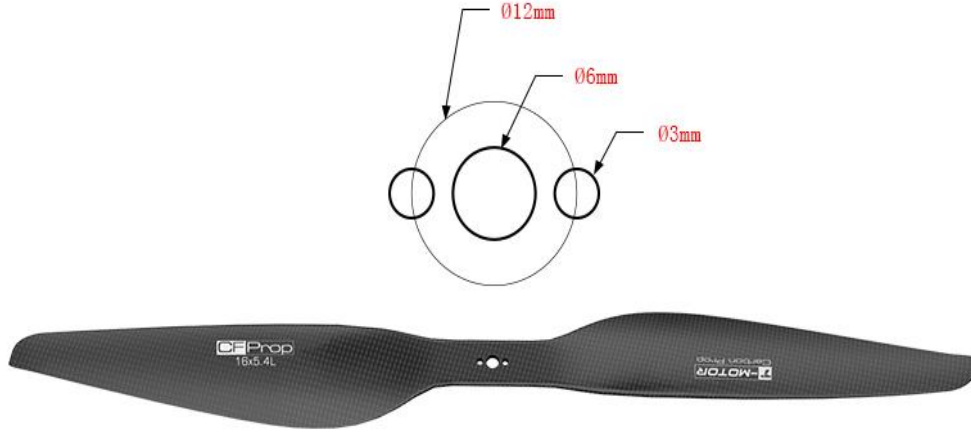


Şekil 3.13. Fırçasız Doğru Akım Motoru Teknik Çizimi (Promodel Ltd. Şti., t.y.)

Tablo 3.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru Teknik Özellikleri (Promodel Ltd. Şti., t.y.)

Konfigurasyon	12N14P
Şaft çapı	5mm
Ağırlık	156 gr
Internal Resistance	116 mΩ
Maksimum Sürekli Akım(A) 180S	30 A
Maksimum Sürekli Güç(W) 180S	850 W
Maksimum Verimlilik Akımı	(10-18A) >84%

Uygulamada tercih edilen pervane Şekil 3.14’te yer almaktadır.



Şekil 3.14. Fırçasız Doğru Akım Motoru Pervanesi (T-motor. ,t.y.)

3.4.ELEKTRONİK HIZ ÜNİTESİ(ESC)

Fırçasız doğru akım motorlarında anahtarlama işlemi, fırçalı motorlardan farklı olarak elektronik olarak yapılmaktadır. Elektronik anahtarlama işlemi ise elektronik hız devreleri(ESC) ile gerçekleştirilmektedir (Merç ve Bayılmış, 2011: 18-20).

Uygulamada, elektronik hız ünitesi mikroişlemci tarafından iletilen PWM sinyali ile orantılı olarak motora güç aktarımı yapmaktadır. Elektronik hız ünitesinin beklediği PWM sinyalinin puls uzunluğu 1 milisaniye ile 2 milisaniye aralığında olması

gerekmektedir. PWM sinyalinin dijital olarak “high” (1) olduğu zaman dilimi 1 milisaniye iken motora güç aktarımı yapılmamakta, 2 milisaniye iken ise tam güç aktarımı yapılmaktadır.



Şekil 3.15. Elektronik Hız Ünitesi (Promodel Ltd. Şti., t.y.)

Uygulamada kullanılan elektronik hız ünitesi Şekil 3.15’ de gösterilirken teknik özelliklerine Tablo 3.4’te yer verilmiştir.

Tablo 3.4. Elektronik Hız Ünitesi Teknik Özellikleri (Promodel Ltd. Şti., t.y.)

Sürekli akım	40 A
Burst akım	60 A (10 sn.)
Çalışma voltajı	2S – 6S
Ölçüler	68 x 25 x 8.7mm
Ağırlık	26 gr

3.5.BATARYA

Uygulamada kullanılan fırçasız doğru akım motoru ve elektronik hız ünitesine uygun olarak seçilen Lityum Polimer batarya Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Lityum Polimer Batarya (Grepow Inc., (t.y.)

Tercih edilen Lityum Polimer bataryanın teknik özelliklerine Tablo 3.5’de yer verilmiştir.

Tablo 3.5. Lityum Polimer Batarya Teknik Özellikleri (Grepow Inc., (t.y.)

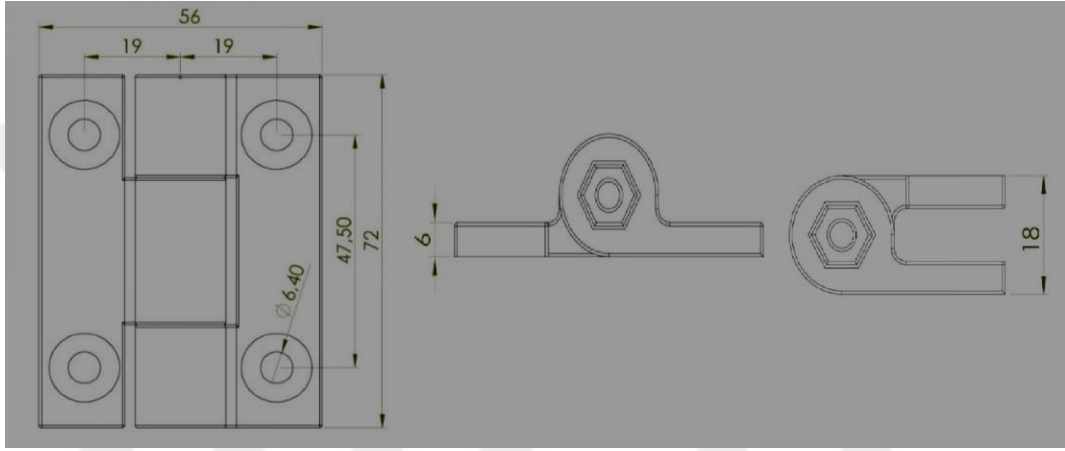
Kapasite	12000 mAh
Voltaj	22.2 V
Deşarj oranı	15 C
Maksimum Anlık Deşarj oranı	30 C
Ağırlık	1532 gr ±50 gr
Uzunluk	190 mm
Genişlik	71 mm
Yükseklik	54 mm
Balans Konnektör Tipi	JST-XHR

3.6.TORK AYARLI MENTEŞE

Uygulamada, asılı sarkaç ile sabit parça arasında tork ayarlı menteşe kullanılmıştır. Asılı sarkaç üzerinde fırçasız doğru akım motoru çalıştığından bağlantı noktasına yüksek düzeyde kuvvet binmektedir. Hem üzerine binen yüke dayanabilecek hem de titreşimleri sönmüleyebilecek özel bir menteşeye ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulamada Şekil 3.17’de görüleceği üzere ayarlı tork menteşe tercih edilerek şasenin çalışma esnasında minimum sarsıntıya maruz kalması hedeflenmiştir. Menteşenin fiziksel özelliklerine Şekil 3.18’de yer verilmiştir.



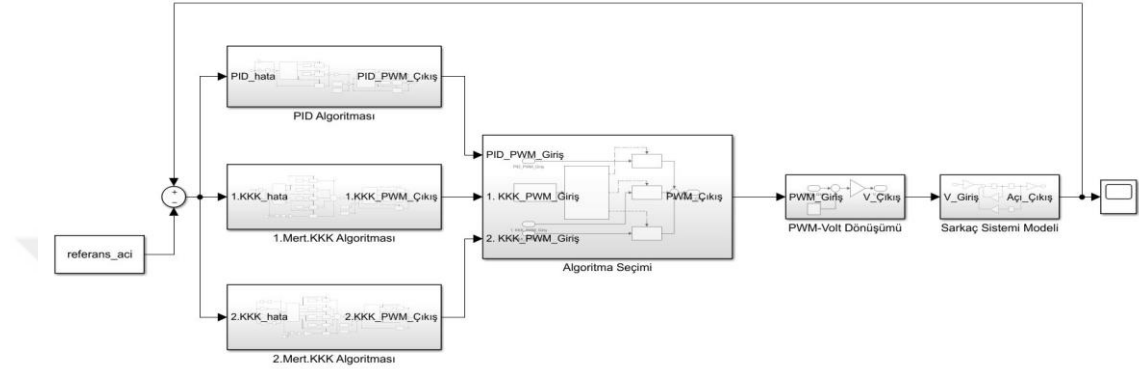
Şekil 3.17. Tork ayarlı menteşe (Mensan Menteşe Ltd. Şti., t.y.)



Şekil 3.18. Tork ayarlı menteşe boyutları (Mensan Menteşe Ltd. Şti., t.y.)

4. SİSTEMİN MODELLEMESİ

Deney düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sistemin benzetiminin yapılabilmesi için matematiksel modelinin çıkarılması gerekir. Deney düzeneğinde yer alan serbest ahşap kol bölümü asılı sarkaç sistemi olarak modellenmektedir. Şekil 4.1’de sistemin benzetimi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin Matlab/Simulink benzetimi

Referans açısı ile ölçülen açının farkı kontrol algoritmalarına iletilmektedir. Uygulanacak kontrol algoritması seçimi sonucunda oluşan çıkış sinyali sarkaç sistemine yönlendirilmektedir. Girişindeki sinyalin değerine göre sarkacın çıkışında gözlemlenen açı sistemi geri beslemekte ve döngü tekrarlanmaktadır.

Sarkaç sisteminin modelinin elde edilmesi ve kontrol algoritmalarının modellenmesi aşağıda açıklanmıştır.

4.1. SARKAÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Sarkaç sisteminin modellenmesi 2009 yılında yapılan tez çalışmasında sistemin basamak cevabı kullanılarak elde edilmiştir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60). Uygulamada, sarkaç sisteminin matematiksel modelini elde etmek için kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir.

Asılı sarkacın matematiksel modeli (4.1) eşitliği ile belirtilmiştir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

$$j \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + m_L g d \sin \theta = T \quad (4.1)$$

(4.1) eşitliğinden $\ddot{\theta}$ çekildiğinde

$$\ddot{\theta} = \frac{c}{j} \dot{\theta} - \frac{m_L g d}{j} \sin \theta + \frac{T}{J} \quad (4.2)$$

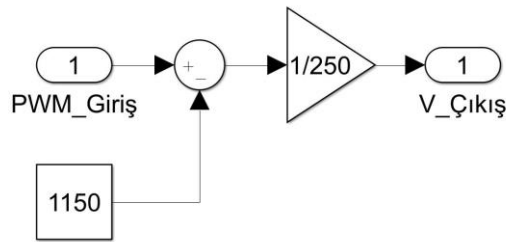
$$u = \frac{T}{J} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. (4.3) eşitliğinde yer alan T ifadesi, asılı sarkaçta yer alan fırçasız doğru akım motorunun pervanesinin oluşturduğu kuvvetten kaynaklanan tork kuvvetidir. (4.3) eşitliği pervanesinin oluşturduğu F kuvveti cinsinden

$$u = \frac{F \left(\frac{1}{2}L + d \right)}{J} \quad (4.4)$$

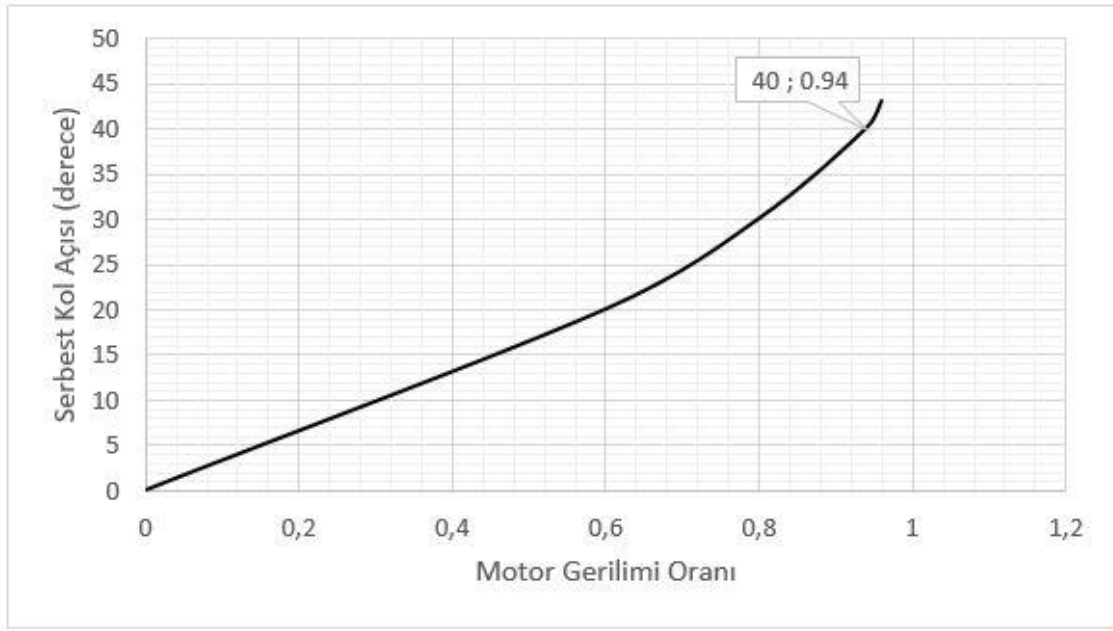
şeklinde tekrardan düzenlenebilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

Uygulamada asılı sarkacın hareketini sağlayacak gerekli tork motorun pervanesi tarafından sağlanmaktadır. Mikroişlemci tarafından motora sağlanan PWM sinyali ile pervanesinin sağladığı tork arasındaki transfer fonksiyonu deneysel yolla elde edilmiştir. Motora farklı PWM değerleri uygulanarak, o değerlere karşılık gelen açı değerleri elde edilmiştir. Fırçasız doğru akım motorlarına güç aktaran elektronik hız üniteleri(ESC)'ne uygulanan PWM sinyalinin dijital olarak "1" olduğu zaman dilimi 1000 milisaniye ile 2000 milisaniye aralığında değişmektedir. Uygulamada asılı sarkaç 0 ile 45 derece arasında çalışacak şekilde motora güç aktarımı yapılmaktadır. Bu derece aralığı için motora aktarılması gereken PWM sinyalinin dijital olarak "1" olduğu aralık 1150 milisaniye ile 1400 milisaniye aralığında olmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir. 1150 milisaniye değeri 0 birim olarak 1400 milisaniye değeri ise 1 birim olarak referans alındığında sisteme uygulanan PWM değerinin temsili değeri Şekil 4.2'de görüleceği üzere hesaplanmaktadır.



Şekil 4.2. PWM-Volt Dönüşümü

Şekil 4.2'deki hesaplamalar göz önüne alınarak deneysel sonuçlar ile elde edilen karakteristik eğri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Sarkaç sistemi karakteristik açı-güç eğrisi

Grafik incelendiğinde sistemin yaklaşık olarak doğrusal bir karakteristiği olduğu gözlemlenmektedir. 0 ile 40 derece aralığında sistemin doğrusal olduğu kabul edildiğinde sisteme uygulanan gerilim ile sistemde oluşan tork arasında sabit bir oran olduğu varsayılır. Bu sayede sisteme uygulanan PWM sinyali(gerilim) ile sistemde oluşan tork arasındaki ilişki

$$T = K_m V \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilebilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60). Bu ifade (4.1) eşitliğinde yerine konulduğunda sistemin denklemi

$$j \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + m_L g d \sin \theta = K_m V \quad (4.6)$$

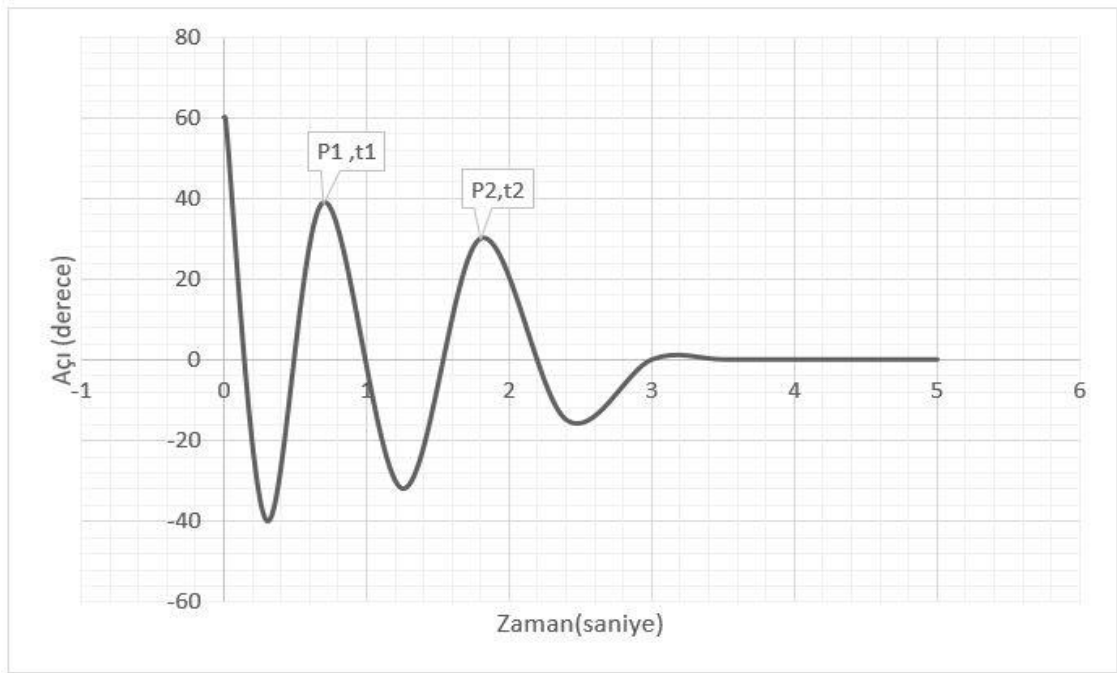
olarak elde edilir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60). Bu ifade göz önüne alınarak sistemin giriş büyüklüğü gerilim olarak düşünüldüğünde lineer bölge için geçerli olan sistemin transfer fonksiyonu (4.7) eşitliğinde gösterilirken ikinci dereceden bir sistemin transfer fonksiyonu ise (4.8) eşitliğinde belirtilmiştir.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_m}{j}}{s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_L g d}{j}} \quad (4.7)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K (\omega_n)^2}{s^2 + 2 \zeta \omega_n s + (\omega_n)^2} \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliğinde ζ sönüm oranını, ω_n doğal frekansı belirtir. Bu değerler bilindiği takdirde transfer fonksiyonu çıkarılabilmektedir. Elde edilen transfer fonksiyonu ile asılı sarkacın lineer modeli karşılaştırılarak lineer modeldeki parametrelere ulaşılır (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

Deneysel yolla ζ , ω_n ve K_m değerlerini elde etmek için asılı sarkacın 60 derecelik konumdan serbest bırakılmasıyla elde edilen açı eğrisi Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4. Asılı sarkacın 60 dereceden serbest bırakılmasıyla elde edilen açı eğrisi

Salınımın iki tepe noktasının genlik, zaman ve iki tepe arasındaki tepe sayısı değerleri ölçülerek ζ ve ω_n değerleri hesaplanır (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

$$P_1 = 39 \text{ derece} \quad t_1 = 0.7 \text{ saniye}$$

$$P_2 = 30 \text{ derece} \quad t_2 = 1.8 \text{ saniye} \quad (4.9)$$

$$N = 1$$

Sönüm frekansı (4.10) eşitliği, sönüm oranı (4.11) eşitliği ve doğal frekans (4.12) eşitliği ile hesaplanır.

$$\omega_d = \frac{2N\pi}{(t_2 - t_1)} = \frac{2.1 \cdot \pi}{(1.8 - 0.7)} = 5.7119 \text{ rad/saniye} \quad (4.10)$$

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\sqrt{4\pi^2 N^2 + \left[\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)\right]^2}} = 0.0417 \quad (4.11)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = 5.7168 \text{ rad/saniye} \quad (4.12)$$

Elde edilen ζ ve ω_n değerleri kullanılarak ikinci dereceden bir karakteristik denklem oluşturulup, asılı sarkacın karakteristik fonksiyonu ile karşılaştırıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$s^2 + 2\zeta\omega_n + (\omega_n)^2 = s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_L g d}{j} \quad (4.13)$$

$$(\omega_n)^2 = \frac{m_L d g}{j} \quad (4.14)$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{c}{j} \quad (4.15)$$

(4.14) ve (4.15) eşitliklerini kullanarak j ve c değerleri hesaplamak için gerekli m_L değeri (asılı sarkacın kütlesi) 1.3 kg, d değeri (askı noktasının ağırlık merkezine uzaklığı) 0.2 m ve yerçekimi ivmesi g değeri 9.81 m/s²'dir. Bu değerler hesaba katıldığında aşağıdaki değerler elde edilir.

$$J = \frac{m_L g d}{(\omega_n)^2} = \frac{1.3 \times 0.2 \times 9.81}{5.7168^2} = 0.07796 \text{ kg m}^2 \quad (4.16)$$

$$c = 2\zeta\omega_n J = 2 \times 0.0417 \times 5.7168 \times 0.07796 = 0.037 \text{ Nms/rad} \quad (4.17)$$

Asılı sarkaca sabit bir gerilim uygulandığında, sarkaç belirli bir açıya gelecek ve bir süre sonra kararlı hale gelerek orada duracaktır. Kararlı haldeki bu açı (Θ_{ss}) sabit olduğunda denklemlerin türevsel durumları sıfır olacaktır. Bu durum (4.6) eşitliğinde uygulandığında (4.18) deki eşitlik elde edilecektir (Kızmaz, 2009: 12-17 ve 54-60).

$$\theta = \theta_{ss}$$

$$\dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0 \quad (4.18)$$

$$m_L g d \sin \theta_{ss} = K_m V$$

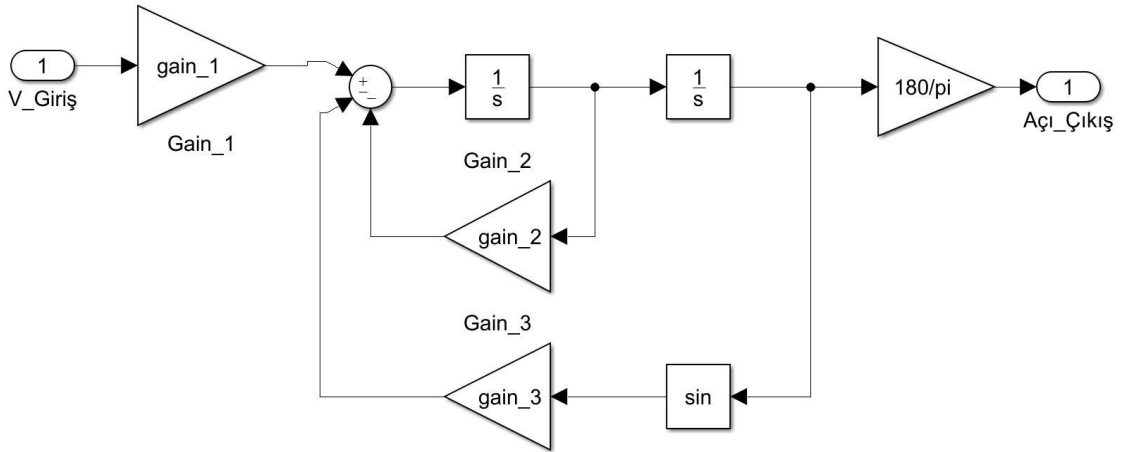
K_m değerini hesaplamak için Şekil 4.3' te yer alan parametreler kullanılarak θ_{ss} değeri 40 derece ve V değeri 0.94 olarak seçilmiştir. Bu değerler yerine yazıldığında

$$K_m = \frac{m_L g d \theta_{ss}}{V} = \frac{1.3 \times 9.8 \times 0.2 \times 40 \times \left(\frac{\pi}{180}\right)}{0.94} = 1.8923 \quad (4.19)$$

Elde edilen veriler ve sistemin sabit değerleri kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_m}{j}}{s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_L g d}{j}} = \frac{24.2727}{s^2 + 2.107s + 32.6834} \quad (4.20)$$

Sisteme gerilim uygulandığında elde edilen açı radyan cinsinden olmaktadır. Bu sebeple çıkışın $180/\pi$ ile çarpılmasıyla açı derece cinsine çevrilmiş olmaktadır. Şekil 4.5'te sarkaç sisteminin simulink ortamındaki benzetimi görünmektedir.



Şekil 4.5. Sarkaç sistemi Matlab/Simulink benzetimi

Şekil 4.5'te yer alan gain parametrelerinin ve yukarıda hesaplanan parametrelerin Matlab/Simulink ortamındaki atamaları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

```

8 % Sarkaç Sistemi Modelleme Parametreleri
9 Km=1.8923 ;
10 j= 0.07796;
11 c= 0.03736;
12 mL= 1.3;
13 d= 0.2;
14 g=9.8 ;
15 pi=3.14;
16 gain_1 = Km/j;
17 gain_2 = c/j;
18 gain_3 = mL*d*g/j;

```

Şekil 4.6. Matlab/Simulink benzetiminde sarkaç sistemi modelleme parametreleri

4.2.KONTROL ALGORİTMALARI

Uygulamada 3 farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. Mikroişlemci ile uygulanan kontrol teknikleri ve yöntemleri birebir benzetime yansıtılmıştır. Mikroişlemcide kullanılan kontrol algoritması parametre değerleri ile benzetimde kullanılan değerler aynı yapılmıştır.

PID ve modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritmalarının detayları aşağıda belirtilmiştir.

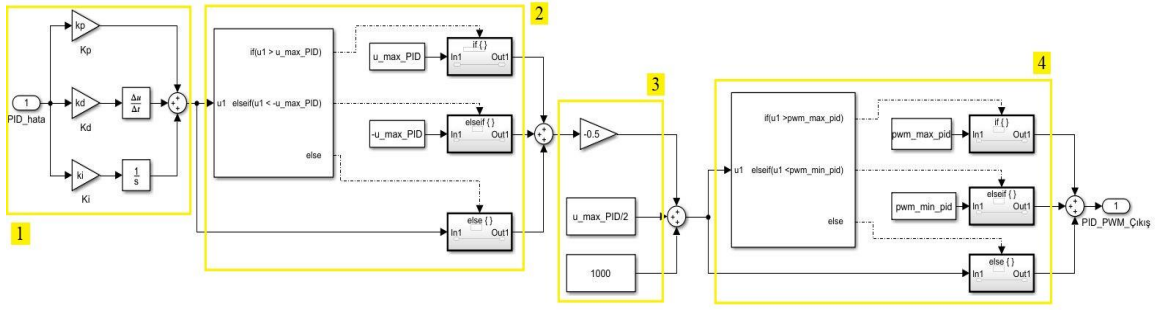
4.2.1. PID Algoritması

PID kontrolcü birçok alanda kullanılan, kullanımı kolay ve genelde tatminkâr sonuçlar veren bir kontrolcüdür. PID kontrolcü temel olarak oransal(P), integral(I) ve türevsel(D) olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.21)$$

$e(t)$ hata sinyalini, K_p oransal kazancı, K_i integral kazancını ve K_d türevsel kazancı ifade etmektedir. İstenilen sonuçları elde etmek için bu katsayılar çeşitli tekniklerle ayarlanarak kontrolcü tasarlanır. Bu kazançları elde ederken deneme yanılma yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır (Kalaycı ve Yiğit, 2015: 131-142; Yiğit, 2017: 1645-1662).

Şekil 4.7’de PID algoritması benzetimi görülmektedir.



Şekil 4.7. PID algoritması benzetimi

Şekil incelendiğinde 1 numaralı bölümde hata sinyaline PID algoritması uygulanmakta ve çıkışında u sinyali elde edilmektedir. 2 numaralı bölümde ise u sinyalinin uç değerlerinin önüne geçilerek belirli bir aralıkta kalması sağlanmaktadır. 3 numaralı bölümde u sinyali fırçasız doğru akım motoru ve Elektronik Hız Ünitesi(ESC)'nin çalışma aralığına uygun PWM sinyali haline dönüştürülmektedir. 4 numaralı bölümde ise nihai PWM sinyalinin uç değerleri yok edilerek asılı sarkaç sisteminde kullanıma hazır hale gelmektedir.

Benzetimde kullanılan PID kazanç değerleri, u sinyali sınır değerleri ve PWM sinyali sınır değerleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

```

20 % PID Algoritması Değişkenleri
21 - kp = 1;
22 - ki = 10;
23 - kd = 1.5;
24 - u_max_PID = 580;
25 - pwm_max_pid = 1400;
26 - pwm_min_pid = 1150;
27

```

Şekil 4.8. PID algoritması parametreleri

4.2.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması

2021 yılında Ankara 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi'nde yayınlanan bildiri (Yiğit İ., 2021) önerilen modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması uygulamada kullanılmıştır. Bildiri birinci mertebeden kayma yüzeyle hata cinsinden

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (4.22)$$

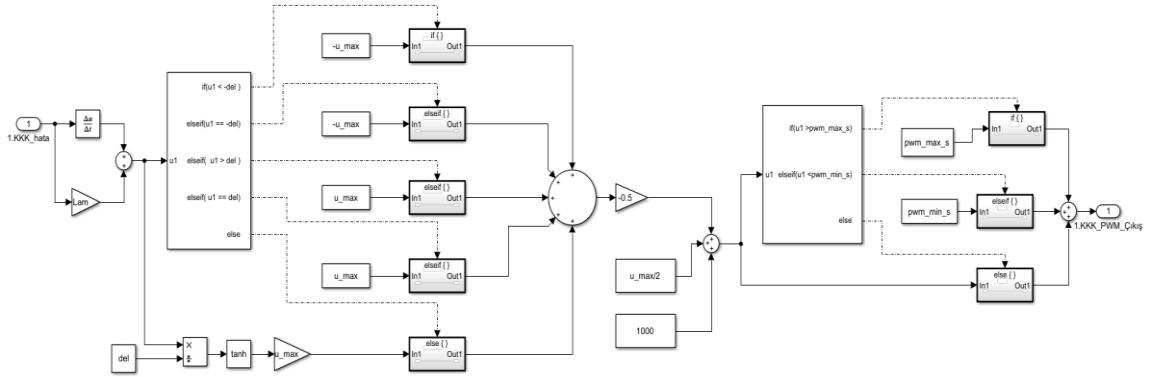
şeklinde ifade edilmiştir (Yiğit, 2021: 209-215).

Bildiride u sinyali aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Yiğit, 2021: 209-215).

$$u = \begin{cases} u_{max} & ; s > \delta \\ u_{max} \tanh(s/\delta) & ; \delta > s > -\delta \\ -u_{max} & ; -\delta > s \end{cases} \quad (4.23)$$

Sınır tabaka kalınlığı δ değeri tırlamayı azaltacak kadar büyük ve kayan kipli kontrolün gürbüzlüğü yok etmeyecek kadar küçük olacak şekilde genelde deneme-yanılma yöntemi ile belirlenir (Yiğit, 2021: 209-215).

Uygulamadan tercih edilen birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritmasının benzetimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması benzetimi

Şekilde ilk bölümde hata sinyaline kontrol algoritması uygulanmaktadır. Devamındaki bölümlerde ise daha önce de açıklandığı gibi u sinyalinin elektronik hız ünitesinin çalışma aralığına uygun olacak şekilde PWM sinyaline dönüşümü yapılmaktadır. Modelde kullanılan parametre değerleri Şekil 4.10’da görülmektedir.

```

28 % 1. Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Değişkenleri
29 - Lam = 1.5;
30 - del = 40;
31 - u_max = 600;
32 - pwm_max_s = 1400;
33 - pwm_min_s = 1150;

```

Şekil 4.10. Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması parametreleri

4.2.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması

2021 yılında yayınlanan bildiriye önerilen teknik için kayma yüzeyi ikinci mertebeden de seçilebilmektedir (Yiğit, 2021: 209-215). İkinci mertebeden s-kayma yüzeyi

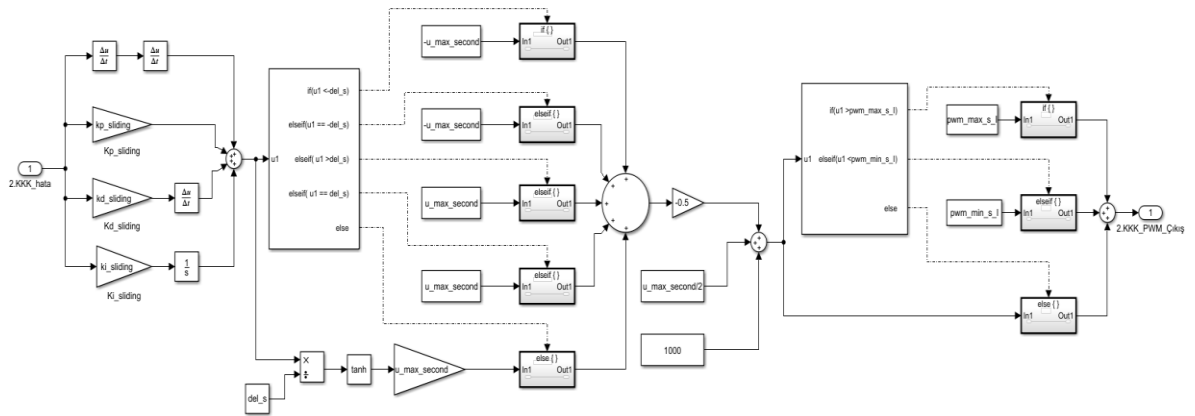
$$s = \ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eşitlikte K_p oransal, K_d türevsel ve K_i integral kazançlardır.

u sinyali (4.23) eşitliğindeki gibi tanımlanmıştır.

Kontrol algoritmasında kullanılan parametreler deneme-yanılma yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.11’de kontrol algoritmasının benzetimi yer alırken Şekil 4.12’de parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması benzetimi

```

35 % 2. Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Değişkenleri
36 - kp_sliding = 1500;
37 - ki_sliding = 1000;
38 - kd_sliding = 400 ;
39 - del_s=80000;
40 - u_max_second=600;
41 - pwm_max_s_I = 1400;
42 - pwm_min_s_I = 1150;

```

Şekil 4.12. İkinci mertebeden kayma yüzeyle modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması parametreleri

4.2.4. Kontrol algoritması ve referans açısı seçimi

Uygulamada deneysel olarak LCD ekrandan yapılan referans açısı seçimi ve kontrol algoritması seçimi Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Şekil 4.13’de görüleceği üzere şeklin üst kısmında algoritma ve açısı seçimi yapılmakta iken devamında asılı sarkaç sistemi ve kontrol algoritmalarının parametreleri belirlenmektedir.

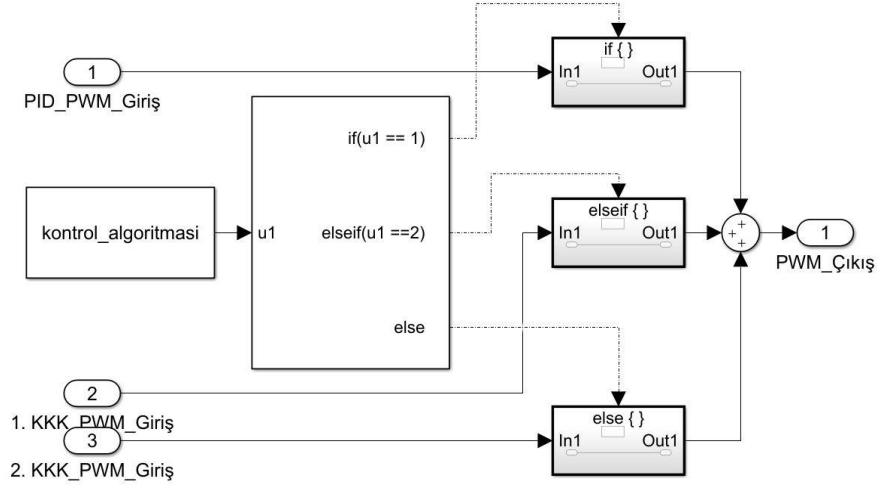
```

tez_script_1.m x +
1
2 % 1 => PID Algoritması, 2 => 1.Mertebeden KKK, 3=> 2.Mertebeden KKK
3 - kontrol_algoritması =3;
4
5 % Referans açısı değeri girilir
6 - referans_aci = 30;
7
8 % Sarkaç Sistemi Modelleme Parametreleri
9 - Km=1.8923 ;
10 - j= 0.07796;
11 - c= 0.03736;
12 - mL= 1.3;
13 - d= 0.2;
14 - g=9.8 ;
15 - pi=3.14;
16 - gain_1 = Km/j;
17 - gain_2 = c/j;
18 - gain_3 = mL*d*g/j;
19
20 % PID Algoritması Değişkenleri
21 - kp = 1;
22 - ki = 10;
23 - kd = 1.5;
24 - u_max_PID =580;
25 - pwm_max_pid = 1400;
26 - pwm_min_pid = 1150;
27
28 % 1. Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Değişkenleri
29 - Lam = 1.5;
30 - del = 40;
31 - u_max = 600;
32 - pwm_max_s = 1400;
33 - pwm_min_s= 1150;
34
35 % 2. Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Değişkenleri
36 - kp_sliding = 1500;
37 - ki_sliding = 1000;
38 - kd_sliding = 400 ;
39 - del_s=80000;
40 - u_max_second=600;
41 - pwm_max_s_I = 1400;
42 - pwm_min_s_I = 1150;
43
44 - sim('tez_model')

```

Şekil 4.13. Matlab/Simulink açısı-algoritma seçim ve parametre atama ekranı

Şekil 4.14'te ise seçilen parametre değerine göre hangi kontrol algoritmasının çıkışının sisteme yansıtılacağı benzetimi yapılmıştır.



Şekil 4.14. Algoritma seçim benzetimi

5. DENEYSEL VE BENZETİM SONUÇLARI

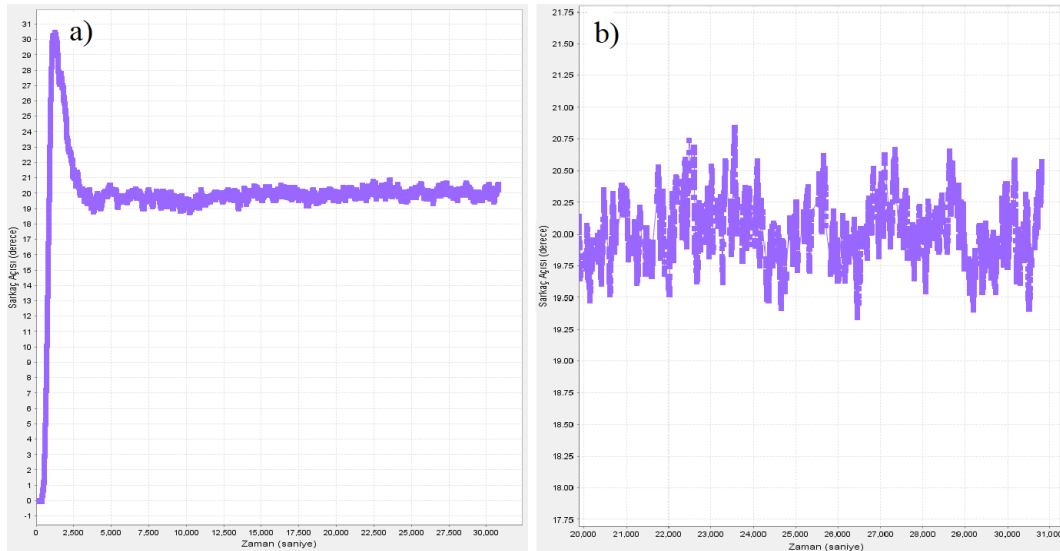
Bu bölümde deney düzeneği ile yapılan ölçümler ve Matlab/Simulink ortamında elde edilen benzetim sonuçları yer almaktadır. Kontrol algoritmalarının parametreleri hem deney hem de benzetim ortamında aynı tutulmuştur.

5.1.DENEYSEL SONUÇLAR

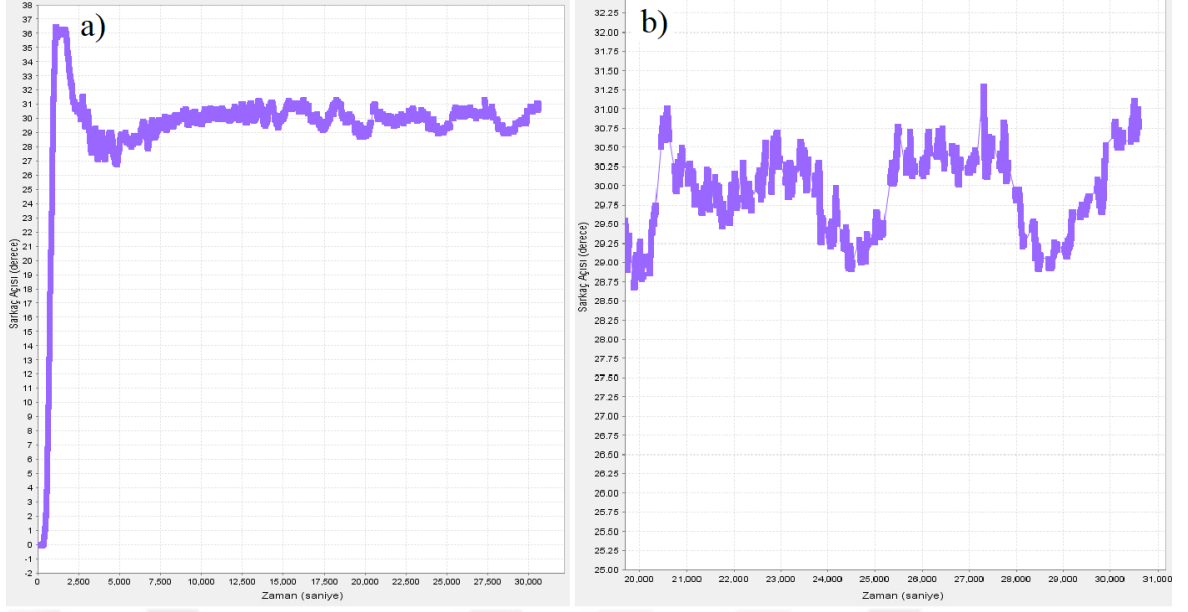
Deneylerde üç farklı kontrol algoritması kullanılmıştır. Aynı zamanda her kontrol algoritması için 20,30 ve 40 derece referans açıları için ölçümler alınmıştır. Her grafikte aynı ölçüm şekillerde görüleceği üzere a) sistemin basamak açısıl konum referans girişine cevabı ve b) kalıcı cevapta hata bandı (büyütülmüş) olarak iki kısım olarak verilmiştir. Mikroişlemciye ait değişkenlerin görsel olarak yansıtılması için STMStudio programı kullanılmıştır. STMStudio programı mikroişlemci ile hesaplanan asılı sarkacın açısının zamanla değişimini grafik olarak sunmaktadır. PID ve modelden bağımsız kayan kipli kontrolcüler için elde edilen grafikler aşağıda verilmektedir.

5.1.1. PID Algoritması Deney Grafikleri

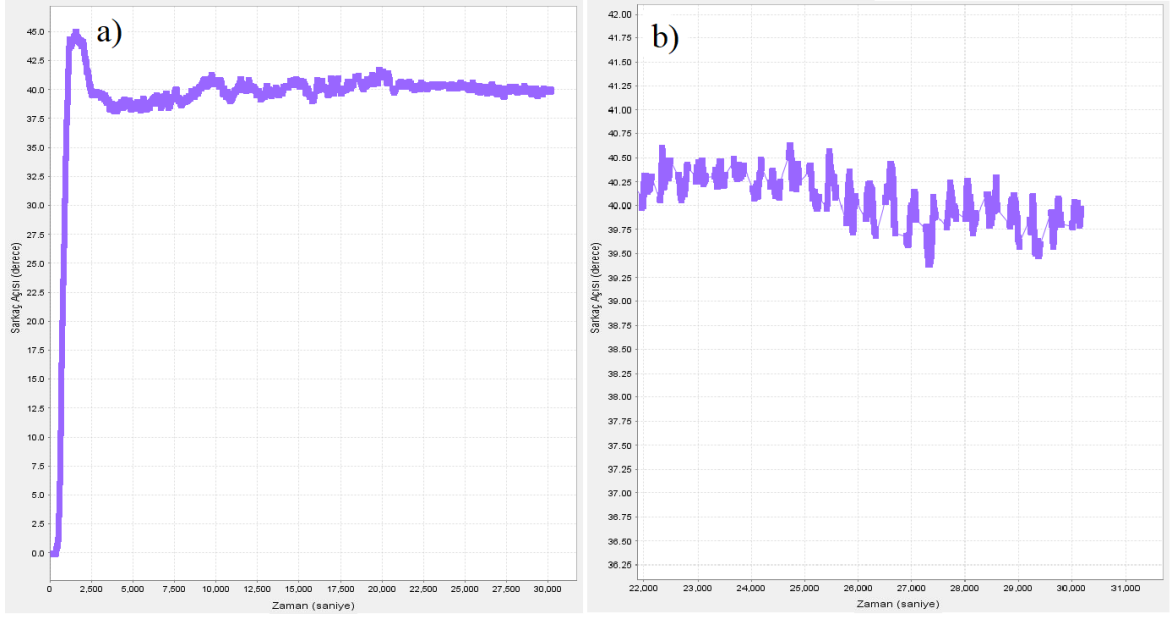
Ölçümlerde K_p parametresi 1, K_i parametresi 10 ve K_d parametresi 1.5 olarak seçilmiştir. Aşağıda her bir açı için elde edilen grafikler yer almaktadır.



Şekil 5.1. a) 20 derece basamak girişine sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (PID)
(DeneySEL)



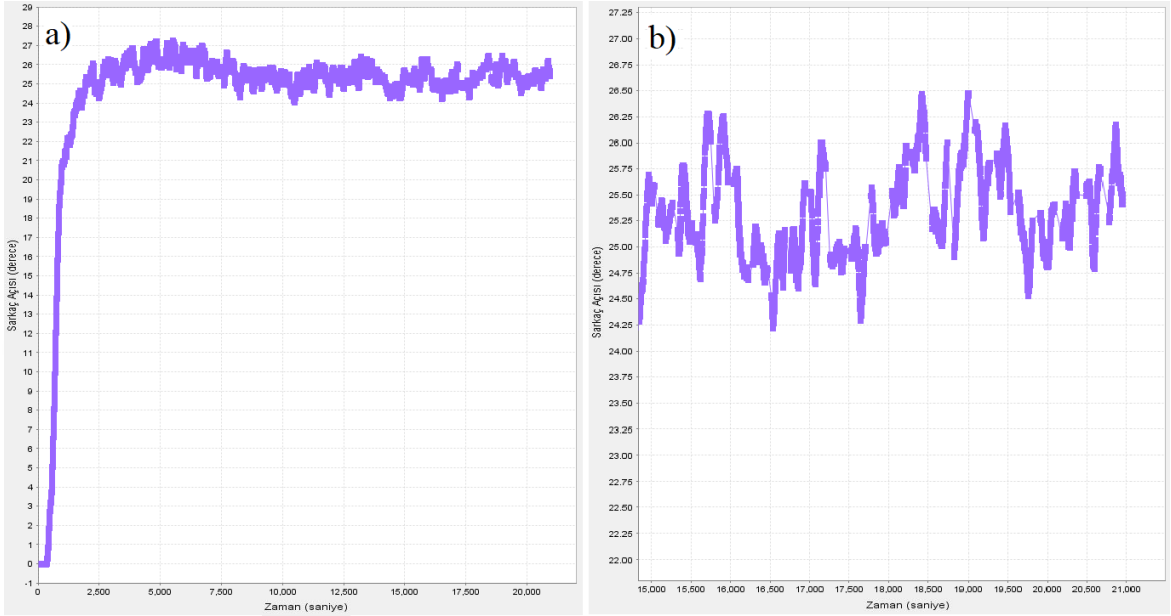
Şekil 5.2. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (PID)
(Deneyisel)



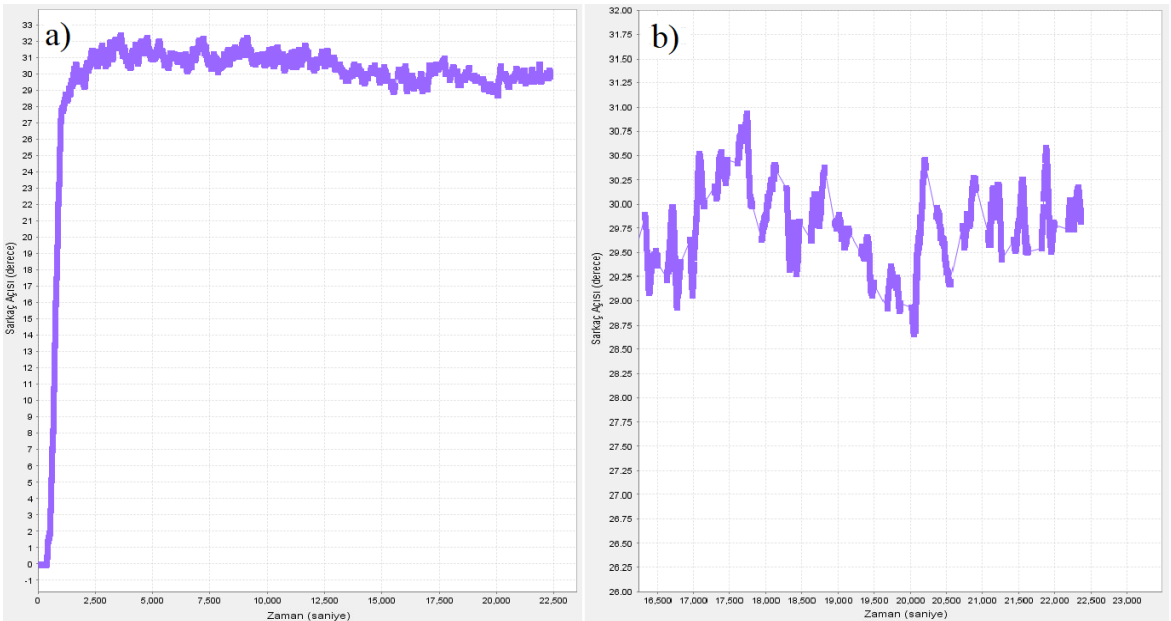
Şekil 5.3. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı
(PID) (Deneyisel)

5.1.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Deney Grafikleri

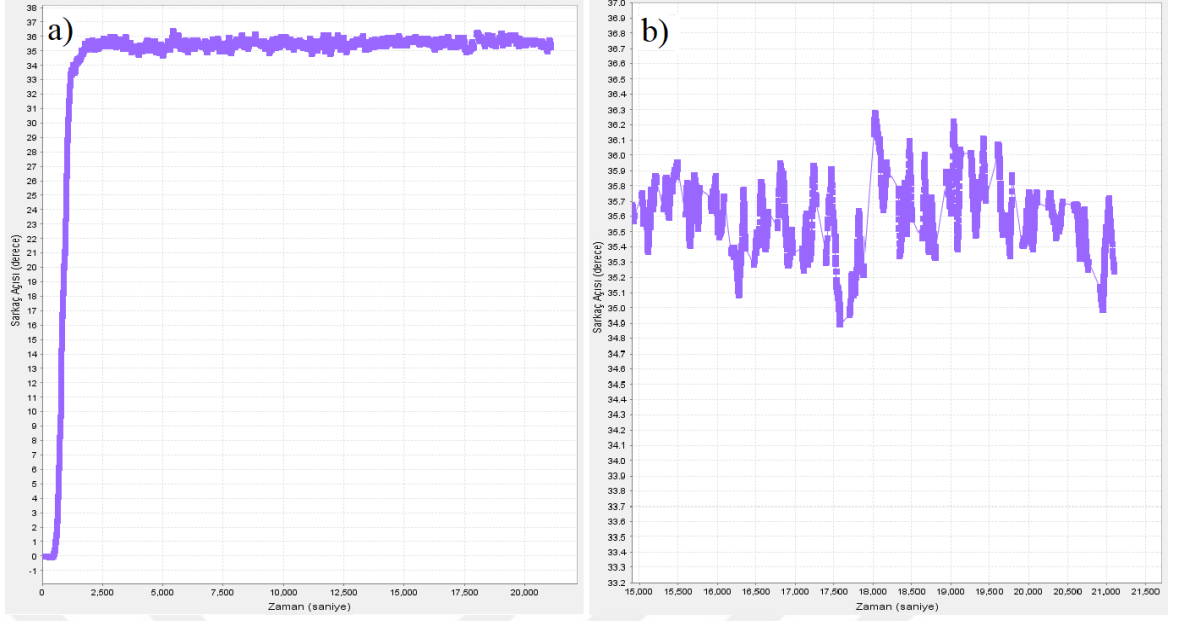
Ölçümlerde λ parametresi 1.5 ve δ parametresi ise 40 olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda yansıtılmıştır.



Şekil 5.4. a) 20 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyle modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)



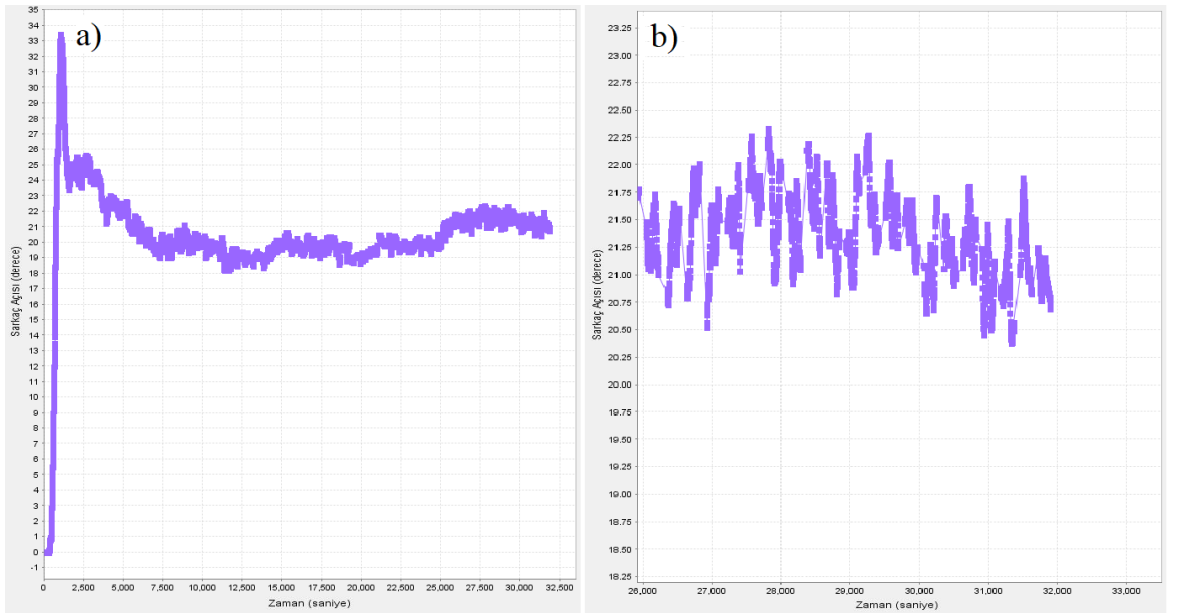
Şekil 5.5. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyle modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)



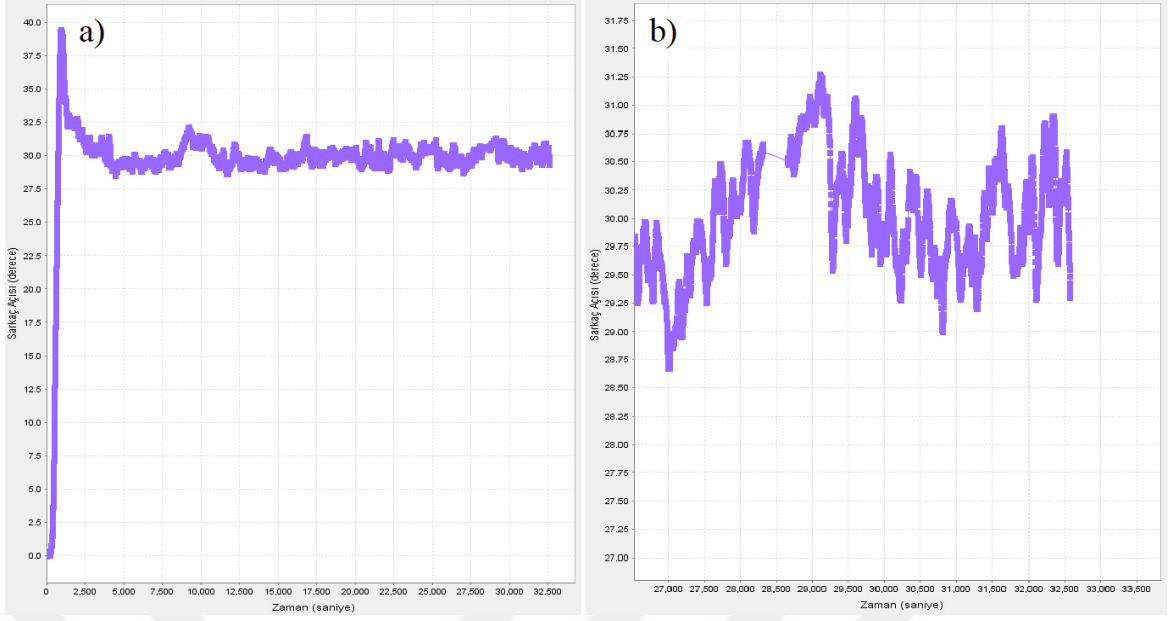
Şekil 5.6. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)

5.1.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyli Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Deney Grafikleri

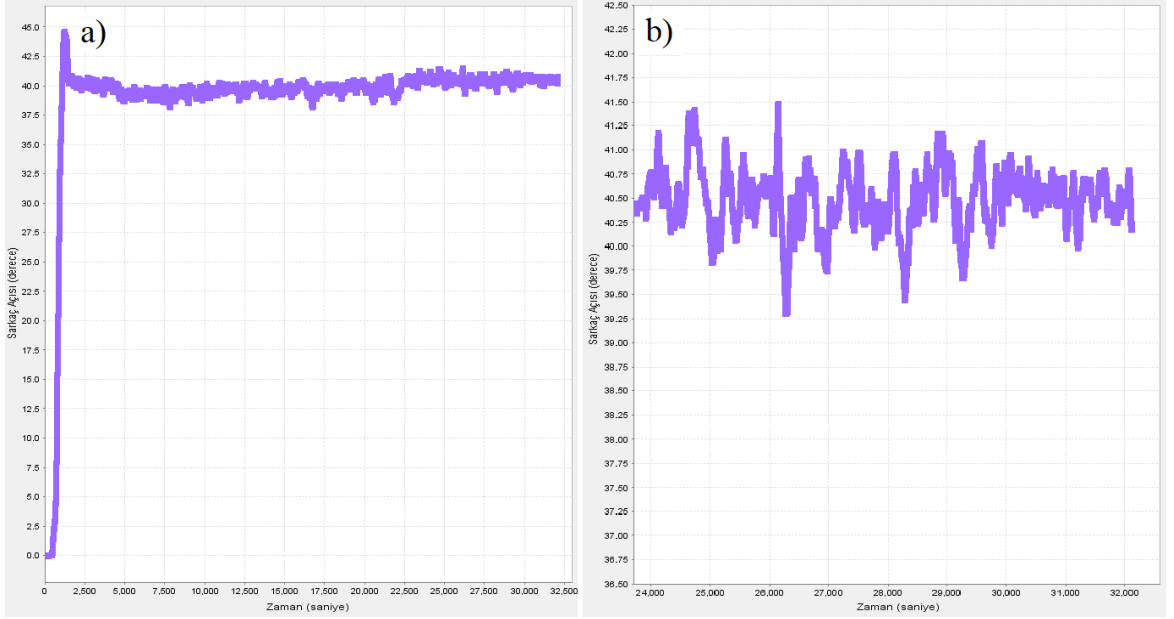
K_p oransal kazancı 1500, K_d türevsel kazancı 400, K_i integral kazancı 1000 ve δ parametresi 80000 seçilerek elde edilen grafikler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.7. a) 20 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)



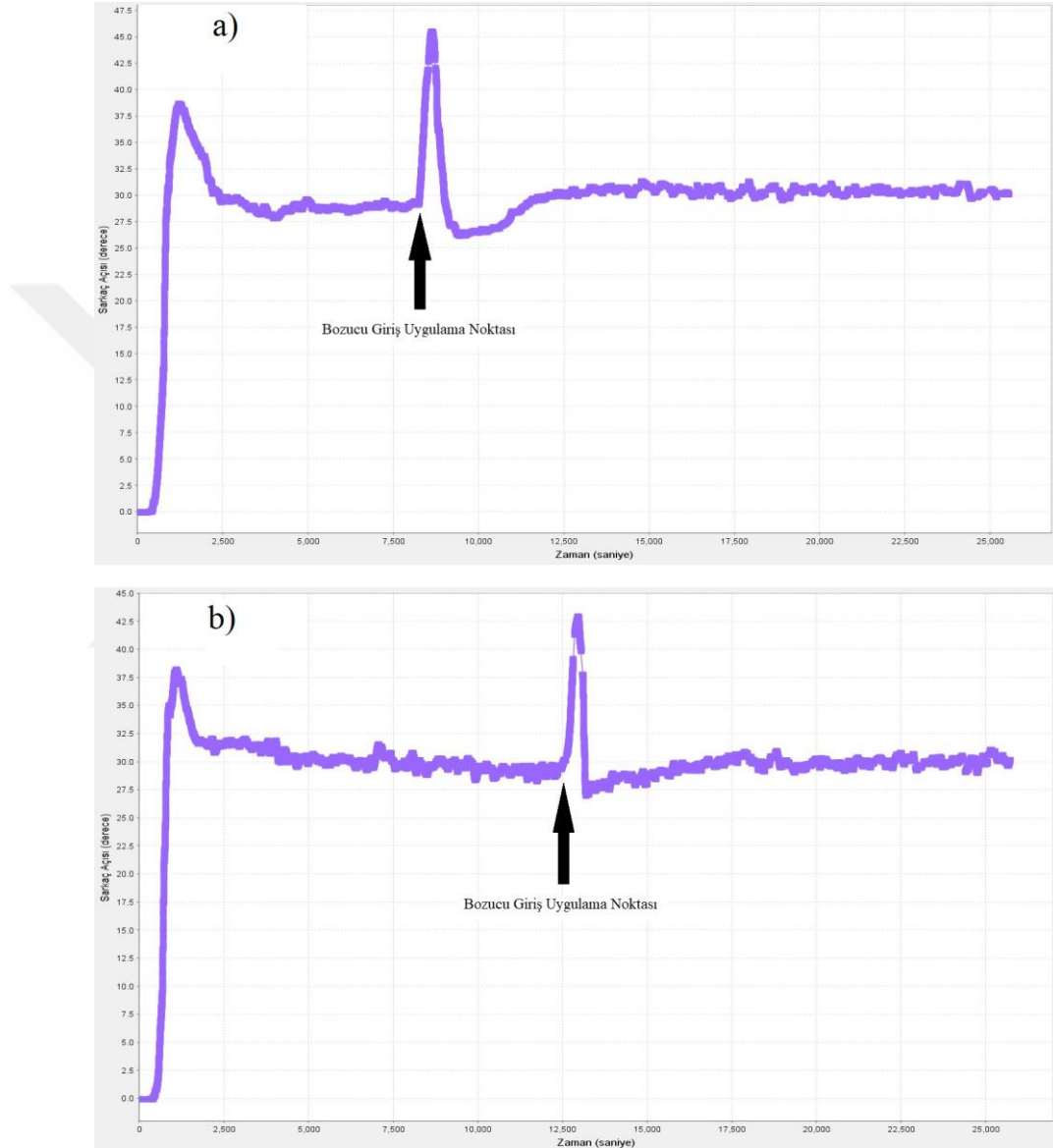
Şekil 5.8. a) 30 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)



Şekil 5.9. a) 40 derece basamak giriş sistemin cevabı b) kalıcı cevapta hata bandı (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol) (Deneysel)

5.1.4. Sistemin Regülatör Özelliğinin Gözlemlenmesi

Sistemin bozucu girişe cevabının gözlemlenmesi için deneyler yapılmıştır. Şekil 5.10'da görülen a) PID b) İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritmaları uygulandığında elde edilen grafiklerdir. Deneme yanılma yöntemi ile yaklaşık eşit büyüklükte bozucu girişler uygulanmıştır.



Şekil 5.10. Sistemin basamak bozucu girişe cevabı: a) PID b) İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol (Deneysel)

PID yönteminde yaklaşık sekizinci saniyede ikinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrolcüde ise yaklaşık on üçüncü saniyede bozucu giriş uygulanmıştır. Grafikler incelendiğinde modelden bağımsız kayan kipli kontrolcünün daha gürbüz davranış sergilediği görülmektedir.

5.1.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyisel çalışmalarda kontrolcü katsayıları birçok deney yapılarak deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

Kalıcı durumda salınım değerleri PID ve ikinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması için neredeyse aynı sonuçları vermektedir.

Aşma değerleri PID ve ikinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması için biraz farklılıklar gösterse de kıyaslanabilir düzeydedir.

Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritmasında 20 dereceye kadar inilememektedir. Ayrıca 40 derece hedefe de ulaşamamaktadır. Bu algorithmada integral terimi yer almadığı için istenilen değerlere ulaşamamaktadır.

Ayrıca, modelden bağımsız kayan kipli kontrolcünün PID kontrolcüyeye göre deney düzeneğindeki bozucu girişlere karşı daha gürbüz davranış sergilediği görülmüştür.

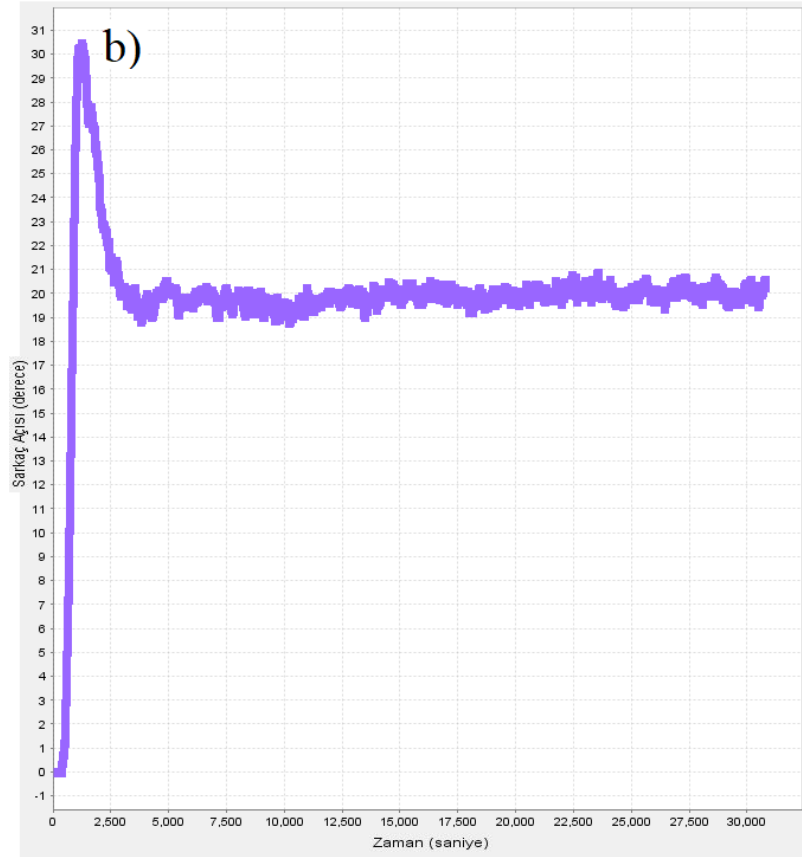
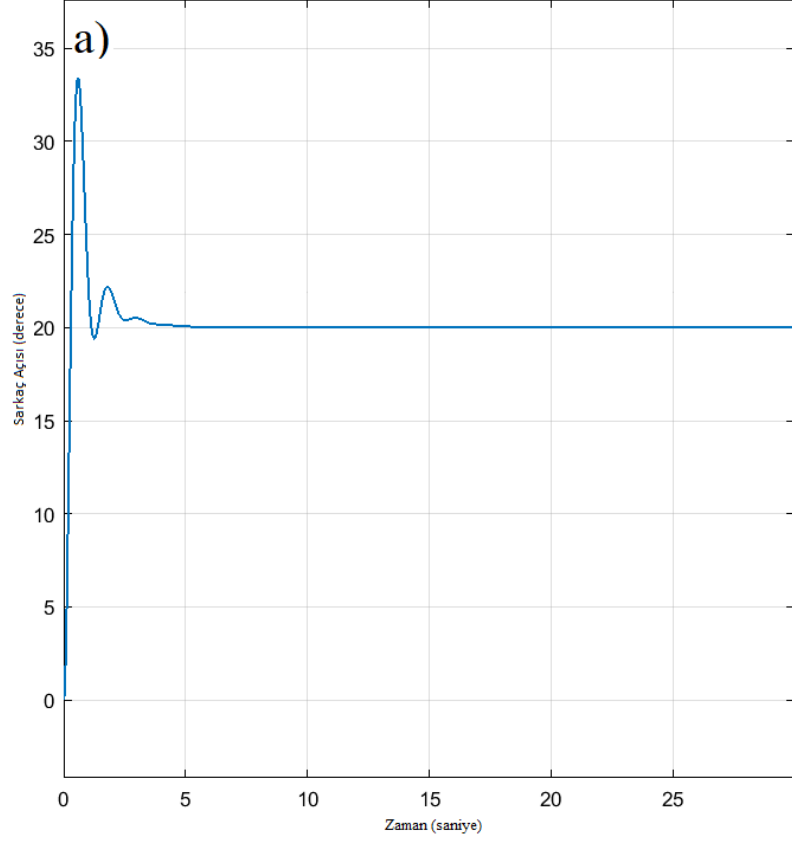
Deney düzeneğinin amacı modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinden yararlanılarak geliştirilen mikroişlemcili bir kontrolcünün gerçek bir uygulama üzerinde uygulanabilirliğini göstermek olduğundan ve asıl amaç asılı sarkacın hassas kontrolü olmadığından dolayı hassas imalat gerektiren bir deney düzeneği kurma ihtiyacı hissedilmemiştir. İleriki çalışmalarda çok daha yüksek hassasiyetle kontrolü gereken sistemlerin mekanik aksamının ona göre imal edilmesi gerekmektedir.

5.2.BENZETİM SONUÇLARI

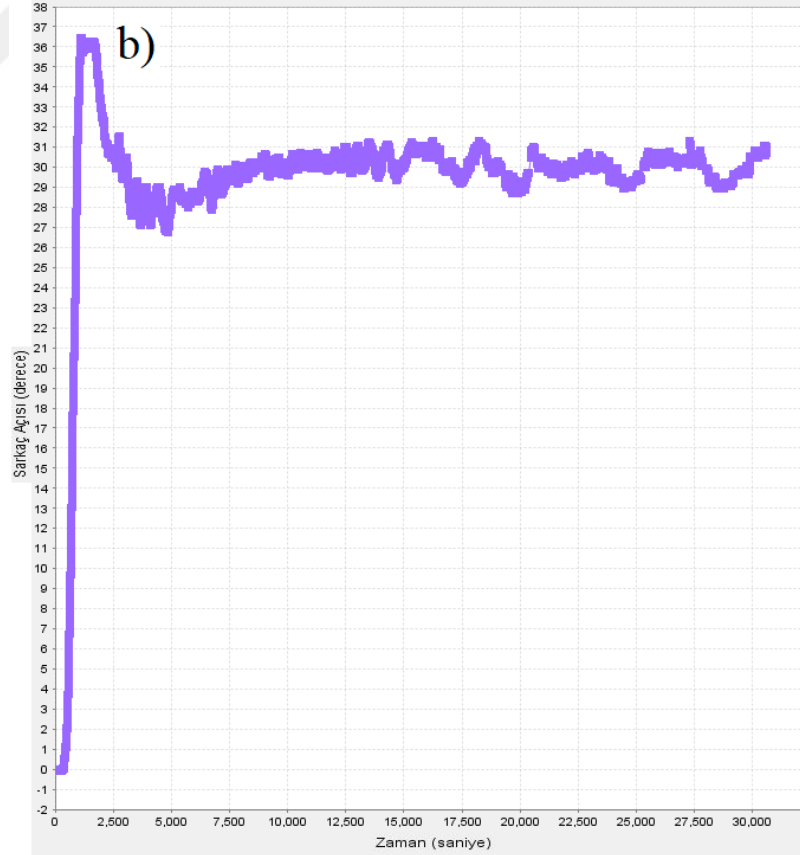
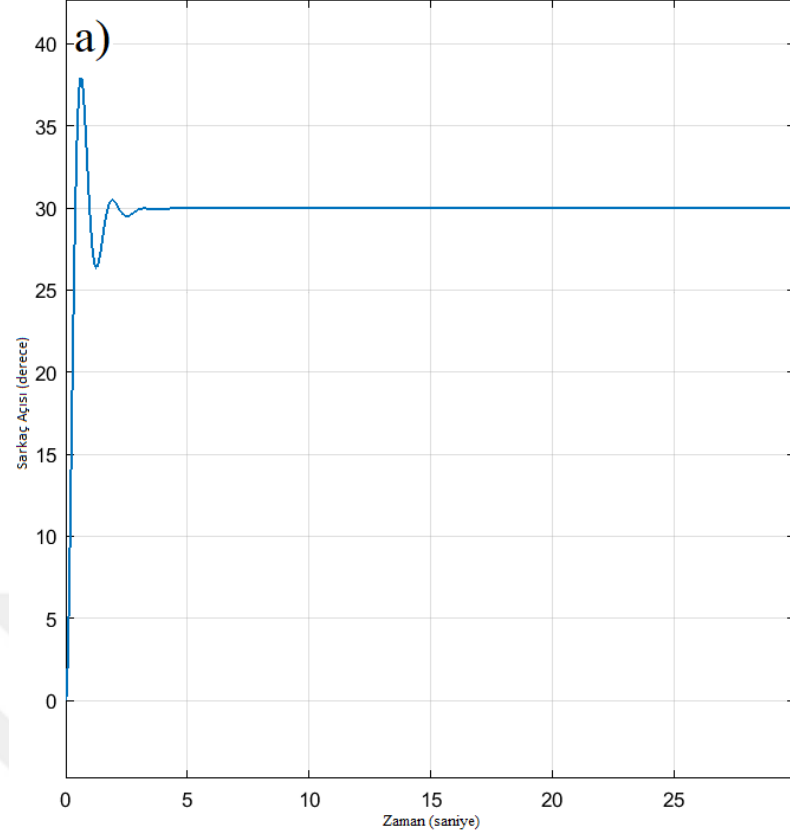
Matlab/Simulink programı ile modellenen sistemin grafikleri elde edilmiştir. Üç farklı algoritma kullanılarak 20,30 ve 40 derece referans açıları için grafikler alınmıştır. Aşağıda sunulan şekillerde görüleceği üzere a) benzetim sonuçları, b)deney sonuçları aynı şekilde yansıtılarak karşılaştırma imkânı sağlanmıştır.

5.2.1. PID Algoritması Benzetim Grafikleri

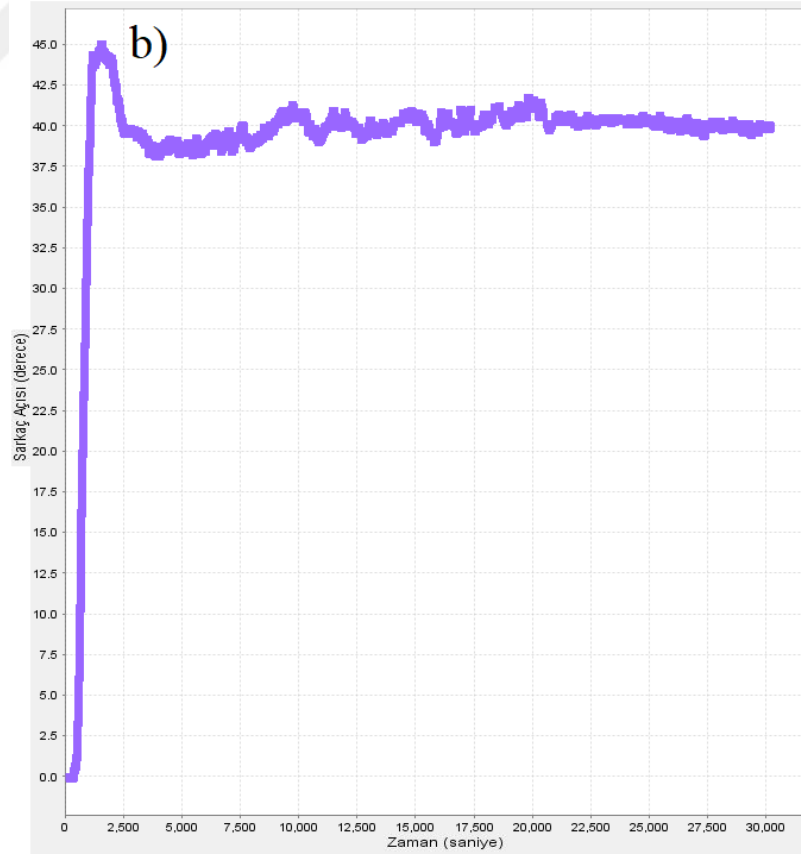
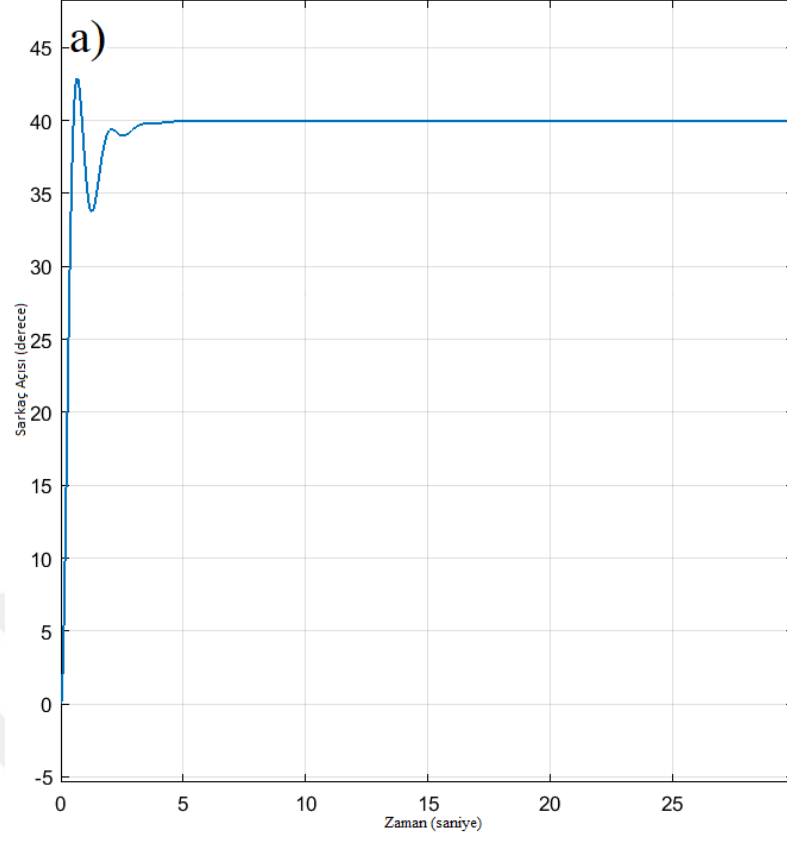
Benzetim ve deney sonuçları için K_p parametresi 1, K_i parametresi 10 ve K_d parametresi 1.5 olarak seçilerek elde edilen grafikler aşağıda yer almaktadır.



Şekil 5.11. 20 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (PID)



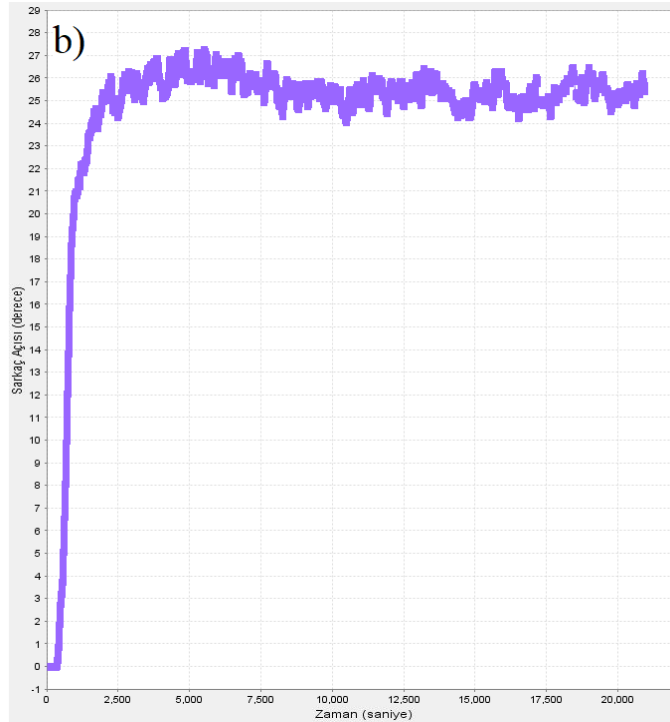
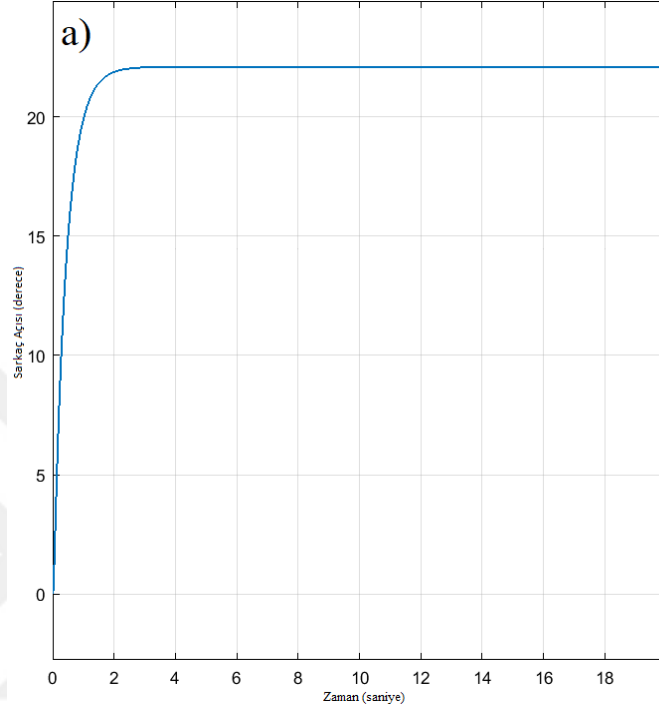
Şekil 5.12. 30 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (PID)



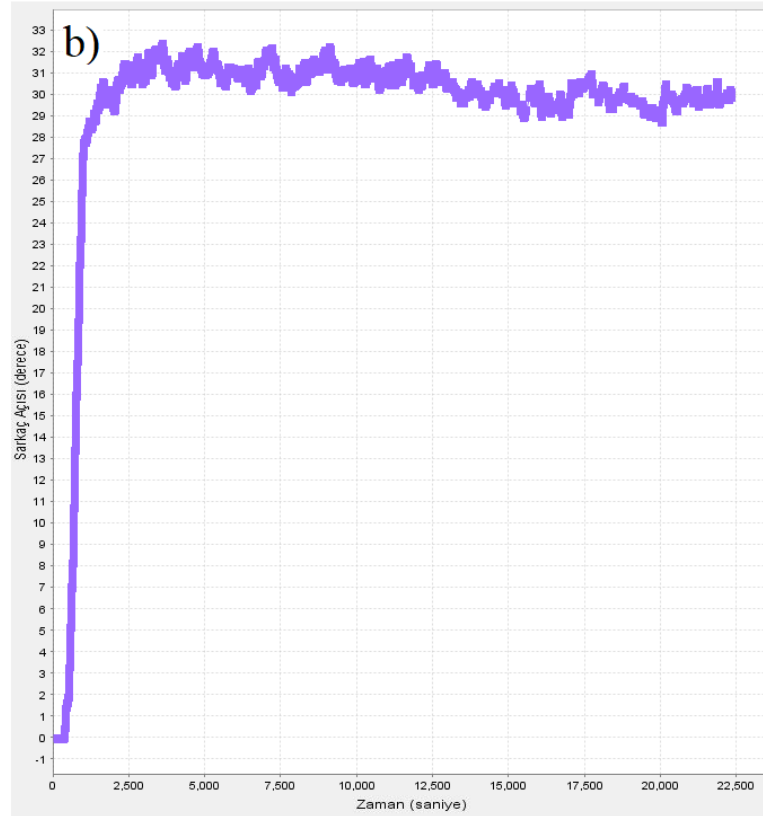
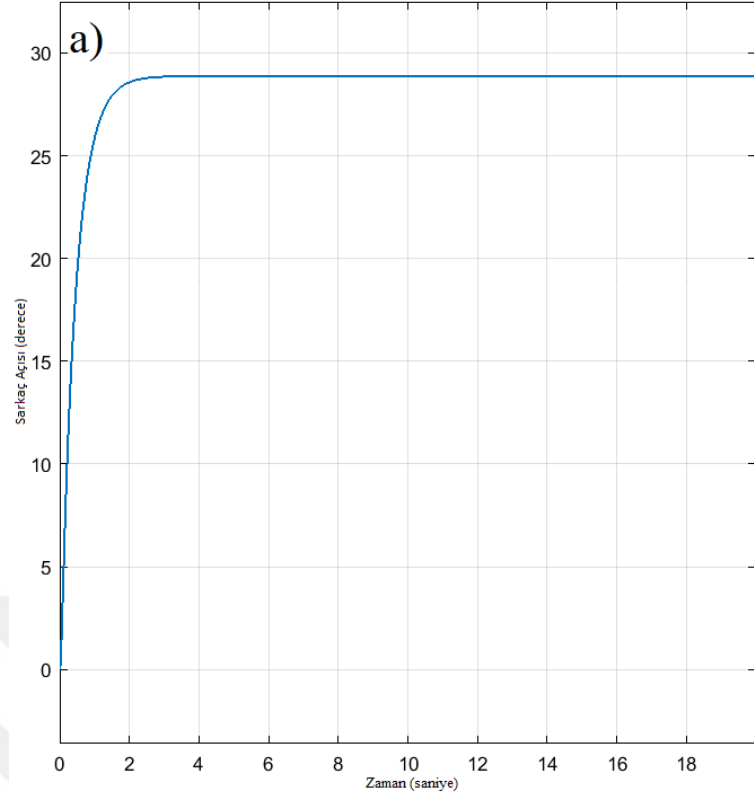
Şekil 5.13. 40 derece basamak girişi sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (PID)

5.2.2. Birinci Mertebeden Kayma Yüzeyle Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Benzetim Grafikleri

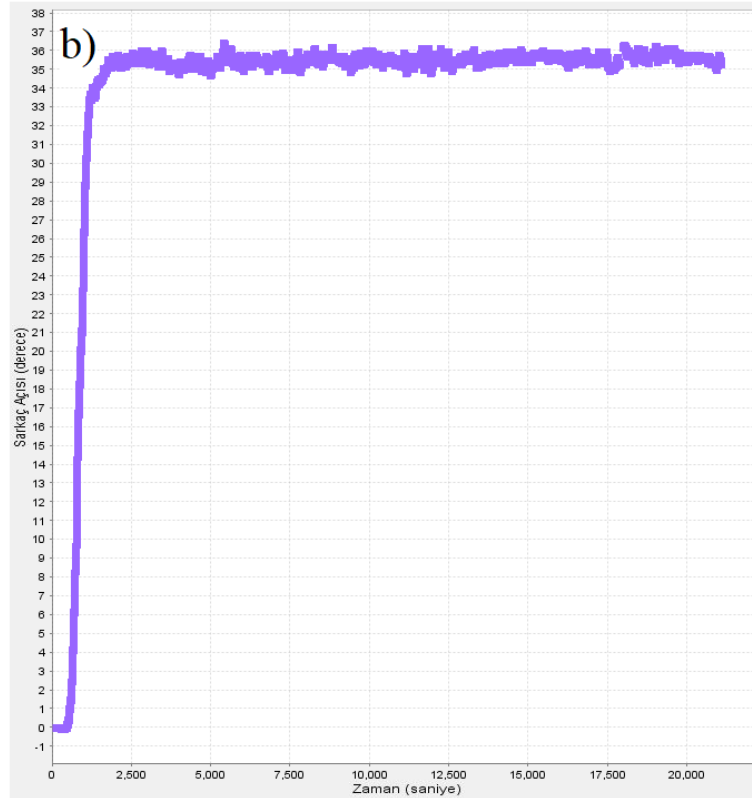
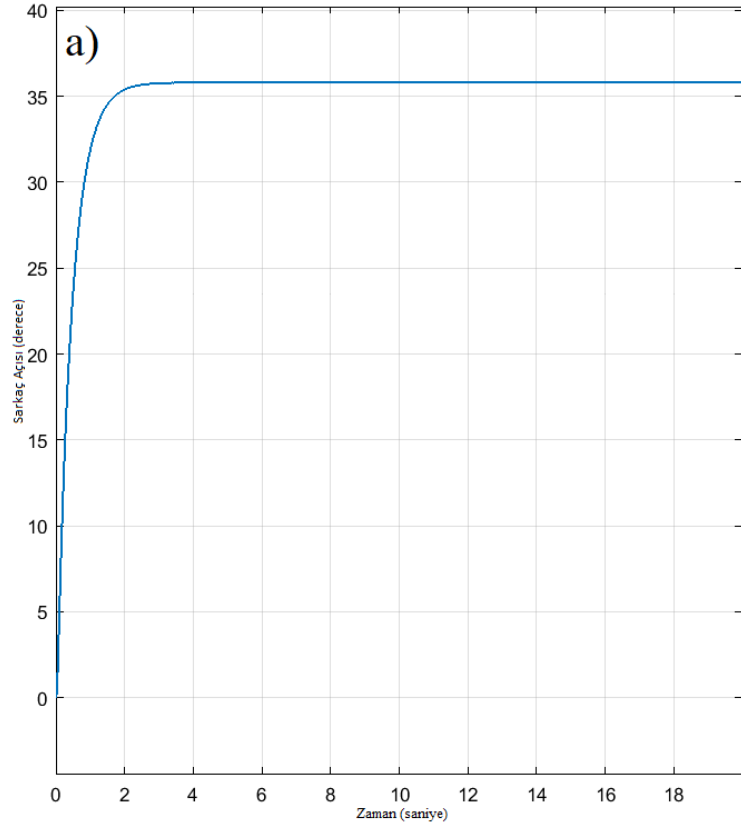
λ parametresi 1.5 ve δ parametresi 40 olarak elde edilen benzetim ve deney sonuçları aşağıda yer almaktadır.



Şekil 5.14. 20 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyle modelden bağımsız kayan kipli kontrol)



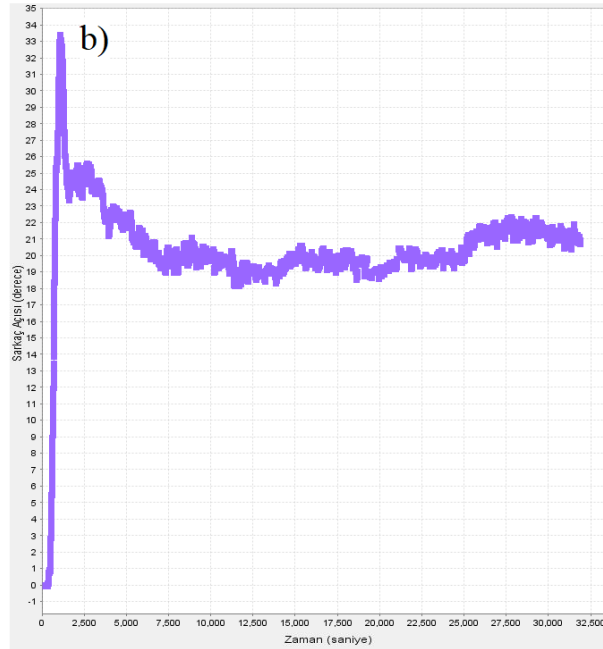
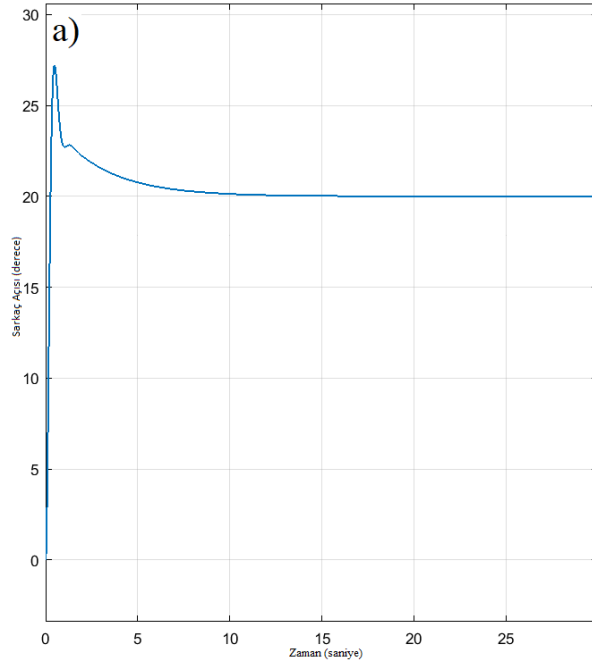
Şekil 5.15. 30 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)



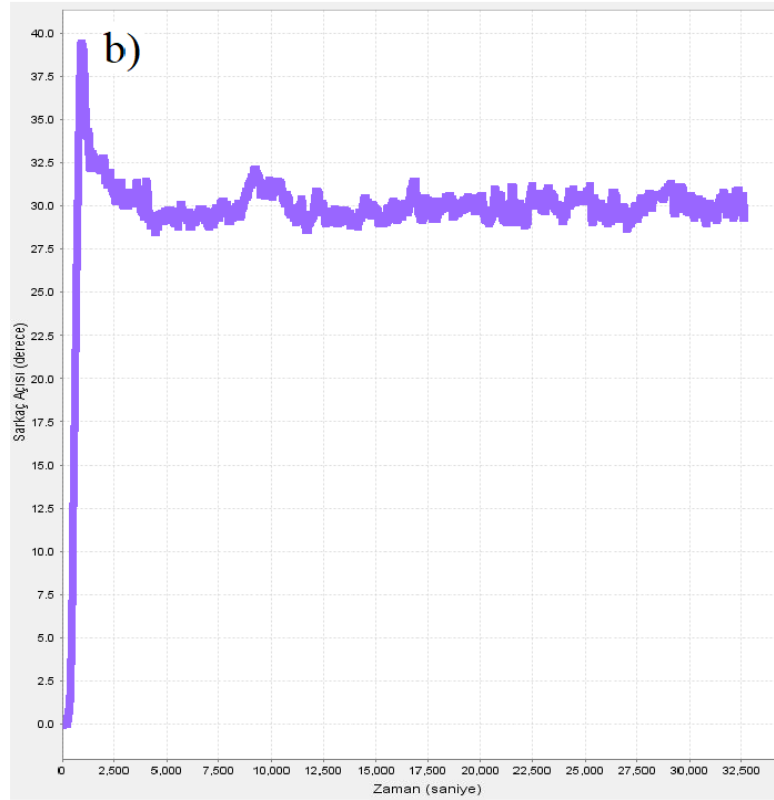
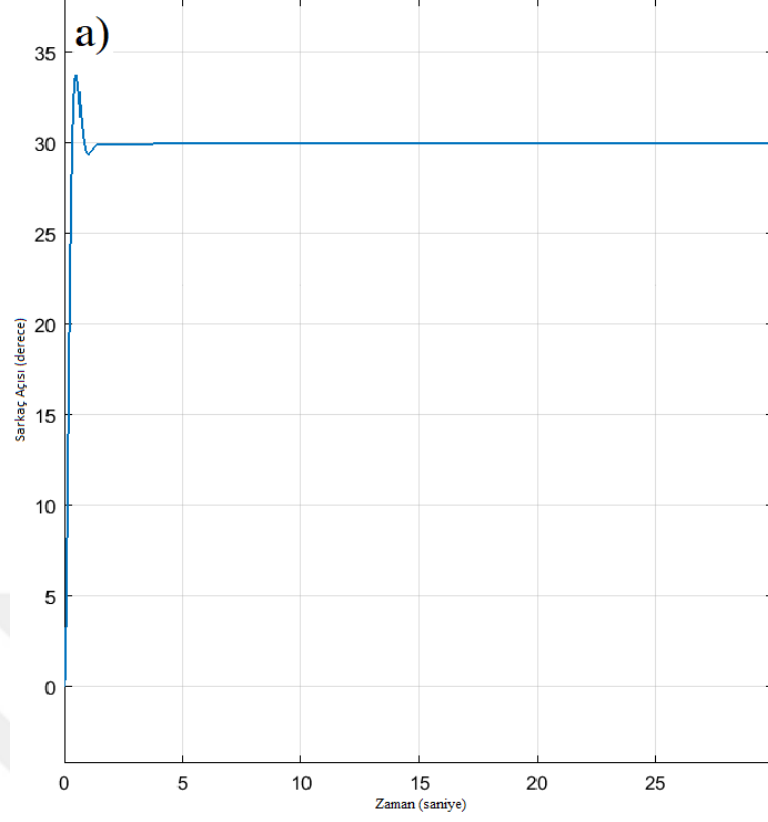
Şekil 5.16. 40 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)

5.2.3. İkinci Mertebeden Kayma Yüzeyli Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol Algoritması Benzetim Grafikleri

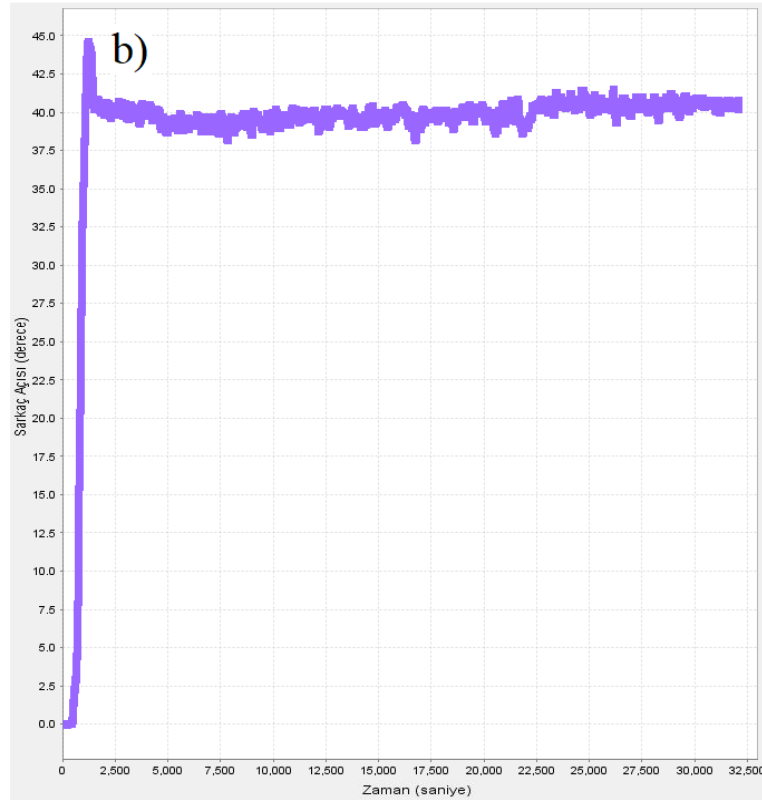
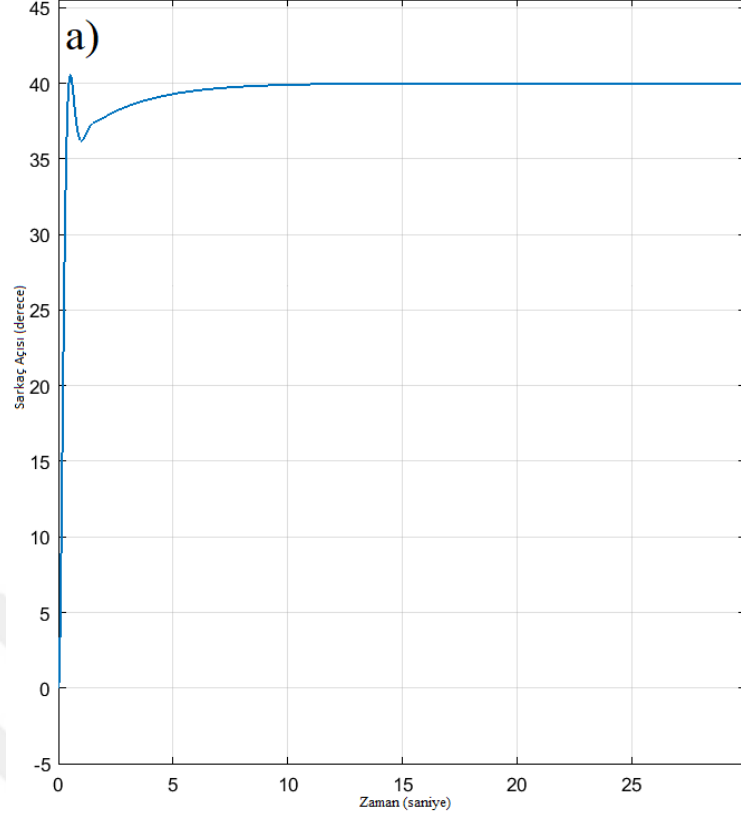
Deney ve benzetim ölçümlerinde K_p oransal kazancı 1500, K_d türevsel kazancı 400, K_i integral kazancı 1000 ve δ parametresi 80000 seçilerek elde edilen grafikler aşağıda yansıtılmıştır.



Şekil 5.17. 20 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deney sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)



Şekil 5.18. 30 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)



Şekil 5.19. 40 derece basamak giriş sistemin cevabı: a) Benzetim sonuçları b) Deneysel sonuçları (İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol)

5.2.4. Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan kontrolcü kazançları bire bir kullanılarak aynı Őartlarda benzetim çalışmaları yapılmıştır.

PID algoritmasının benzetim ve deney sonuçlarının neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Birinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritmasının benzetim sonuçları incelendiğinde, deney sonuçlarında olduğu gibi 20 ve 40 derecenin elde edilemediği gözlemlenmiştir. İkinci mertebeden kayma yüzeyli modelden bağımsız kayan kipli kontrol algoritması için benzetim ve deney sonuçları zamanlama ve sinyal formu açısından uyumaktadır. Sadece deney sonuçlarında aşma değerlerinin biraz daha yüksek olduğu fark edilmiştir.

Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların birbiri ile çok uyumlu olduğu gözlemlenerek benzetim çalışmasının sarkacın gerçek davranışını yakın temsil ettiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, açık kaynaklarda yer almaya başlayan modelden bağımsız kayan kipli kontrol tekniklerinin pratikte de uygulanabilir olduğu geliştirilen mikrodenetleyicili bir kontrolcü ile ortaya konulmuştur. Çalışmada, asılı sarkaç sisteminin açısal konum kontrolü modelden bağımsız kayan kipli kontrol yöntemlerinden yararlanılarak geliştirilen mikroişlemcili kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. Hem asılı sarkaç sistemi deney düzeneği kurulmuş olup hem de sistemin matematiksel modeli oluşturularak çok sayıda benzetim ve deneysel çalışma yapılmıştır.

Kontrol yöntemi olarak modelden bağımsız kayan kipli kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca, sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından PID kontrolcü ile de sistem kontrol edilmiştir. Mikroişlemci ile geliştirilen arayüz sayesinde bilgisayar ortamından bağımsız bir kontrolcü ünitesi elde edilmiştir. Sistemde uygulanacak kontrolcünün seçimi, kontrol parametrelerinin değerlerinin atanması ve referans açılarının seçimi doğrudan kullanıcıdan girdi olarak alınabildiği gibi sistemin çıktıları da görsel ve grafiksel olarak kullanıcıya yansıtılmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan ve pratikte uygulaması az olan modelden bağımsız KKK kontrolcü ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Klasik bir yöntem olan PID kontrolcü ile kıyaslanabilecek düzeyde başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir. Yine, benzetim çalışması ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçları doğrular niteliktedir.

İlerleyen çalışmalarda, modelden bağımsız KKK kontrolcünün basit yapısı ve gürbüzlüğünün PID kontrol gibi klasik kontrolcüler ile birlikte kullanılmasıyla sisteme özgü davranışlar sergileyen kontrolcüler tasarlanabilir. Sistemde asılı sarkaç sistemine fırçasız doğru akım motoru tork sağlarken açı ölçümü IMU sensörü ile yapılmaktadır. Güncel ve yaygınlaşan teknolojilerin tercih edilmesi sebebiyle tez kapsamında geliştirilen kontrolcünün ileri ki çalışmalarda çok rahatlıkla drone uçuş kontrolü gibi karmaşık sistemlere uyarlanabileceği aynı zamanda daha farklı sistemlerde de başarılı sonuç vereceği düşünülmektedir. Gelecekte farklı platformlarda uygulamaları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Albaghdadi, A., & Ali, A. (2019). An optimized complementary filter for an inertial measurement unit contain MPU6050 sensor. *Iraqi J. Electr. Electron. Eng, 15(2)*, 71-77.
- Çakıcı, E. (2019). *Mini İnsansız Hava Araçları İçin Bir Fırçasız Motor Test Sistemi Geliştirilmesi*, (yüksek lisans tezi), 21, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Euler angles*. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles.
- Gedikpınar M., Güldemir H. (2002). Sensorless speed control of brushless dc motors. *Journal of Polytechnic, 5(4)*, 273-279.
- Grepow Inc. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://www.genstatu.com/tattu-30c-22.2v-12000-6s1p-ec5.html>.
- InvenSense Inc. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- Kalaycı, M., & Yiğit, İ. (2015). Pratikte Kullanılan Bazı Kayan Kipli Kontrol Tekniklerinin Teorik Ve Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1)*.
- Kızmaz, H. (2009). *Asılı Sarkacın Kayma Kipli Kontrolü*, (yüksek lisans tezi), (12-17, 54-60), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Mensan Mentese Ltd. Şti. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://www.mensanmentese.com/tork-ayarli-mentese-tm-56726-ozellikleri>.
- Merç, Y., & Bayılmış, C. (2011, May). Dört rotorlu insansız hava aracı (Quadrotor) uygulaması. In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. s (pp. 18-20).
- Nguyen, D. K. (1998). *Sliding-Mode Control: Advanced Design Techniques* (Doctoral dissertation, University of Technology, Sydney).
- Özenç, O. ve Yiğit, İ. (2019). Bir makara sarım sisteminin modellenmesi, benzetimi ve model bağımsız gerji kontrolü. *Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi.*, Samsun, Türkiye.

- Perez Paina, G., Gaydou, D., Redolfi, J. A., Paz, C., & Canali, L. (2011). Experimental comparison of Kalman and complementary filter for attitude estimation. In *XII Argentine Symposium on Technology (AST 2011)(XL JAIIO, Córdoba, 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011)*, 205-215.
- PID*. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://tr.wikipedia.org/wiki/PID>.
- Promodel Ltd. şti. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://www.promodelhobby.com/urun/t-motor-air-40a-600hz-esc-2-6s-bec-yok>
- Promodel Ltd. şti. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://www.promodelhobby.com/urun/t-motor-u5-v2-400kv>.
- STMicroelectronics. (t.y.). Erişim:12 Kasım 2022, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743vi.pdf>.
- STMicroelectronics. (t.y.). Erişim:12 Kasım 2022, https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2407-stm32h7-nucleo144-boards-mb1364-stmicroelectronics.pdf.
- T-motor. (t.y.). Erişim: 12 Kasım 2022, <https://store.tmotor.com/goods.php?id=382>.
- Urmat, S. (2015). *Yönelim Çıkarımı İçin ARM Tabanlı Bir Gömümlü Sistem Tasarımı ve Gerçeklenmesi*, (yüksek lisans tezi), (2,29), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Venkata, V. P. (2016). Control system design for tricopter using filters and PID controller. *arXiv preprint arXiv:1604.01162*.
- Yiğit, İ. (2017). Model free sliding mode stabilizing control of a real rotary inverted pendulum. *Journal of Vibration and Control*, 23(10), 1645-1662.
- Yiğit, İ., (2021). Pratik Bir Modelden Bağımsız Kayan Kipli Kontrol. *Ankara Int. Conf. On Scientific Research-IV*. (209-215. ss.) Ankara, Türkiye.
- Young, K. D., Utkin, V. I., & Ozguner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE transactions on control systems technology*, 7(3), 328-342.

EKLER

EK-1. MİKROİŞLEMCİ YAZILIMI PID ALGORİTMASI KODU

```
double kp = 1;

double ki = 10;

double kd = 1.5;

float u_max_PID=580;

float pwm_max_pid = 1400;

float pwm_min_pid = 1150;

if((flag_pid ==1)&&(flag_start ==1))
{
    prev_time_pid = time_pid;
    time_pid = HAL_GetTick();
    elapsed_time_pid = (time_pid - prev_time_pid) /1000;
    error = Total_angle_X_final_round - desired_angle;
    pid_p = kp*error;
    pid_i = pid_i + ki*error * elapsed_time_pid ;
    pid_d = kd*((error - previous_error) / elapsed_time_pid);
    PID = pid_p+pid_d+pid_i ;

    if(PID>u_max_PID)
    {
        PID = u_max_PID;
    }
}
```

```

if(PID<-u_max_PID)
{
    PID = -u_max_PID;
}
PID_mid = -PID/2;
PID_mod = u_max_PID/2+PID_mid;
pwm= 1000+PID_mod;

if(pwm>pwm_max_pid)
{
    pwm = pwm_max_pid;
}
if(pwm<pwm_min_pid)
{
    pwm = pwm_min_pid;
}
previous_error = error;
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,TIM_CHANNEL_1, pwm);
}

```

EK-2. MİKROİŞLEMCİ YAZILIMI BİRİNCİ MERTEBEDEN KAYMA YÜZEYLİ MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KIPLI KONTROL ALGORİTMASI KODU

```
float Lam=1.5;

float del=40;

float u_max=600;

float pwm_max_sliding = 1400;

float pwm_min_sliding = 1150;

if((flag_sliding_first ==1)&&(flag_start ==1))
{
    prev_time_sliding = time_sliding;
    time_sliding = HAL_GetTick();
    elapsed_time_sliding = (time_sliding - prev_time_sliding) /1000;
}

error = Total_angle_X_final_round - desired_angle;

e_sliding_derivative = ((error - previous_error) / elapsed_time_sliding);

s= e_sliding_derivative + Lam*error;

if((s<-del) || (s == -del))
{
    u_sliding= -u_max;
}

else if((s>-del)&&(s<del))
{
    u_sliding= u_max*tanh(s/del);
}
```

```

else if((s>del) || (s == del))
{
    u_sliding = u_max;
}

u_sliding = -u_sliding/2;

u_sliding_mod = u_max/2 +u_sliding;

pwm = 1000+u_sliding_mod ;

if(pwm>pwm_max_sliding)
{
    pwm = pwm_max_sliding;
}

if(pwm<pwm_min_sliding)
{
    pwm = pwm_min_sliding;
}

previous_error = error;

__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,TIM_CHANNEL_1, pwm);
}

```

EK-3. MİKROİŞLEMCİ YAZILIMI İKİNCİ MERTEBEDEN KAYMA YÜZEYLİ MODELDEN BAĞIMSIZ KAYAN KIPLI KONTROL ALGORİTMASI KODU

```
float del_second=80000;

float u_max_second=600;

double kp_sliding = 1500;

double ki_sliding = 1000

double kd_sliding = 400

float pwm_max_sliding_second_INT = 1400;

float pwm_min_sliding_second_INT = 1150;

if((flag_sliding_second_INT ==1)&&(flag_start ==1))
{
    prev_time_sliding_second = time_sliding_second;
    time_sliding_second = HAL_GetTick();
    elapsed_time_sliding_second = (time_sliding_second - prev_time_sliding_second)
/1000

    error = Total_angle_X_final_round - desired_angle;

    e_sliding_derivative_first = ((error - previous_error) / elapsed_time_sliding_second);

    e_sliding_derivative_second = ((e_sliding_derivative_first -
previous_e_sliding_derivative_first) / (elapsed_time_sliding_second));

    sliding_i = sliding_i + ki_sliding*error*elapsed_time_sliding_second;

    s_second= e_sliding_derivative_second + kd_sliding*e_sliding_derivative_first +
kp_sliding*error + sliding_i;

    if((s_second<=-del_second) || (s_second == -del_second))
    {
        u_sliding_second= -u_max_second;
    }
}
```

```

else if((s_second>-del_second)&&(s_second<del_second))
{
    u_sliding_second= u_max_second*tanh(s_second/del_second);
}

else if((s_second>del_second) || (s_second == del_second))
{
    u_sliding_second = u_max_second;
}

u_sliding_second = -u_sliding_second/2;
u_sliding_second_mod = u_max_second/2 + u_sliding_second;
pwm= 1000+u_sliding_second_mod;

if(pwm>pwm_max_sliding_second_INT)
{
    pwm = pwm_max_sliding_second_INT;
}

if(pwm<pwm_min_sliding_second_INT)
{
    pwm = pwm_min_sliding_second_INT;
}

previous_error = error;

previous_e_sliding_derivative_first = e_sliding_derivative_first;
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,TIM_CHANNEL_1, pwm);
}

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIRIM, Mustafa

İlk ve orta öğrenimini Yozgat'ta Cengiz Topel İlköğretim Okulu'nda lise öğrenimini ise Kırşehir'de Prof. Dr. İlhan Kılıçözü Fen Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında kazandığı Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2016 yılında 3,43 genel not ortalaması ile bitirdi. Şu anda Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.