



TARSUS
ÜNİVERSİTESİ

TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEKLİSANS TEZİ

MATLAB SİMULİNK ORTAMINDA KULLANILABİLEN ARDUİNO TEMELLİ KONTROL DENEY SETİ TASARIMI

Erdal BATAN

İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TARSUS-2019

TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEKLİSANS TEZİ

**MATLAB SİMULINK ORTAMINDA KULLANILABİLEN
ARDUİNO TEMELLİ KONTROL DENEY SETİ TASARIMI**

Erdal BATAN

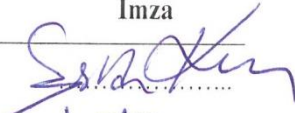


**Danışman
Dr. Öğr. Üye. Ercan KÖSE**

İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TARSUS-2019

ONAY

Erdal BATAN tarafından Dr. Öğr. Üye. Ercan KÖSE danışmanlığında hazırlanan “Matlab Simulink Ortamında Kullanılabilen Arduino Temelli Kontrol Deney Seti Tasarımı” başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 21/08/2019 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği ile Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Dr. Öğr. Üye. Ercan KÖSE	
Üye	Prof.Dr. Uğur EŞME	
Üye	Dr. Öğr. Üye. Deniz ÜSTÜN	

Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03.../09/2019 tarih ve 49.../188...sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Tarsus Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
- Tezin tüm telif haklarını Tarsus Üniversitesi'ne devrettiğimi

beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Tarsus University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Tarsus University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Tarsus University.

21 Ağustos 2019 / 21 August 2019

İmza / Signature



Erdal BATAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
KISALTMALAR ve SİMGELER	vi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1. Elektrik Motorları	4
2.1.1. DC Motorlar	4
2.1.2. Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi	5
2.1.3. Doğru Akım Motorlarının Kontrolü	6
2.1.3.1. Enkoder	8
2.1.3.1.1 Artımsal Tip Optik Enkoderlar	8
2.1.3.1.2 Mutlak Tip Optik Enkoderlar	9
2.2. PID kontrolörünün yapısı	10
2.2.1. Oransal Kontrolör	10
2.2.2. İntegral Kontrolör	11
2.2.3. Türev Kontrolör	11
2.3. PID Katsayılarını Otomatik Olarak Ayarlama	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	13
3.1. Materyal	13
3.1.1. Deney Düzeneği ve Kontrol Yöntemi	13
3.1.2. DC Motor	14
3.1.3. Motor Sürücü	15
3.1.4. ACS712 Akım Sensörü	15
3.1.5. Arduino	15
3.1.6. Matlab-Simulink'e Arduino Kütüphanesinin Eklenmesi	16
3.2. Yöntem	17
3.2.1. DC Motor Parametrelerinin Bulunması	17
3.2.1.1. Elektromotor Kuvvet Sabiti (Ke) ve Motor Torku Sabiti (Kt)'nin Bulunması	17
3.2.1.2. Atalet Momenti (Eylemsizlik Momenti) (J) 'in Bulunması	18
3.2.1.3. Sürtünme 'nin (B) 'in Bulunması	18
3.2.1.4. Endüvi Direncinin (R)'nin Ölçümü	18
3.2.1.5. İndüktans (L)'nin Ölçümü	19
3.3. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü	20
3.4. DC Motor PID Kontrolü	21
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	24
4.1. Simulink Ortamında DC Motor Kontrolü	24
4.1.1. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü	24
4.1.2. Simulink Ortamında PID Katsayılarının Belirlenmesi	25
4.2. Gerçek zamanlı DC Motor kontrolü	26
4.2.1. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü	26
4.2.2. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım Değerinin Ölçümü	27
4.2.3. Gerçek Zamanlı PI Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız(Rpm) Kontrolü	28
4.2.4. Gerçek Zamanlı PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız(Rpm) Kontrolü	30
4.3. DC Motorun Simulink ve Gerçek Zamanlı Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması	31

4.4. DC Motorun Gerçek Zamanlı ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması	32
4.5. DC Motorun Simulink Ortamında, Gerçek Zamanlı PI ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması	33
4.6. Birim Basamak Performans Ölçütleri	33
4.6.1. En Büyük Aşım	33
4.6.2. Gecikme Zamanı (td)	34
4.6.4. Yerleşme Zamanı (ts)	34
4.6.3. Yükselme Zamanı (tr)	34
4.7. Performans İndisleri	35
4.7.1. ISE(Integral Square Error: Hata karenin integrali)	35
4.7.2. ITSE (Integral of Time Square Error: Zaman Kare Hatanın İntegrali)	36
4.7.3. IAE(Integral of Absolute Value of Error: Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali)	36
4.7.4. ITAE (Integral of Time Absolute Error: Zaman Mutlak Hatanın İntegrali)	36
4.7.5. ISE, ITSE, IAE ve ITEA Performans İndislerinin Simulink Modellerinin oluşturulması:	36
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	38
KAYNAKLAR	40
EKLER (Var ise)	
ÖZGEÇMİŞ	42

ÖZET

MATLAB SİMULİNK ORTAMINDA KULLANILABİLEN ARDUİNO TEMELLİ KONTROL DENEY SETİ TASARIMI

DC Motorlar konum ve hız kontrolü gerektiren uygulamalarda düşük hızlarda yüksek tork kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Açık çevrim kontrol edildiklerinde tatmin edici sonuçlar elde edilemediği için kapalı çevrim olarak kontrol edilirler. DC Motorların yüksek hassasiyet gerektirmeyen uygulamalarda kontrolü için PID denetleyiciler kullanılır. Endüstriyel kontrolde PID kontrol yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu nedenle çıkış değeri üzerinde büyük etkisi olan PID parametrelerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. PID Kontroller nesnesi ile PID Tuner ara yüz programı kullanılarak PID katsayıları bulunabilir. Kullanıcılar tarafından kolay kullanılması amacıyla tasarlanan Arduino mikrodenetleyicisi gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Arduino ile motor sürücü kullanılarak DC Motor istenilen PWM değerinde çalıştırılır.

Bu tez çalışmasında bir DC Motorun çeşitli ölçüm ve deneyler sonucunda bulunan matematiksel parametreleri kullanılarak Matlab-Simulink ortamında simülasyon ve gerçek zamanlı davranışları incelenmiştir. DC Motor sürücü sisteminin simulink benzetim modeli yapılmış ve elde edilen sonuçlar oluşturulan gerçek zamanlı deneysel model ile karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı kontrol için oluşturulan simulink modeli kullanılarak Arduino mikrodenetleyicisine bağlı DC Motorun PWM (Pulse Width Modulation/Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniğiyle üretilen kontrol sinyalleri ile gerçek zamanlı kontrolü sağlanmıştır. Ölçülen hız bilgileri PID kontrolöründen geçirilerek DC Motorun hızı kontrol edilmiştir. Simülasyon ortamında belirlenen PID katsayıları gerçek zamanlı kontrole uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca DC Motorun gerçek zamanlı kontrolünde PI ve PID kontrolörler kullanılarak elde edilen hız(rpm) sonuçları karşılaştırılmıştır. PI ve PID kontrolör kullanılarak aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda ISE, ITSE, IAE ve ITAE gibi farklı kriterler kullanılarak kontrolörlerin performansı kıyaslanmıştır.

DC Motorun sistem modelleme çalışmalarında tercih edilmesi ve kullanıcıların kolaylıkla ulaşabildiği bir eleman olduğu için yapılan bu deney seti öğrenciler, öğretmenler ve diğer kullanıcıların faydalanabileceği biçimde hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: DC Motor, Gerçek Zamanlı Kontrol, PID Denetleyici, Simulink, Arduino

Danışman: Dr. Öğr. Üye. Ercan KÖSE, Tarsus Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tarsus-Mersin.

ABSTRACT

ARDUINO BASED CONTROL TEST SET DESIGN USABLE IN MATLAB SIMULINK ENVIRONMENT

DC Motors are frequently used in applications requiring position and speed control due to their high torque capacities at low speeds. When satisfactory results are not obtained when the open loop is controlled, they are controlled as closed loop. PID controllers are used to control DC motors in applications that do not require high precision. PID control is widely used in industrial control and therefore it is important to determine the PID parameters that have a large impact on the output value. The PID Controls object can be used to find PID coefficients using the PID Tuner interface program. Designed for easy use by users, the Arduino microcontroller is widely used in real-time control applications. Using the Arduino motor drive, the DC Motor is operated at the desired PWM value.

In this thesis, simulation and real-time behavior of a DC Motor in Matlab-Simulink environment are investigated by using mathematical parameters obtained from various measurements and experiments. Simulink simulation model of DC motor drive system is made and the obtained results are compared with real time experimental model. Using the simulink model for real-time control, real-time control of the DC Motor connected to Arduino microcontroller is provided by PWM (Pulse Width Modulation) control signals. Measured speed information is passed through PID controller and the speed of DC Motor is controlled. PID coefficients determined in simulation environment were applied to real time control. The results were compared with the results obtained in the simulation environment. Furthermore, the speed (rpm) results obtained by using PI and PID controllers in real time control of DC Motor were compared. The performance of the controllers were compared using different criteria such as ISE, ITSE, IAE and ITAE.

Since DC Motor is preferred in system modeling studies and is easily accessible to users, this experiment set has been prepared for students, teachers and other users.

Keywords: DC Motor, Real Time Control, PID Controller, Simulink, Arduino

Advisor: Asst. Prof. Ercan KÖSE, Department of Manufacturing Engineering, Tarsus University, Tarsus-Mersin.

ÖNSÖZ

Yükseklisans çalışmamda desteklerini benden esirgemeyen, akademik ve sosyal anlamda her türlü bilgisini paylaşan değerli Tez Danışman Hocam Dr. Öğr. Üye. Ercan KÖSE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Teknoloji Fakültesi öğretim üyelerine çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Elektronik devre tasarımı konusunda verdiği büyük destekler için değerli arkadaşım Murat TÜRKASLAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve destek için eşim ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.



TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. DC Motor parametreleri	14
Tablo 4.1. Birim Basamak Yanıtı Değerleri	35
Tablo 4.2. Ölçülen Performans İndis değerleri	37



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. DC Motorlarda bazı kısım ve elemanlar	5
Şekil 2.2. DC Motorlar temel parçaları	5
Şekil 2.3. PWM sinyali ve doluluk boşluk oranı	7
Şekil 2.4. Arduino'nun PWM Tekniği ile Motor Sürme Yapısı	7
Şekil 2.5. PWM Tekniği ile Elde Edilen Çeşitli Sinyaller	8
Şekil 2.6. Artımlı enkoder	9
Şekil 2.7. Artımlı enkoder çıkış kanalları	9
Şekil 2.8. Mutlak enkoder	10
Şekil 2.9. Oransal kontrolörün birim basamak yanıtı	10
Şekil 2.10. Türev Kontrolörü	12
Şekil 2.11. PID Tuner ile Otomatik PID Ayarlama Ekranı	12
Şekil 3.1. Deney düzeneği: Arduino Uno, Motor Sürücüsü, Akım Sensörü, DC Motor	13
Şekil 3.2. Dc Motor	14
Şekil 3.3. Acs712 Akım Sensörü	15
Şekil 3.4. Arduino Uno Pin Tanımlamaları	16
Şekil 3.5. Matlab-Simulink'e Arduino Kütüphanesinin Eklenmesi	16
Şekil 3.6. DC Motor elektriksel modeli	17
Şekil 3.7. Endüvi Direncinin (R)'nin Ölçümü	19
Şekil 3.8. İndüktans (L)'nin Ölçümü	19
Şekil 3.9. DC Motor Simulink Modeli	20
Şekil 3.10. Geri Beslemeli Bir Denetim Sistemi Blok Diyagramları	21
Şekil 3.11. PID Denetim (Geri Beslemeli)	22
Şekil 3.12. PID Denetleyicinin Yapısı	22
Şekil 4.1. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü Simulink Modeli	24
Şekil 4.2. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği	24
Şekil 4.3. PID Kontroller Blok Parametreleri	25
Şekil 4.4. PID Tuner ile Kontrol Parametrelerinin Bulunması	25
Şekil 4.5. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü Simulink Modeli	26
Şekil 4.6. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği	27
Şekil 4.7. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım Değerinin Ölçümü Simulink Modeli	27
Şekil 4.8. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım-Zaman Grafiği	28
Şekil 4.9. DC Motorun Gerçek Zamanlı PI Kontrolü için Simulink Modeli	29
Şekil 4.10. Gerçek Zamanlı DC Motor PI Kontrolü Hız(Rpm)-Zaman Grafiği	29
Şekil 4.11. DC motor PID Denetimi (Geri Beslemeli)	30
Şekil 4.12. DC motor PID kontrolü Simulink Modeli	30
Şekil 4.13. Gerçek Zamanlı PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği	31
Şekil 4.14. DC Motorun Simulink ve Gerçek Zamanlı Hız-Zaman Grafikleri	32
Şekil 4.15. DC Motorun Gerçek Zamanlı ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafikleri	32
Şekil 4.16. DC Motorun Simulink Ortamında, Gerçek Zamanlı PI ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafikleri	33
Şekil 4.17. Birim Basamak Yanıtı Performans Ölçütü Parametrelerinin temsili gösterimi	34
Şekil 4.18. PI Kontrolöre Performans İndislerinin Eklenmesi	37
Şekil 4.19. PID Kontrolöre Performans İndislerinin Eklenmesi	37

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simgesi	Tanım
MATLAB	Matris Laboratuvarı
SIMULINK	Matlab içinde dinamik sistemleri modellemeye ve simülasyonunu gerçekleştirmeye yarayan bir yazılım ortamı.
PI	Oransal-İntegral Kontrol
PID	Oransal-İntegral-Türev
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
USB	Evrensel Seri Veriyolu
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan-Etkili Transistor
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
BLDC	Fırçasız Doğru Akım
GR	Dişli oranı
ISE	Hata Karenin İntegrali
ITSE	Zaman Kare Hatanın İntegrali
IAE	Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali
ITAE	Zaman Mutlak Hatanın İntegrali
K_p	PID kontrolörünün oransal kazanç sabiti
K_i	PID kontrolörünün integral kazanç sabiti
K_d	PID kontrolörünün türev kazanç sabiti
K_t	Motor Torku Sabiti
K_e	Elektromotor Kuvvet Sabiti
B	Sürtünme katsayısı
J	Eylemsizlik Momenti
L	İndüktans
R	Direnç
V	Besleme Gerilimi
ω	Açısal Hız
d	Kıyıcı görev Peryodu
I	Akım
i	Akım
A	Amper
τ	Zaman Sabiti
u	Kontrol değişkeni
e	Etkin hata
td	Gecikme Zamanı
tr	Yükselme Zamanı
ts	Yerleşme Zamanı

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerji kaynaklarının giderek azalması ve enerji fiyatlarındaki artış, elektrik motorlarının önemini arttırmıştır. Dünyada elektrik motorları tarafından tüketilen elektrik enerjisi, dünyada üretilen elektrik enerjisinin %60'ıdır. Bu nedenle, enerji tasarrufu için elektrik motorlarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Birçok ülke, enerji tasarrufu programları çerçevesinde, elektrik motorlarının kullanımının yaygınlaştırılması ve geliştirilmesi için destek sağlamaktadır.

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi ile elektrik motorlarda kullanılan manyetik malzemelerin geliştirilmesi, motor sürücülerinde kullanılan elektronik elemanların yeterli yüksek hızlara ulaşmaları ile özel elektrik motorları üretilmektedir. En çok üretilen motorlar ise fırçasız DC Motorlardır.

Fırçasız DC Motorların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Daha çok küçük ve güçlü motorlar olarak üretilmektedir. Üretilen bu fırçasız DC Motorların en büyük avantajları yüksek verim, sessiz çalışma ve düşük bakım giderinin olmasıdır. Bu avantajlar fırçasız DC Motorlar; bilgisayarlar, uzay araçları, endüstri ve ev gereçlerinde kullanılmaktadır. Fırçasız DC Motorların kullanımı gelecekte artarak devam edecektir [1].

Yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler yüksek performanslı elektrik motor sürücülerinin geniş alanlarda kullanımını sağlamıştır. Yarıiletken teknolojilerindeki bu gelişme mikroişlemcileri de olumlu yönde etkilemiştir. Mikroişlemcilerin daha düşük enerji tüketimini, daha küçük, daha hızlı ve daha ucuz olmasını sağlamıştır. Mikroişlemciler, işlem fonksiyonlarının tümünü sayısal olarak gerçekleştirebilirler. Daha önceleri üzerinde değişiklik yapılamayan pahalı bazı uygulamalar, mikroişlemciler kullanılarak daha kısa sürede ve daha ucuz olarak yapılabilmektedir [2]. Düşük enerji tüketimi, kolay programlanabilirlik ve düşük maliyet gibi özellikler, mikrodenetleyicilerin kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanımını sağlamıştır.

Endüstrinin en temel ögesi kontroldür. Endüstriyel alanlarda elde edilen ürünlerin kaliteli ve istenilen düzeyde olması için ve bunun sürekliliğini kalite ile birlikte yapmak için kontrole yüksek önem verilmektedir. Kontrol, endüstride kullanıldığı gibi günlük yaşamımızda da çok kullanılmaktadır. Örneğin asansörler, klimalar, otomatik kapılar, ısıtıcı ve soğutucular sayılabilir. Günümüzde kullanılan sistemler genelde insan gücü az ya da insan gücünden bağımsız sistemlerdir. Otomasyonun gelişimi ile kontrol sistemleri ile donatılmış sistemler kullanılmıştır. Bu durumun gerçekleşmesi ile kontrol, fabrikalarda, santrallerde veya hayatımızın her yerinde kullanılmaktadır [3, 4].

Geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sistemlerinde PID denetleyici daha çok kullanılır. PID denetleyici ise var olan hata miktarına bağlı olan Oransal (P), geçmiş hata genliğinin toplamını oluşturan Türevsel (D) ve gelecekteki hata genliğinin tahminini temsil eden İntegral (I) parametrelerinden oluşur [3, 5]. Bu parametrelerin kullanılması ile kontrol sinyali elde edilir. Elde edilen bu kontrol sinyali sisteme uygulanması ile çıkış oldukça başarılı sonuçlar elde edilmektedir [6].

PID denetleyicisinin endüstriyel alanda ve günlük alanda önemli yer tutması PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasına ile ilgili çok fazla çalışma bulunmaktadır [7]. PID parametrelerinin belirlenmesinde için yapılan çalışmalar için önerilen yöntemlerin özelliği, PID parametrelerinin belirlenmesinde açık çevrim ve kapalı çevrimde sistemin gösterdiği çıkış karakteristiğinin kullanılması gerekmektedir [4, 6]. Kolay uygulanabilmesi de bu yöntemlerin bir başka artı özelliği olarak bilinmektedir.

Geri beslemeli kontrol sistemlerinde, PID denetleyicinin girişi için istenilen nokta ile sistemin çıkışı arasında kalan fark elde edilen hata değeridir. Denetleyici, çıkan hata miktarı ve değişime bağlı olarak istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır.

Yüke bağlı olarak DC Motorların hızı değiştiği için, sabit hız uygulamalarında açık çevrim kontrolü istenilen bir yöntem değildir ve DC Motor hız kontrollerinde genellikle kapalı çevrim kontrolü tercih edilir. Kapalı çevrimde hız kontrolünü sağlamak için motor hızını sürekli geri beslemek gerekir. DC Motorun hızı tasarlanan bir kontrolörden geçirilir ve motor için gerekli olan gerilim hesaplanır ve motora uygulanır. Tasarlanan sisteme göre encoder veya takogeneratör kullanılarak, motor hızı ile mikrodenetleyici arasında bağlantı kurulur. Ancak mikrodenetleyici ile bağlantı gerçekleştirildikten sonra DC Motora uygulanacak gerilimin ayarlayabilmesi için PWM (Pulse Width Modulation/Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniği kullanılabilir. Bu çalışmada PWM sinyali Arduino mikrodenetleyici yardımı ile üretilmiştir.

Mikrodenetleyiciler; CPU (Central Processing Unit Merkezi İşlem Birimi), PROM (Programmable Read- Only Memory - Tek Bir Defa Programlanabilir Bellek), ROM (Read-Only Memory – Sadece Okunabilir Bellek), EPROM (Erasable Programmable Read- Only Memory - Silinip Programlanabilir Salt Okunur bellek), I/O (input/ output - giriş-çıkış) portları, RAM (Random Access Memory - Rastgele Erişimli Bellek), gibi birimleri içeren entegre devrelerdir. Arduino mikrodenetleyicisi kontrol kartı kontrol sistemlerinde kullanılan yöntemlerden biridir. Arduino kartlarında Atmel ve Arm firmalarına ait mikrodenetleyiciler bulunmaktadır. Bu Arduino Yazılım Geliştirme Kartları kullanıcıların kolay uygulamalar geliştirmeleri için tasarlanmış kartlardır [8].

Arduino, herkes tarafından geliştirilebilen açık kaynak kodlu, kullanımı kolay, üst seviye mikroişlemci bilgisi gerektirmeyen, kütüphane desteği olan, çevresiyle etkileşime girebilen, piyasadaki bir çok sensör ve haberleşme sistemleri ile uyumlu çalışabilen geliştirme kartlarıdır. Tüm bunlar bir arada düşünüldüğünde, bu kartların başta endüstriyel otomasyon sistemleri ve veri toplama sistemleri olmak üzere çoğu sektöre girmeye aday olduğunu görülmektedir

Arduino mikrodenetleyicisi herhangi bir araca gerek kalmadan bilgisayara usb portu üzerinden bağlanarak kolayca programlanabilir. Arduinoyu programlamak için Arduino IDE programı kullanılır. Arduino usb port üzerinden bilgisayara bağlandığı için Matlab-Simulink gibi programlarla kullanımını daha da kolaylaştırmıştır.

Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi ile kontrol teorisi alanında birçok gelişmiş ve karmaşık kontrol uygulaması yapılmaktadır. Kontrol sistemlerinde, motor hız kontrollerinde PID kontrol

işlemleri, PID kontrolörlerin yapısının, bakımının ve ayarının basit olmasından dolayı bugün dahi kullanılmaktadır. PID parametrelerinin kontrol sisteminin davranışı üzerinde büyük etkisi vardır ve bu parametrelerin belirlenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Bununla birlikte, lineer olmayan süreç sisteminin zamana bağlı karakteristiği yüzünden, hala etkin bir teknik tespit edilememiştir. PID kontrollerin tasarımında dikkat edilecek hususlardan biri ise belirli çalışma kriterine göre kontrol parametrelerinin belirlenmesi gerekir.

Bu çalışma ile Arduino mikrodenetleyicisi ve Matlab-Simulink programı kullanılarak oluşturulan simulink modeli ile ölçülen hız bilgileri PID kontrolöründen geçirildikten sonra, PWM (Pulse Width Modulation/Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniğiyle üretilen kontrol sinyalleri yardımıyla Arduino mikrodenetleyicisine bağlı DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü sağlanmıştır. İstenilen PWM değeri DC Motora verilerek DC Motorun kontrolü sağlanmıştır. DC Motorun akım, gerilim ve hızı ölçülmüştür. Ayrıca DC Motor sürücü sisteminin Matlab-Simulink ile benzetimi yapılmış, elde edilen benzetim sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon işleminde yükselme zamanları, yerleşme zamanları ve aşma zamanları gibi birim basamak performans ölçütleri dikkate alınmıştır. ITAE (Integral of Time Weighted Absolute Error), IAE (Integral of Absolute Error), ISE (Integral of Squared Error) ve ITSE (Integral of Time Weighted Squarred Error) gibi farklı performans kriterleri kullanılarak PI ve PID kontrolör sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Elektrik Motorları

Elektrik motorları günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinelere elektrik motorları denir. Çalışma gerilimlerine göre:

- Doğru Akım Motorları
- Alternatif Akım Motorları

Olarak iki şekilde gruplandırılmaktadır. Alternatif akım motorları AC voltaj, Doğru akım motorları ise DC voltaj ile çalışır.

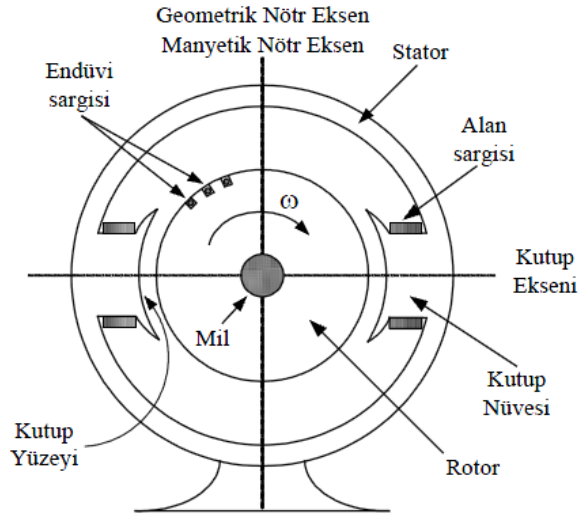
2.1.1. DC Motorlar

DC Motorlar DC voltaj ile çalışırlar. DC Motorlara doğru akım verildiğinde çıkışından mekanik enerji elde edilir. Doğru akım motorlarının hızlarının kolay kontrol edilebilmesi sebebi ile birçok alanda kullanılmaktadır. Doğru akım motorlarında akımla beslenen kolektörden zamanla kıvılcım çıkma olasılığı olduğu için kullanım esnasında yangın çıkabilir. Bundan dolayı DC Motorlar hassaslık gerektiren bazı alanlarda kullanılmaz. Bu durumda DC Motorların dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

DC motorlar gerilimin verilmesiyle elektromekanik enerji dönüşümünde kullanılmaktadır. DC Motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

- Manyetik alan içerisinde bir iletken hareket ettiğinde iletkende gerilim indüklenmiş olur.
- Manyetik alan içine akım taşıyan bir iletkenin konulması ile iletkende mekanik bir güç meydana gelir.

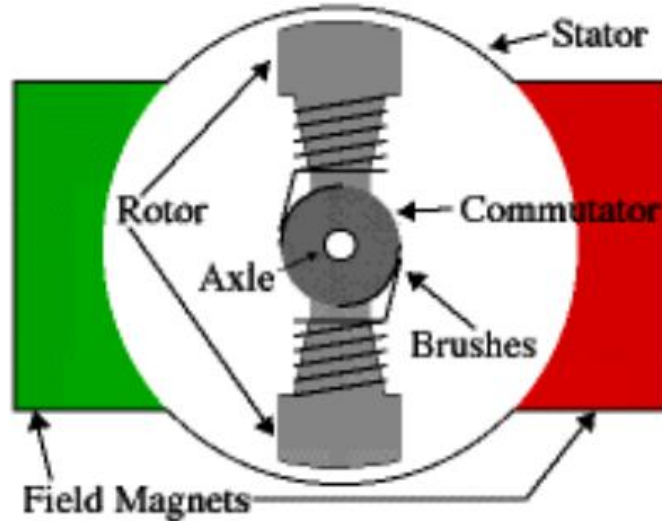
DC Motorlarda elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi veya tam tersi olarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi eşzamanlı olarak meydana gelir. Motor, manyetik alan içerisine akım taşıyan iletkenlerin yerleştirilmesi ile oluşturulan bir elektromekanik elemandır. Bunun sonucunda motorda bir güç ortaya çıkar. Şayet manyetik alan içerisindeki iletkenlerin konumu ve yapısı dönmeye uygun ise, bir elektromanyetik moment oluşur. Oluşan bu moment ile rotorun bölümünün dönmesi sağlanır. Diğer jeneratör çalışmalarında ise, iletkenler manyetik alan içerisinde döndürülmesi ile her bir iletkende gerilim indüklenir.



Şekil 2.1. DC Motorlarda bazı kısım ve elemanlar [9].

2.1.2. Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi

Eğer üzerinden akım geçen bir iletkenin bir manyetik alan içerisinde geçirilirse iletkene bir kuvvet etki eder. Sol el kuralıyla da bu kuvvetin yönü belirlenir. DC Motorların içerisinde bulunan iletken tel ile DC bir voltaj uygulanmaktadır. Bu tel motorun içerisindeki manyetik alanın da içerisindeydir. Bu iletken telden akım geçirildiği zaman, ortaya çıkan kuvvetin etkisi ile dönme başlar. Eğer bu akım ters yönde olursa, motorun dönüş yönü de ters yönde olur.



Şekil 2.2. DC Motorlar temel parçaları [9].

DC Motorlar 6 temel parçanın birleşiminden oluşur. Bu parçalar stator, aks, komütatör, rotor (armatür), uyarma mıknatısları ve fırçalardır. Stator, motor gövdesi içerisindeki ve 2 ya da daha fazla manyetik kutup içeren DC Motorun sabit bir parçasıdır. Aks ve komütatör ile beraber dönen

kısım ise motorun dönen parçasıdır. Rotorun üzerinde bulunan sargıların komütatör ile bağlantısı vardır. İlk enerji verilmesi ile birlikte fırça, komütasyon kontakları ve rotor sargılarının yeri doğru konumda değil ise rotor doğru pozisyona gelene kadar dönecektir. Rotor doğru konuma geldikten sonra fırçalar daha sonraki komütasyon kontağına doğru, diğer sargıya enerji vermek için gidecektir.

İki kutuplu DC Motorlarda motorun dönmesi ile rotor sargılarının içerisindeki akım yönünü değiştirir ve bu durum manyetik alanın da yönünün değişmesi ile dönme hareketinin devamı sağlanmış olur.

2.1.3. Doğru Akım Motorlarının Kontrolü

Doğru akım motorlarında hız, alternatif akım motorlarına göre dış etkenlerden daha az etkilenir. Belirli bir hız değerinde çalışması istenen sistemlerde alternatif akım motorları yerine doğru akım motorları tercih edilir ve doğru akım motorlarının yön kontrolleri de kolaydır. Sadece motor uçları ve besleme gerilimi bağlantı uçları ters bağlanırsa doğru akım motorunun dönüş yönü de ters yönde değiştirilmiş olur.

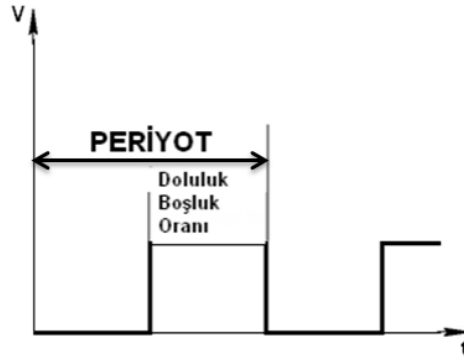
Bu çalışmada motoru sürmek için transistör kullanılmıştır. Transistörün base ucuna sinyal gönderilerek, transistör ilettime geçirilmiştir. Transistörün ilettime geçmesi ile besleme voltajı motor uçlarına ulaşır ve bu besleme gerilimi ile motorun tek yönlü dönmesi sağlanmıştır. İkinci bir transistör kullanılarak motorun ters yönde dönmesi sağlanabilir.

Doğru akım motorlarının hız kontrolü de çok önemlidir. Doğru akım motorlarının hızlarının kontrol edilebileceği yöntemler:

- Uygulanan gerilimi değiştirme
- Manyetik alanı değiştirme
- Rotor devresine direnç ekleme

Bu yöntemler içerisinde hız kontrolü için en çok motora uygulanan geriliminin değiştirilmesi yöntemi tercih edilir. DC Motorlara uygulanan gerilimin değiştirilmesi işlemi direnç kullanılarak gerilimin bölünmesi, PWM (Pulse Width Modulation/arbe genişlik modülasyonu) sinyalinin doluluk boşluk oranının değiştirilmesi, kesici ile gerilimin verilmesi gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada DC Motorların hızı Arduino mikrodenetleyicisi tarafından gönderilen PWM sinyali ile ayarlanmaktadır ve sadece PWM sinyali ile DC Motor hız kontrolünden bahsedilmiştir.

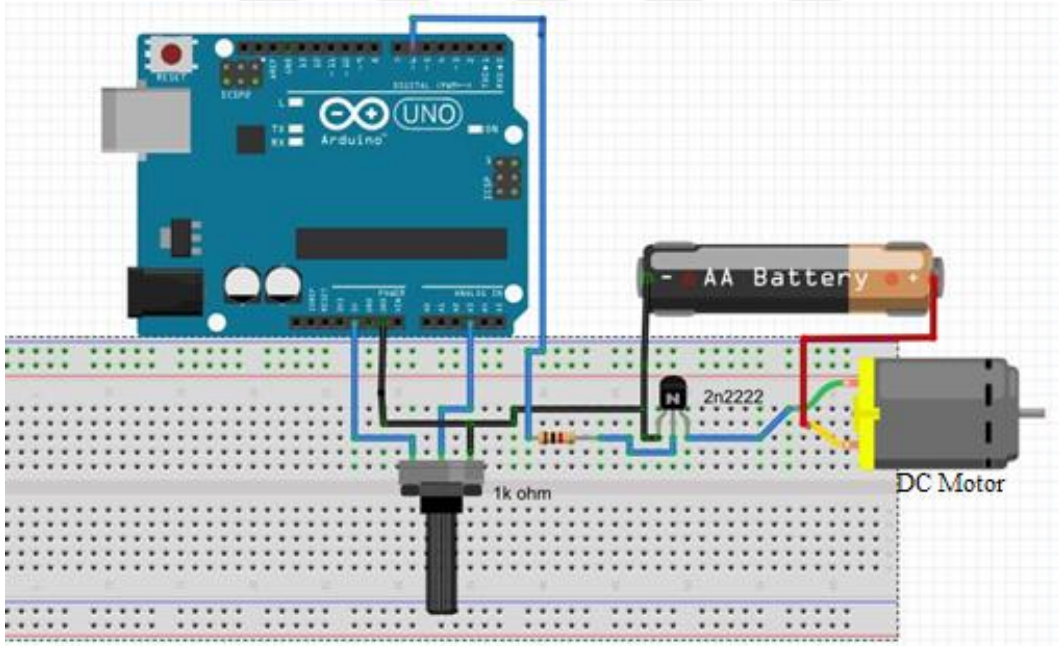
PWM tekniği mikrokontrolör gibi elemanlar kullanılarak kolaylıkla uygulanabilir. PWM tekniği DC Motorların sürülmesinde çok tercih edilir. PWM ile darbelerin genişlikleri değiştirilerek, voltaj seviyeleri değiştirilir. Oluşan bu darbe genişliklerine doluluk boşluk oranı denir.



Şekil 2.3. PWM sinyali ve doluluk boşluk oranı [10].

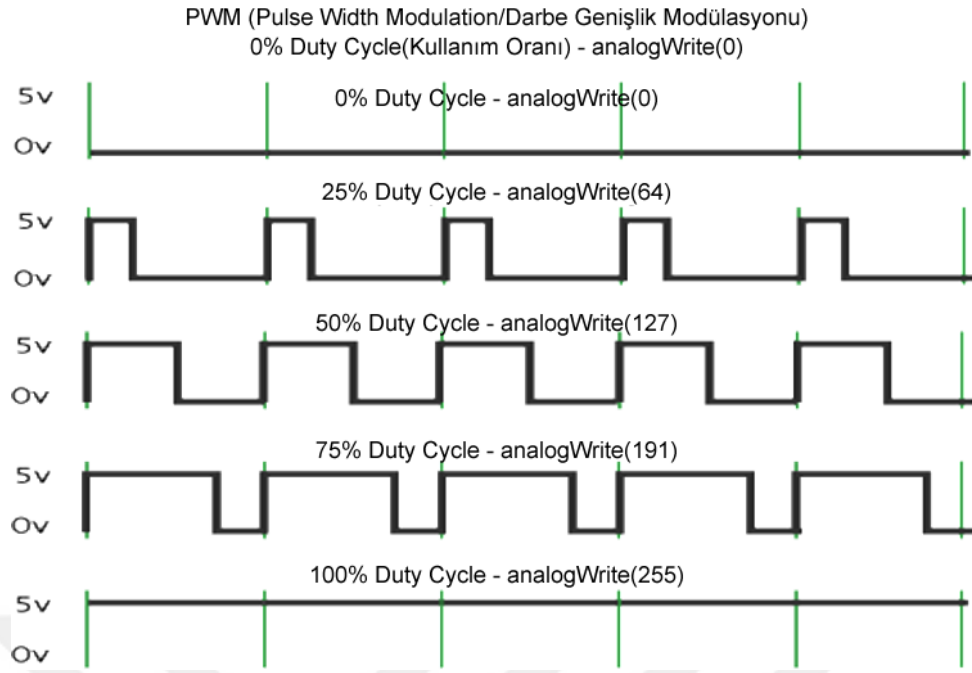
PWM sinyalinin en büyük özelliği özelliği yüksek frekanslarda oluşturulmasıdır. Yüksek frekanslarda oluşturulan PWM sinyallerinin motora uygulanması ile motora doğru akım verilmiş olur.

PWM sinyali ile transistor, mosfet, optocoupler ve farklı motor sürücü entegreler gibi birçok devre elemanları kullanılarak DC Motor sürülebilir. Bu devre elemanları kullanılırken en önemli husus seçilen devre elemanının çalışma frekansının uygulanan PWM sinyalinden yüksek olması gerekir. Aksi halde devre elemanı PWM sinyaline cevap vermeyebilir.



Şekil 2.4. Arduino'nun PWM Tekniği ile Motor Sürme Yapısı

Arduino mikrodenetleyicisinde de dijital çıkış pinleri kullanılarak PWM tekniği kullanılabilir. Arduino üzerindeki dijital çıkışlarda PWM tekniğinin kullanılması ile dijital sonuçlar elde edilir. Ayrıca elde edilen bu dijital sonuçlardan analog sonuçlar da elde edilebilir. PWM tekniği ile kontrol uygulamaları için gerekli olan kare dalga da üretilmiş olur.



Şekil 2.5. PWM Tekniği ile Elde Edilen Çeşitli Sinyaller

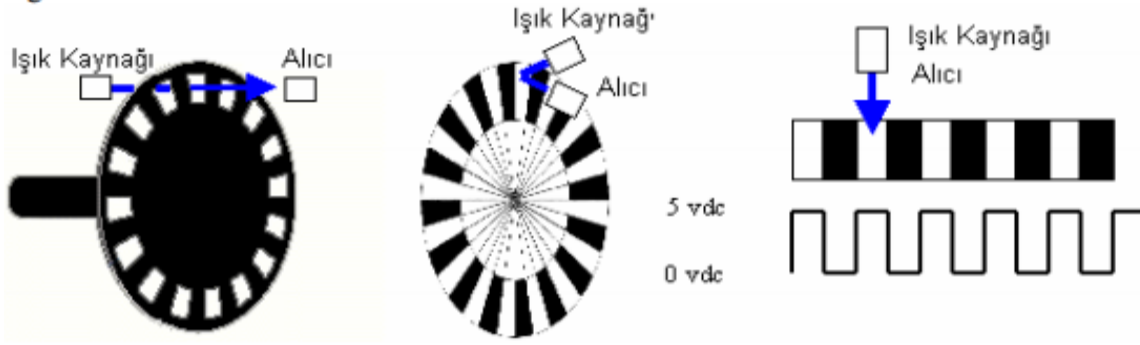
2.1.3.1. Enkoder

Bir milin dönme işlemi esnasında sayısal elektrik sinyali üreten cihazlara enkoder denir. Enkoderler motorun hareket eden bir parçasına bağlanır ve pozisyon ve hareket hızının bulunabileceği dijital sinyaller üretirler. Elde edilen bu sinyallerin değerlendirilmesi ile istenilen bilgiler elde edilebilir.

Enkoderlar çalışma şekillerine göre, şaft ve lineer enkoderlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Bilgiyi okuma şekline göre optik ve manyetik enkoderlar olmak üzere ikiye ayrılır. Optik enkoderlar ise artımsal ve mutlak tip olmak üzere ikiye ayrılır [11].

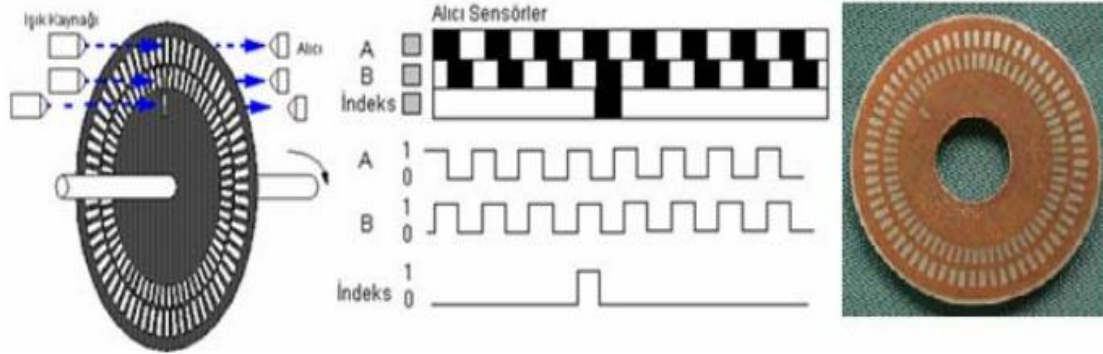
2.1.3.1.1 Artımsal Tip Optik Enkoderlar

Artımsal enkoderlarda ışık yarıklı diskten geçerek alıcıya ulaşır. Yansımali tip enkoderlarda ise ışık, disk üzerinde bulunan siyah ve beyaz çizgilerden yansır. Ancak yansımali tip enkoderlarda konum bilgisi elde edildikten sonra motor milinin dönüş yönü bilinmez.



Şekil 2.6. Artımlı enkoder [11].

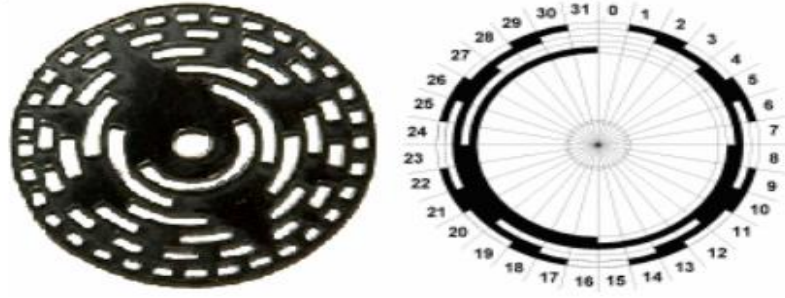
Artımsal enkoderlarda iki sıra hâlinde dizilmiş yarıklar dönüş yönü için kullanılır. Altta ve üstte bulunan yarıklar arasında açıklık vardır. Üst yarıktan gelen sinyal A, alt yarıktan gelen sinyale B kanalı olarak adlandırılır. Milin dönmesi ile mil hızıyla orantılı olarak bu kanallarda pals üretilir ve bu iki sinyal arasında elde edilen fark dönme yönünü belirler. Eğer A kanalı B kanalından önde ise mil saat yönünde döner. Diskin üzerinde bulunan yarık sayısı enkoderin çözünürlüğünü verir. Disk üzerinde 1024 yarık veya iz varsa bu enkoderin çözünürlüğü 1024 adım/tur'dur denilir. Her bir kanaldaki pals sayısı ve çözünürlük bilinmesi ile milin açısal konumu belirlenir. Encoderlarda genellikle üçüncü bir kanal daha vardır ve bu kanala Z ya da indeks kanalı denir. Bu kanal, her turda bir pals üreterek milin dönme sayısı hakkında bilgi verir [11].



Şekil 2.7. Artımlı enkoder çıkış kanalları [11].

2.1.3.1.2 Mutlak Tip Optik Enkoderlar

Mutlak tip enkoderlar milin konumuna göre sadece bir sayısal sinyal üretir. Milin her bir konumunun sayısal bir deseni vardır. İkilik düzende bu sayısal desende bulunan bit sayısı çözünürlüğü verir.



Şekil 2.8. Mutlak enkoder

Disk üzerinde bulunan her bir dairesel sıra veya iz sayısal deseni oluşturur. Örneğin disk üzerinde 8 adet iz bulunuyorsa enkoder $2^8 = 256$ farklı konumu yani $360/256 = 1.40625$ açıyı bildirebilir.

2.2. PID kontrolörünün yapısı

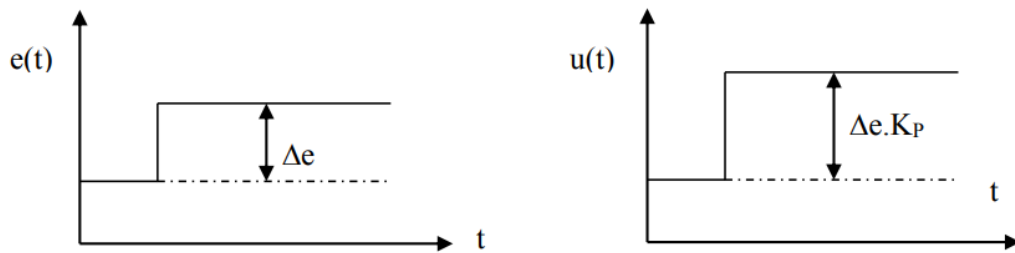
Oransal, integral ve türev kısımlarının toplamıyla PID kontrolör oluşturulur. Bu kısımların her biri sisteme etkileri farklıdır. Kontrol uygulamalarında bu kısımlar ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilir. PID kontrolör en yaygın kontrol algoritmasıdır.

PID kontrolörü yapısı eşitlik (1) de verilen biçime sahiptir. Oransal bölüm, İntegral bölümü ve Türevsel kısmın toplanmasıyla kontrol değişkeni elde edilir [12].

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

2.2.1. Oransal Kontrolör

Oransal kontrolör hata miktarı ile K_p katsayısı ile denetleyici çıkışını üretir. Böylece sistemin statik doğruluğunu artırır. Hatanın sabit değeri için sabit denetleyici çıkışı üretilir. Hatanın devam etmesi durumunda kontrol çıkışında herhangi bir değişiklik olmaz [13].



Şekil 2.9. Oransal kontrolörün birim basamak yanıtı

K sabit kazançlı sistemde kontrol çıkışındaki işaret, girişindeki işarete sabit bir oran ile bağlı olduğundan oransal kontrol olarak bilinir. Şekil 2.9' da Δe sabit hatasında kontrol değişkeninin değişimi görülmektedir.

$$u(t) = Ke(t) \quad (2)$$

Oransal kontrol için eşitlik (1) eşitlik (2) deki gibi sadeleştirildiğinde kontrol işareti kontrol hatasıyla orantılı olduğu görülür ve buda geri beslemenin en basit şeklidir.

2.2.2. İntegral Kontrolör

Hatanın sıfır olmaması kontrol miktarını ve statik doğruluk miktarını artırır. Sisteme eklenen integral bloklarının işlevi çıkışta kararlı hal hatasını ortadan kaldırmaktır. Oransal kontrolde ise kontrol işaretinin sıfır olmaması için hata gereklidir.

Sistemin kalıcı hal kontrol işareti (u_0), kalıcı hata (e_0) ise kontrol işareti:

$$u_0 = (e_0 + \frac{e_0}{T_i} t) \quad (3)$$

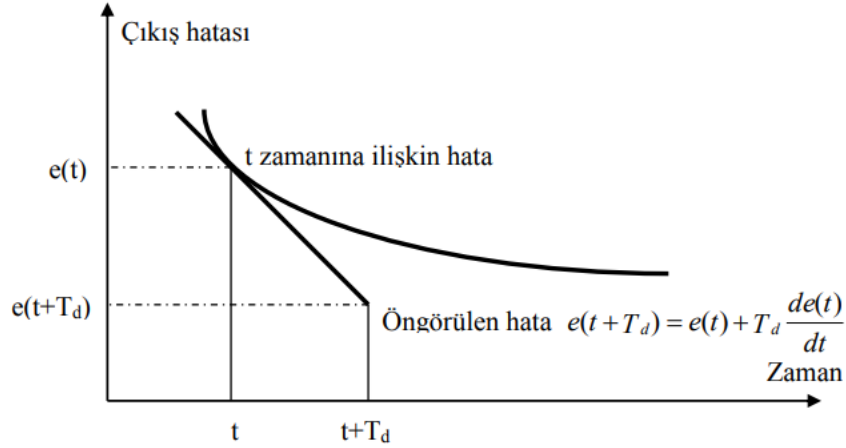
Eşitlik (3)'deki gibi elde edilir. Burada $e_0 \neq 0$ olması ile u_0 değeri sabit olmayacaktır. Böylece integral elemanlı kontrolörlerde kalıcı hata meydana gelmez. Kontrolördeki integral elemanı verilen herhangi bir referans girişi için kontrol edilen sistemin kazancına gerek duymadan doğru u_0 değeri belirler. Bu durumda integral ile oransal kontrolör sıfırlanır.

2.2.3. Türev Kontrolör

Türev kontrolör ile kapalı çevrim kararlılığı artar. Kontrol işaretindeki değişim sistem çıkışına etkisi zaman alır. Oransal ve türev elemanlarından oluşan kontrolör tahmin edilen hataya bağlıdır. Bu tahmin Şekil 2.10'da verildiği gibi eğiminden faydalanılarak belirlenir ve tanımı gereği

$$e(t + T_d) = e(t) + T_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

Eşitlik (4) şeklinde bir ilişki yazılabilir.



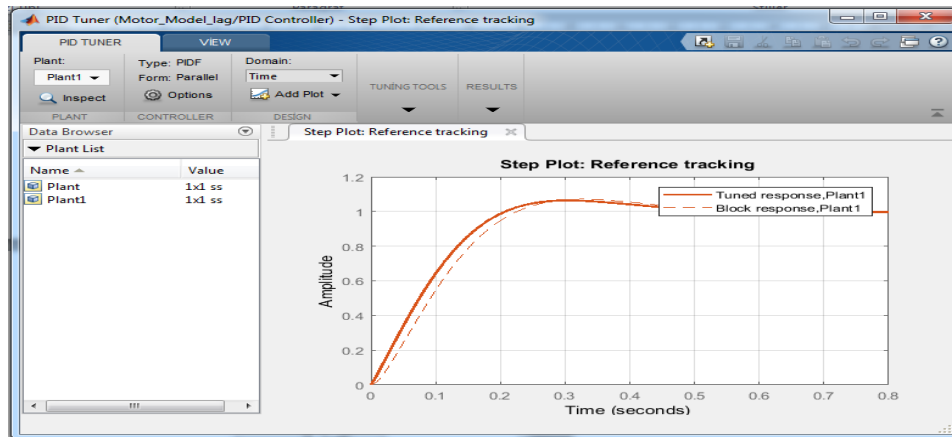
Şekil 2.10. Türev Kontrolörü

Hata sabit olduğunda türevsel kontrolde bir çıkış üretilmez. Ancak kontrol hatanın değişme hızına göre üretilir.

2.3. PID Katsayılarını Otomatik Olarak Ayarlama

PID katsayılarını ayarlama işlemi, tasarım gereksinimlerini karşılamak ve istenen en iyi sonucu elde etmek için Oransal, İntegral ve Türevsel kazançlarının değerlerini bulma işlemidir. PID katsayılarının belirlenmesi kolay gibi gözükse de aslında karmaşıktır. Geleneksel olarak PID denetleyicileri manuel veya kural tabanlı yöntemler kullanılarak ayarlanır. Manuel ayarlama yöntemleri çok tekrar gerektiren ve zaman alıcıdır. Ayrıca ek bir donanım kullanılıyor ise donanımda hasara neden olabilir.

Kural tabanlı yöntemler yerine optimum sistem gereksinimlerini elde etmek ve tasarım gereksinimlerini karşılamak için Matlab programında PID Tuner kullanarak otomatik olarak da bulunabilir. Şekil 2.11’de Matlab ortamında PID katsayılarının elde edilebileceği yapı verilmiştir.



Şekil 2.11. PID Tuner ile Otomatik PID Ayarlama Ekranı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

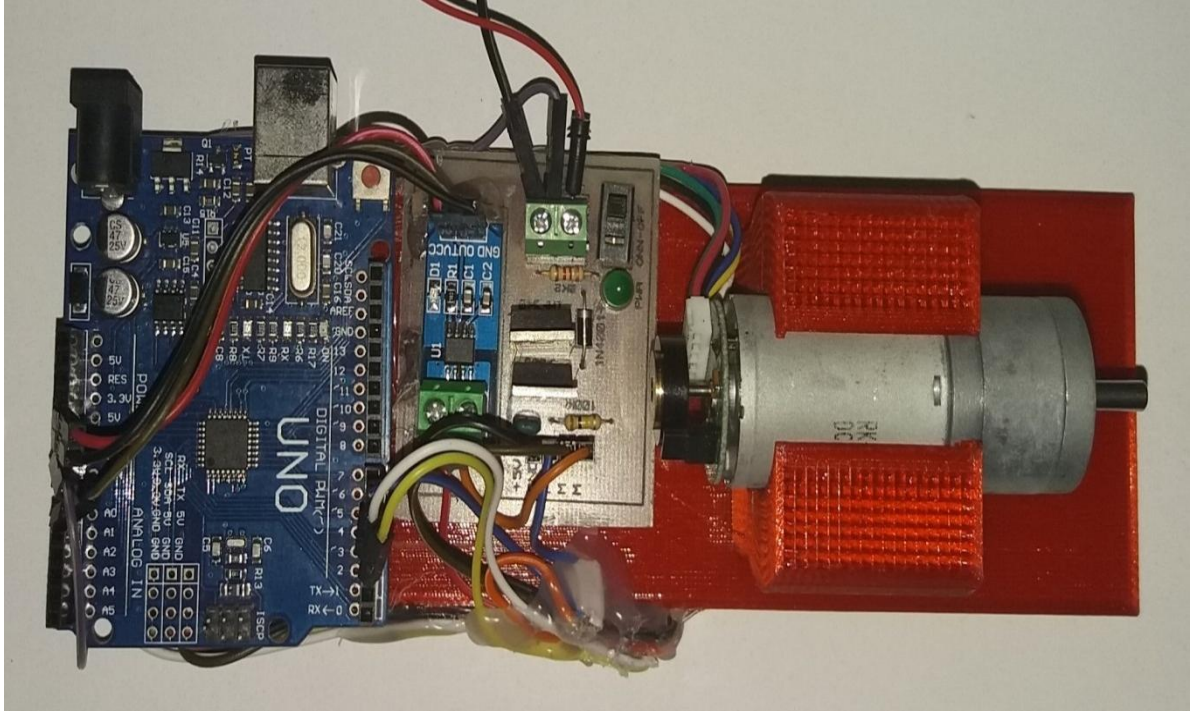
3.1.1. Deney Düzeneği ve Kontrol Yöntemi

Bu bölümde DC Motor parametreleri kullanılarak simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli ile elde edilen PID katsayıları kullanılarak DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Hazırlanan deney düzeneğinde motor sürücüsüne USB port üzerinden komutlarının gönderilmesi ve DC Motorun kontrol edilmesi için Arduino UNO mikrodenetleyicisi kullanılmıştır.

Enkoderli DC Motor, Arduino kartı ve Motor Sürücü kartı ile kontrol edilmiştir. DC Motorun çalıştırılması ile Şekil 4.5’de oluşturulan simulink modeli kullanılarak DC Motorun hızı ölçülmüştür. Şekil 4.1’de verilen simulink modeli kullanılarak simülasyon ortamında elde edilen PID katsayıları kullanılarak PID kontrolör ile DC Motor kontrol edilmiştir.

Arduino kartına Şekil 3.3’de verilen ACS712 akım sensörü bağlanmıştır. DC Motorun çektiği akımı ve gerilimi gerçek zamanlı ölçmek için Hall etkisi tabanlı ACS712 akım sensörü kullanılmıştır. Akım algılayıcıları Hall etkisi tabanlı olduğundan dolayı devre üzerinde yüklemeye etkileri yoktur.

DC Motorun sürülmesi, akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi için kurulan deney düzeneği Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği: Arduino Uno, Motor Sürücüsü, Akım Sensörü, DC Motor

3.1.2. DC Motor



Şekil 3.2. Dc Motor

DC Motorun hızının ölçülmesi için kurulan deney düzeneği Şekil 3.1'deki gibidir. Bu çalışmada 34:1 Metal Redüktörlü 48CPR Enkoderli 280 Rpm 6V DC Motoru kullanılmıştır. Kullanılan DC Motorun parametreleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1. DC Motor parametreleri

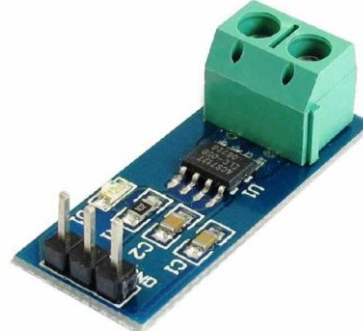
	Parameter (Parametreler)	Estimated Value (Tahmin Edilen Değer)	Unit (Birim)
(<i>J</i>)	Moment of Inertia (Atalet Momenti)	0.01	kg-m ²
(<i>B</i>)	Viscous Friction (Sönümleme Sabiti)	0.1	Nm/rad/s
(<i>K_e</i>)	Back EMF Constant (Motor Gerilim Sabiti)	0.01	V/rad/s
(<i>K_t</i>)	Torque Constant (Tork Sabiti)	0.01	Nm/A
(<i>R</i>)	Resistance (Endüvi Direnci)	2.9	Ω
(<i>L</i>)	Inductance (Endüktans)	291e-3	H

3.1.3. Motor Sürücü

DC motor Arduino kartının dijital çıkışlarından biri ile kontrol edilmiştir. Arduino kartının sağladığı akım düşük olduğu için DC motor doğrudan çalıştırılmamaktadır. DC Motor transistör ile kontrol edilmiştir. Yani DC Motorun çalışma ve durdur işlemi için Arduino kartının dijital çıkışı transistörü açmak ve kapatmak için kullanılmıştır. DC Motorun çalışması için gerekli olan enerji harici bir gerilim kaynağından verilmiştir. Transistör Arduino kartından verilen dijital sinyal ile tetiklendiğinde motor dönmektedir.

3.1.4. ACS712 Akım Sensörü

DC Motorun çektiği akımı ölçmek için ACS712 manyetik etkiye bağlı olarak çalışan akım sensörü kullanılmıştır. Kullanılan ACS712 akım sensörü çeşidine göre 5, 20 ve 30 Amper'e kadar iki yönlü akım girişine izin vermektedir. Analog voltaj (185 mV/A) çıkışını verir. Akım ölçümü çift yönlü giriş akımına izin veren 5A ACS712 akım sensörü ile gerçekleştirilmiştir.



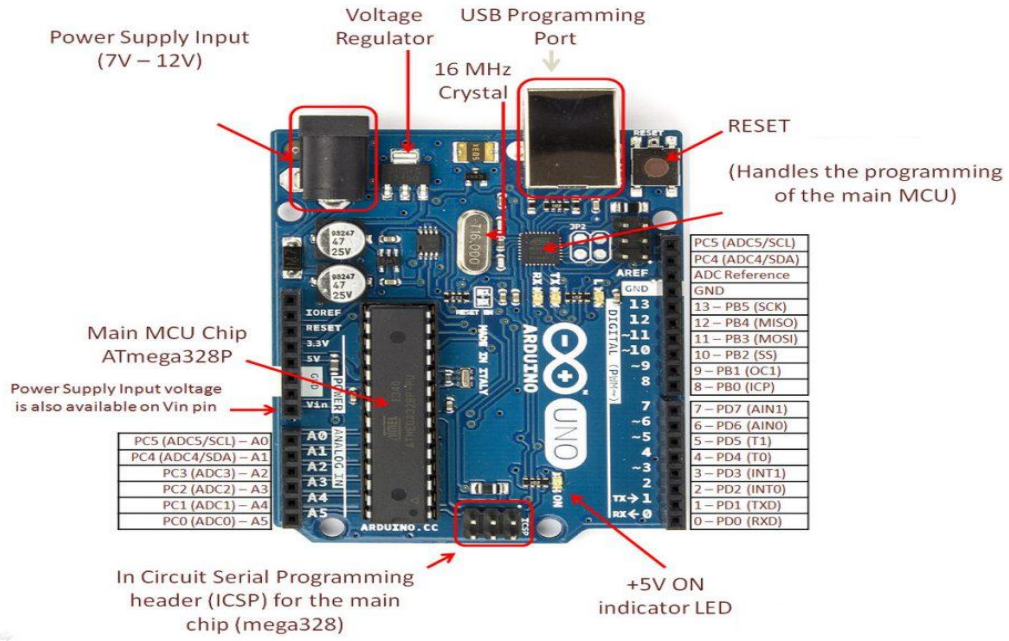
Şekil 3.3. Acs712 Akım Sensörü

3.1.5. Arduino

Arduino, bir bilgisayarın yapabildiği, algılama, fiziksel ortamdaki birden fazla cihaz kontrolü gibi işlemleri yapabilen bir mikrodenetleyicidir. Açık kaynaklı bir fiziksel hesaplama platformudur. Yazılım geliştirmek için Arduino IDE geliştirme ortamı bulunmaktadır [14].

Arduino IDE yazılımı hem kod editörü hem de derleyici olarak görev yapan Java programlama dilinde yazılmış bir uygulamadır. Açık kaynak kodlu bir mimariye sahip olan Arduino kullanımı için hazır kartlar satın alınabilir. Arduino kartının donanım referans tasarımları Arduino web sitesinden indirilebilir ve kullanılabilir [16]. Arduino Atmel'in mikrodenetleyicilerini kullanmaktadır. Harici bir programlayıcıya ihtiyaç duyulmaz [17].

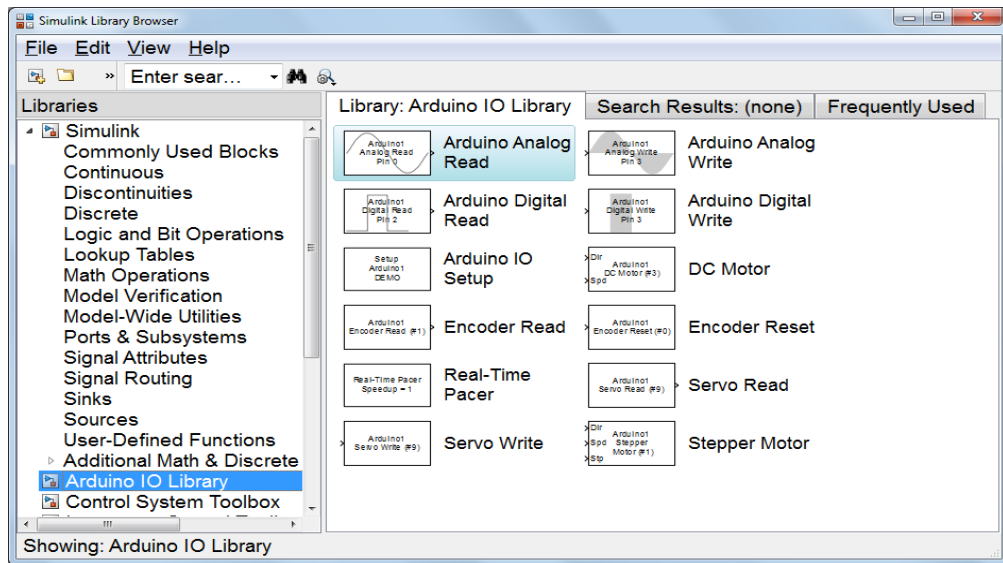
Deney düzeneğinde Şekil 3.4'de verilmiş olan, Arduino Uno mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Arduino Uno Pin Tanımlamaları [14].

3.1.6. Matlab-Simulink'e Arduino Kütüphanesinin Eklenmesi

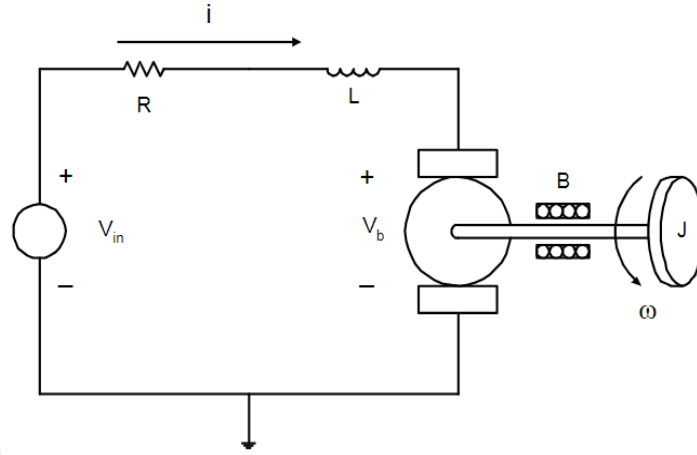
Arduino mikrodenetleyicisini Matlab-Simulink ortamında programlamak ve kontrol etmek için internet ortamında hazır bulunan Arduino IO kütüphanesinin eklenmesi gerekmektedir. Bu kütüphane yardımıyla Arduino mikrodenetleyicisi üzerinde bulunan giriş/çıkış pinleri Matlab-Simulink ortamında bloklar yardımıyla kontrol edilmektedir. Kütüphane ekleme işlemi için Arduino IO paket dosyası internet'ten indirilip bilgisayara kaydedilerek ya da Matlab Add-on butonuna tıklanarak Get Hardware Support Packages seçeneği tıklanarak eklenebilir. Bu yapı Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Matlab-Simulink'e Arduino Kütüphanesinin Eklenmesi

3.2. Yöntem

3.2.1. DC Motor Parametrelerinin Bulunması



Şekil 3.6. DC Motor elektriksel modeli

Şekil 3.6'da DC Motorun elektriksel eşdeğer modeli verilmiştir. Burada V_{in} besleme gerilimini, R endüvi direncini, L endüktansı, V_b geri emf gerilimini, B sönümlenme sabitini, ω açılal hızı, J atalet momentini göstermektedir.

3.2.1.1. Elektromotor Kuvvet Sabiti (K_e) ve Motor Torku Sabiti (K_t)'nin Bulunması

Motora akımı i ve motor milindeki tork τ arasında (5) deki gibi bir ilişki vardır.

$$\tau(t) = K_t i(t) \quad (5)$$

Endüvi akımı ve manyetik alanın gücü DC Motor tarafından üretilen tork ile orantılıdır. Manyetik alanın sabit olduğunu ve bu nedenle, motor torkunun sadece (6), (7), (8) eşitliklerinde gösterildiği gibi i sabit bir faktörle endüvi akımı ile orantılıdır.

$$T = K_t i \quad (6)$$

$$0.06539664 \text{ Nm} = K_t * 6.5 \text{ A} \quad (7)$$

$$K_t = 0.01 \text{ Nm/A} \quad (8)$$

olarak bulunur.

Geri emf, e şaftın açılal hızıyla K_e sabit faktörü ile orantılıdır.

$$e = K_e \omega \quad (9)$$

Kullanacağımız SI birimlerinde, K_t endüvi sabiti, K_e motor sabitine eşittir $K_e = K_t$; bu nedenle, K motor tork sabiti ve endüvi sabitini temsil etmek için kullanılmıştır.

3.2.1.2. Atalet Momenti (Eylemsizlik Momenti) (J) 'in Bulunması

Bu çalışmada kullanılan DC Motorun Pololu firması tarafından laboratuvar şartlarında ölçülen J değeri $J=0.01(kg-m^2)$ 'dir [15].

3.2.1.3. Sürtünme 'nin (B) 'in Bulunması

$$T_m(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) + T_L(t) \quad (10)$$

Yukarıda verilmiş olan eşitlik (10) denklemine göre hız sabit olacağından türevli terim sıfır olur ve eşitlik (11) deki bağıntı elde edilir.

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = 0 \quad \text{ise}$$

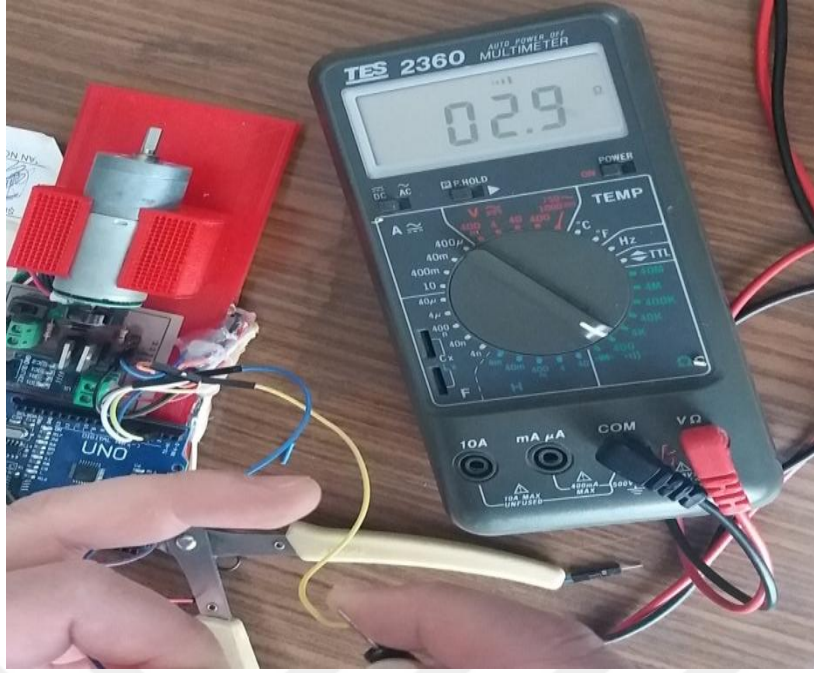
$$T_m(t) = B \cdot \omega(t) + T_L(t) \quad (11)$$

Belirli $T_L(t)$ yük momenti değeri için motor çalıştırılarak mil momenti $T_M(t)$ ve açısal hız $\omega(t)$ değerler ölçülür. Bu değerler kullanılarak grafik çizilir. Bu grafik kullanılarak yapılan eğri uydurma işlemi ile B ve $T_L(t)$ değerleri hesaplanır.

Bu çalışmada kullanılan DC Motorun Pololu firması tarafından laboratuvar şartlarında ölçülen B değeri $B=0.1(Nm/rad/s)$ 'dir [15].

3.2.1.4. Endüvi Direncinin (R)'nin Ölçümü

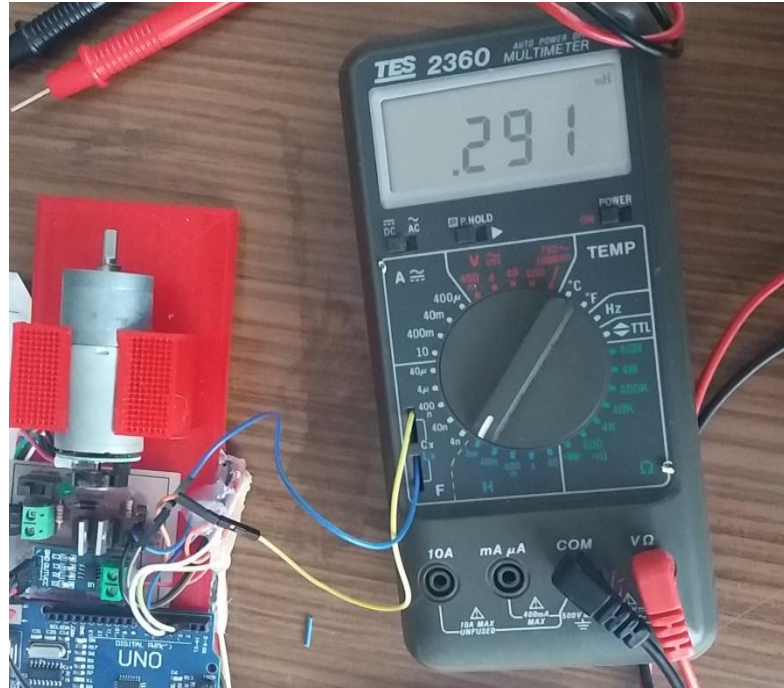
DC Motorun çıkış uçlarına bağlanan dijital multimetre ile Endüvi Direncinin (R)'nin değeri Şekil 3.7' de verildiği gibi $R=2.9\Omega$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Endüvi Direncinin (R)'nin Ölçümü

3.2.1.5. İndüktans (L)'nin Ölçümü

DC Motorun çıkış uçlarına bağlanan dijital multimetre ile İndüktans (L)'nin değeri Şekil 3.8'de verildiği gibi $L=291e-3$ H olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8. İndüktans (L)'nin Ölçümü

3.3. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü

Rotor ataletine etki eden torkların toplanması ve hız kazandırmak için ivmenin entegre edilmesi ile sistem modellenmiştir. Yani, Kirchoff'un yasaları armatür devresine uygulanmıştır. Öncelikle eşitlik (12) ve (13)'deki dönme hızlanmasının integralleri ve armatür akımının değişim oranı modellenmiştir.

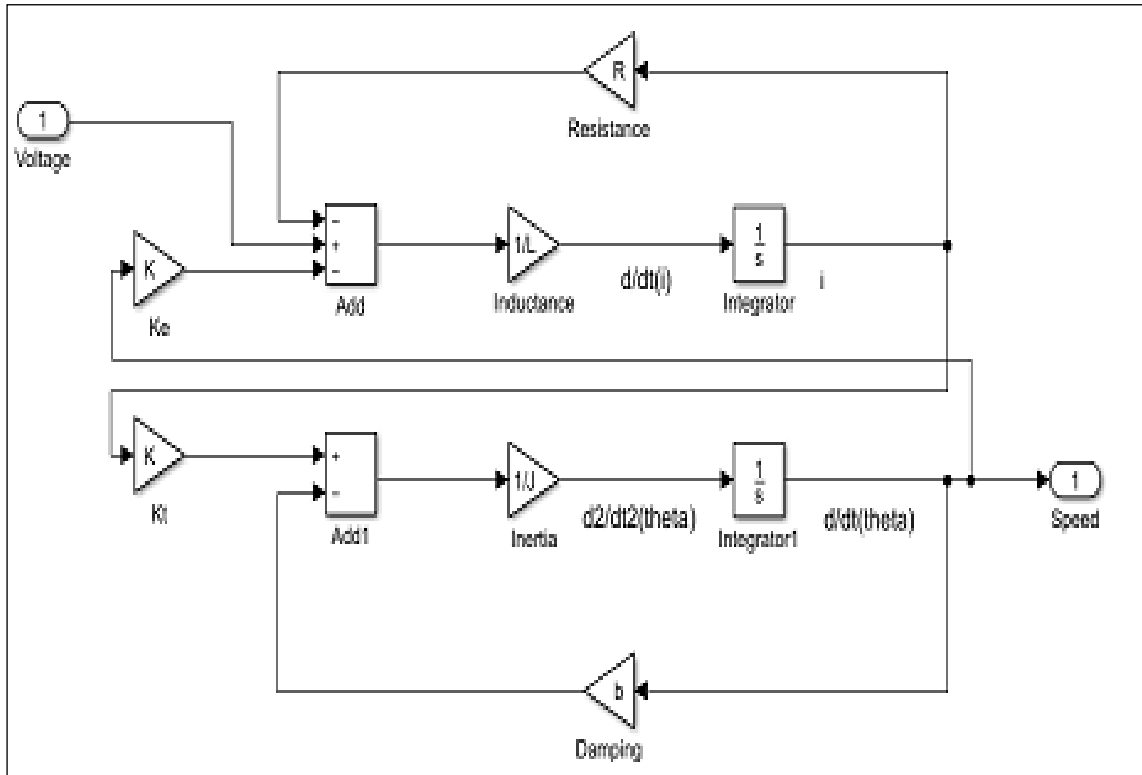
$$\int \frac{d^2\theta}{dt^2} dt = \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

$$\int \frac{di}{dt} dt = i \quad (13)$$

Daha sonra, Newton kanunu ve Kirchoff kanunu kullanılarak eşitlik (14) ve (15)'deki formüller elde edilmiştir ve motor sistemine uygulanmıştır.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T - b \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ise} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} (K_t i - b \frac{d\theta}{dt}) \quad (14)$$

$$L \frac{di}{dt} = -Ri + V - e \quad \text{ise} \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (-Ri + V - K_e \frac{d\theta}{dt}) \quad (15)$$



Şekil 3.9. DC Motor Simulink Modeli

Şekil 3.9’de verildiği gibi simulink modeli oluşturulduktan sonra sistemin girdi ve çıktısı tanımlanmıştır. Simulink modelinde voltaj girişi sinyali ve hız ise çıkış sinyalini oluşturulmuştur.

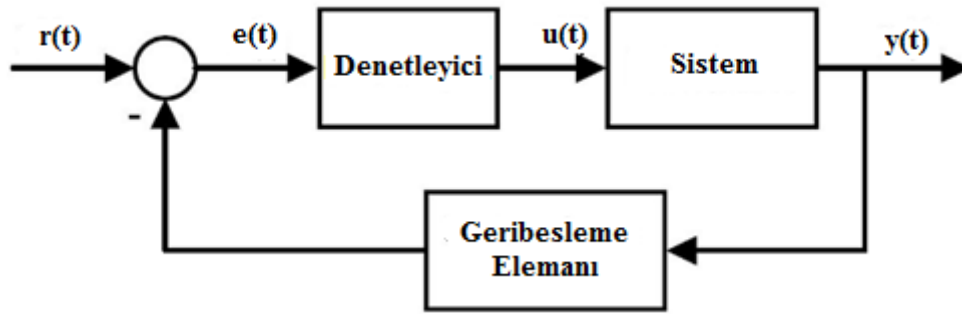
Tablo 3.1’ de verilen DC Motor parametreleri Matlab komut satırına girilerek simulink modeli çalıştırılmıştır.

3.4. DC Motor PID Kontrolü

Tasarlanan bir sistemin kontrol edilmesi ve denetimi önemlidir. Otomatik kontrol için birçok denetim türü kullanılmaktadır. Bu denetim türlerinden birisi de PID denetleyicisidir.

Tasarladığımız deney setinde bir DC Motorun hız kontrolü denetimi için PID denetleyicisi kullanılmıştır.

Kapalı bir döngü sisteminde kontrolörün görevi, ölçme üzerinden geri beslenen çıkış büyüklüğünü ile referans olarak verilen giriş büyüklüğünü karşılaştırarak aradaki farka uygun bir şekilde kontrol sinyal üretmek çıkışa sunar ve sistem kontrol edilir.



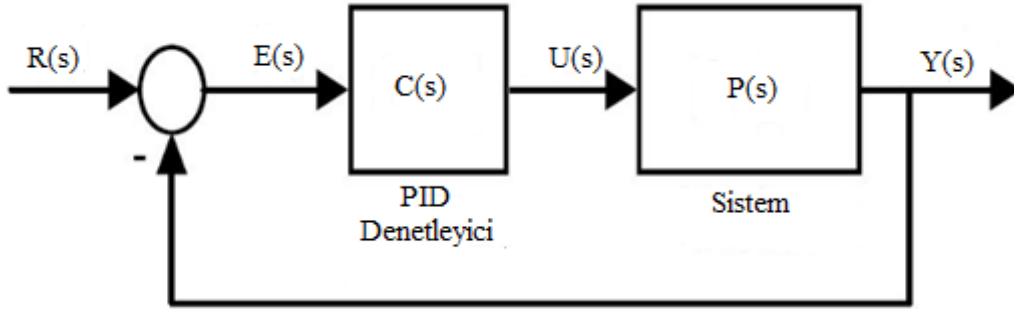
Şekil 3.10. Geri Beslemeli Bir Denetim Sistemi Blok Diyagramları

Şekil 3.10’da kontrolör içeren geri beslemeli kapalı döngü bir kontrolör yapısı verilmiştir. Burada geri besleme yoluyla elde edilen hata farkına göre çıkışa bir sinyal üretilerek kontrol sağlanır.

PID’nin açılımı;

- P (Proportional) Oransal
- I (Integral) İntegral
- D (Derivative) Türevsel

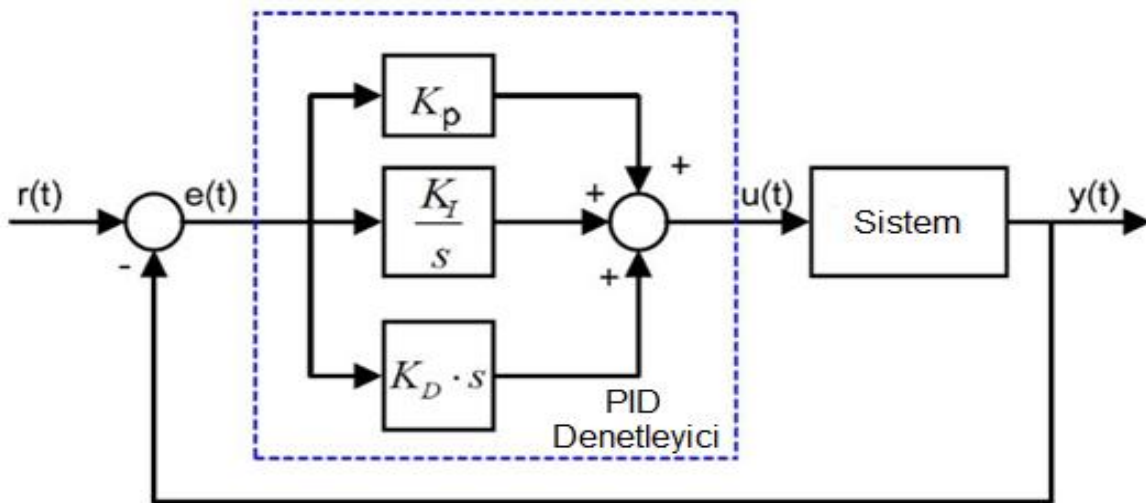
P, I ve D denetleyici bir araya gelerek PID denetleyici denetim organını oluşturur.



Şekil 3.11. PID Denetim (Geri Beslemeli)

PID denetleyiciler, yapısının çok basit olması, değişken sayısının azlığı sayesinde endüstriyel kontrol sistemlerinde çok tercih edilen bir denetim biçimidir.

PID denetleyiciler çıkıştan elde edilen geri besleme ile gelen sinyali ile giriş sinyali farkından bir hata oluşur. Bu farktan dolayı oluşan hataya göre PID kontrolör hatayı azaltarak çıkışa gönderir. Sürekli yapılan karşılaştırma sonucunda hata minimum seviyeye indirilene kadar hatalar belirlenir ve denetleyici etkisini çıkışa göndererek hata azaltılır. Burada PID kontrolör, hatanın sıfıra gitmesinin daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar.



Şekil 3.12. PID Denetleyicinin Yapısı

Bir fonksiyonun integralinin Laplace fonksiyonu "1/s" ile çarpacak şekilde yazılır. Türevin Laplace fonksiyonu "s" ile çarpacak şekilde yazılır. Kp Ki ve Kd kazançları ile de fonksiyonu "s" domeninde şekillendirilir ise;

PID kontrolörün transfer fonksiyonu eşitlik (16) ve (17)'deki gibidir.

$$C(s) = (K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s)E(s) \quad (16)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (17)$$

K_p , K_i ve K_d kazançlarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu katsayılar kullanılarak sistemin uygun şartlarda kontrol edilebilmesi için çok iyi belirlenmesi gerekir. Bu katsayıların belirlenmesi zordur ve genellikle net bir sonucu yoktur.

En iyi kontrol için K_p , K_i ve K_d kazançları seçilirken, mümkün olduğunca en az ve sıfır hata, minimum aşım, kısa zamanda hatayı giderme ve kararlılığı sağlama gibi performans kriterleri önemlidir.



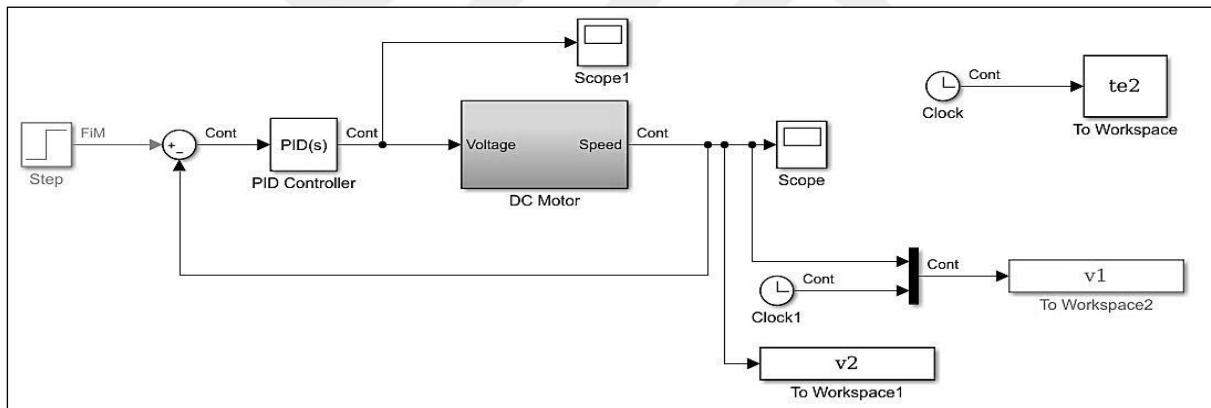
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

DC Motorun simulink ortamında ve gerçek zamanlı olarak kontrolü için Matlab-Simulink ortamında kontrol modelleri oluşturulmuştur. Simulink ortamında oluşturulan model kullanılarak PID katsayıları bulunmuştur. Belirlenen bu PID katsayıları DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü için kullanılmıştır.

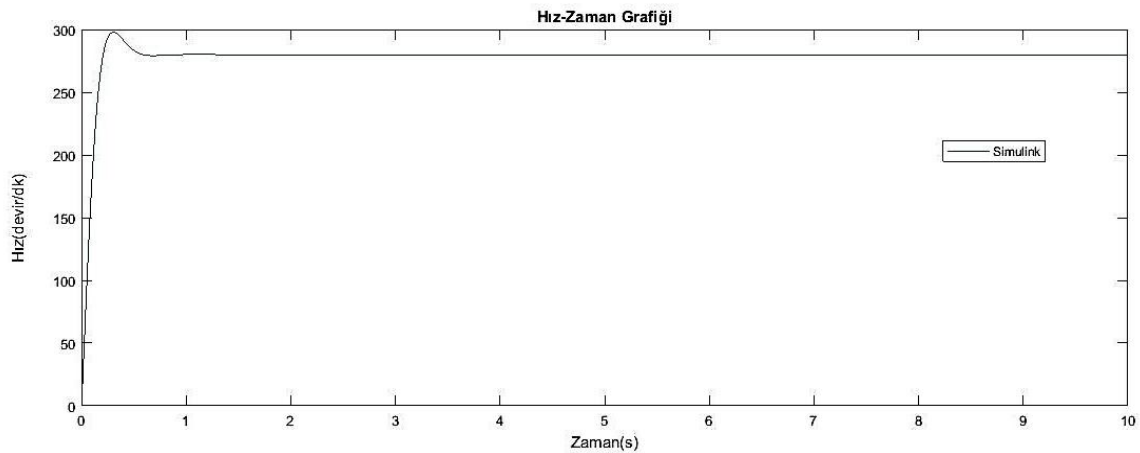
4.1. Simulink Ortamında DC Motor Kontrolü

4.1.1. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü

Tablo 3.1.'de verilen DC Motor parametreleri ve PID kontrolör kullanılarak Şekil 4.1'de verilen Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan simulink modeli ile simülasyon ortamında DC Motorun hız(rpm) ölçümü yapılmıştır. Simulink modelinin 280 devir/dk referans hızında çalıştırılması ile elde edilen hız-zaman grafiği Şekil 4.2.'de verilmiştir.



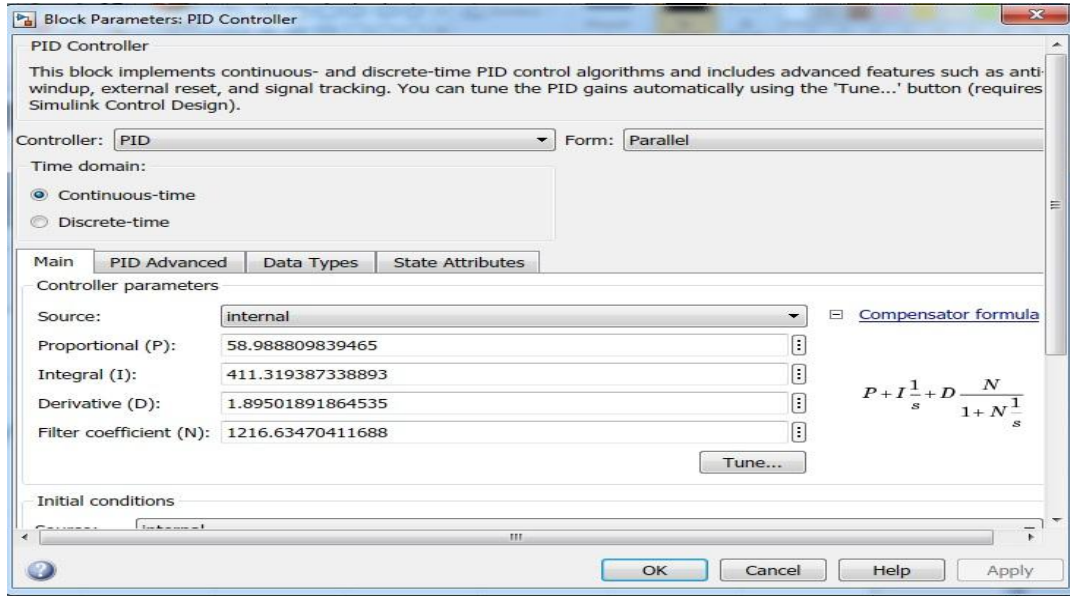
Şekil 4.1. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü Simulink Modeli



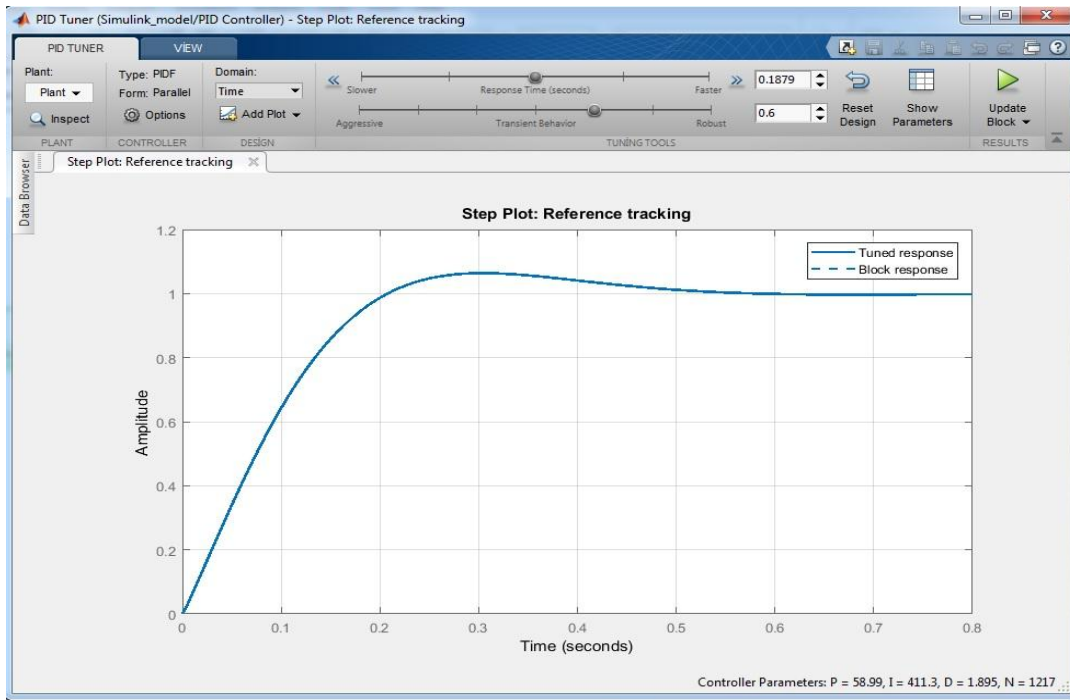
Şekil 4.2. Simulink Ortamında DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği

4.1.2. Simulink Ortamında PID Katsayılarının Belirlenmesi

DC Motorun kontrolü için oluşturulan Simulink modeline PID Kontroller nesnesi eklenerek PID Tuner ara yüz programından yararlanılarak daha optimal PID katsayıları bulunmuştur. Belirlenen bu PID katsayılar DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü için oluşturulan Simulink modelinde kullanılmıştır. PID katsayıları $K_p = 58.9$, $K_i = 411.3$, $K_d = 1.89$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.3. PID Kontroller Blok Parametreleri



Şekil 4.4. PID Tuner ile Kontrol Parametrelerinin Bulunması

4.2. Gerçek zamanlı DC Motor kontrolü

4.2.1. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü

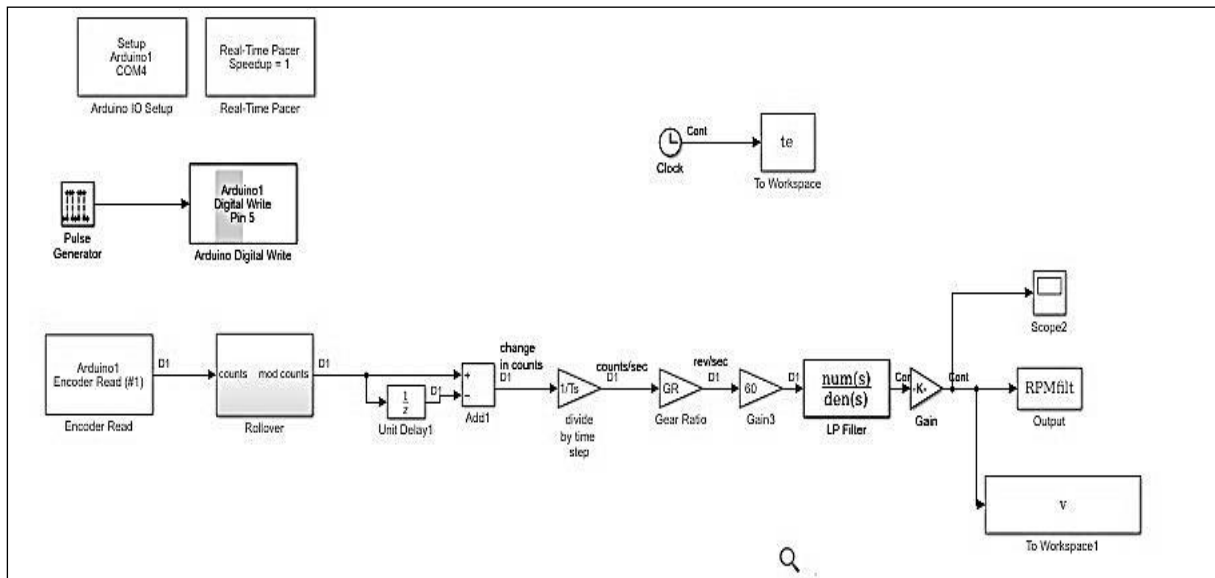
Bu çalışmada, transistör ile motoru sürmek, enkoder çıkışını okumak ve verileri gerçek zamanlı olarak elde etmek ve grafiksel olarak göstermek için Simulink modeli oluşturulmuştur. Pulse Generator bloğu ile kare dalga gönderilmiştir. Bu kare dalga ile transistörün kapalı ve açık durumunu değiştirmek için Pulse Generator bloğu Arduino Dijital Write bloğuna bağlanmıştır.

Transistör Arduino kartının dijital 5. çıkışından tetiklendiğinden, Arduino Dijital Write bloğunun değeri 5 olarak ayarlanmıştır.

Enkoder Read bloğu, dörtlü kodlayıcı sinyali okumak için kullanılmıştır. Enkoder darbeleri, Arduino kartında çalışan program aracılığıyla sayılır. Kodlayıcı Okuma bloğu, toplanan en son sayıları almak için her numune periyodunda sorgular. Enkoder Read bloğu Pin A değeri Arduino kartının dijital 2. çıkışı, Pin B değeri ise Arduino kartının dijital 3. çıkışı olarak ayarlanmıştır. Bunlar, dörtlü kodlayıcı sinyallerini bağladığımız pinlere karşılık gelir.

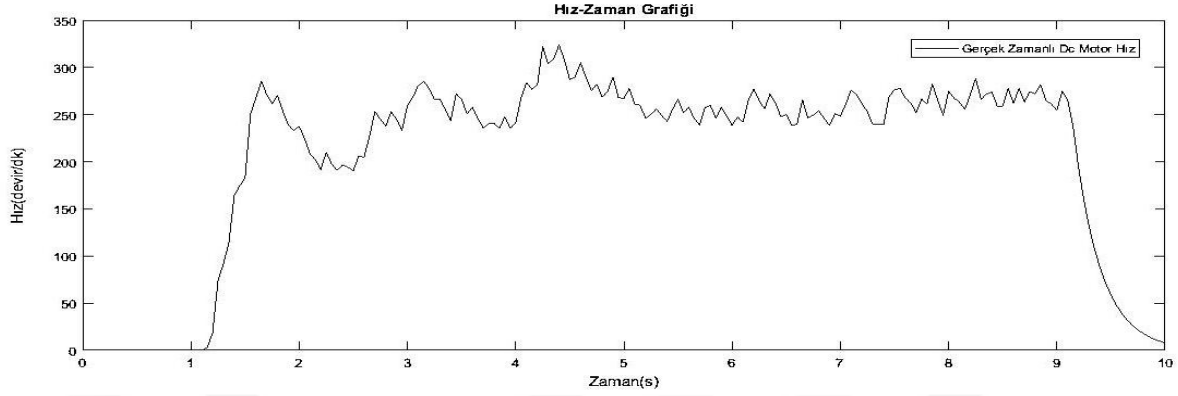
Daha sonra, enkoder sayılarına göre motorun hızını tahmin etmek için oluşturulan simulink modeline Şekil 4.5' deki gibi bloklar eklenmiştir. Enkoder sayıları motorun pozisyonunu gösterdiğinden, motorun hızını belirli bir zaman aralığında tahmin edebilir. Çünkü motor pozisyonundaki değişiklik, zamandaki değişimine bölünür. Bu motorun o zaman aralığı içindeki ortalama hızıdır.

Bu çalışmada kullanılan DC Motorun dişli oranı devir başına 1633'tür [15]. Modelin çalışabilmesi için $GR = 1/1633$ dişli oranı sabitinin Matlab çalışma alanında tanımlanmıştır. Örnekleme süresi 0.05 saniye olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.5. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm) Ölçümü Simulink Modeli [18].

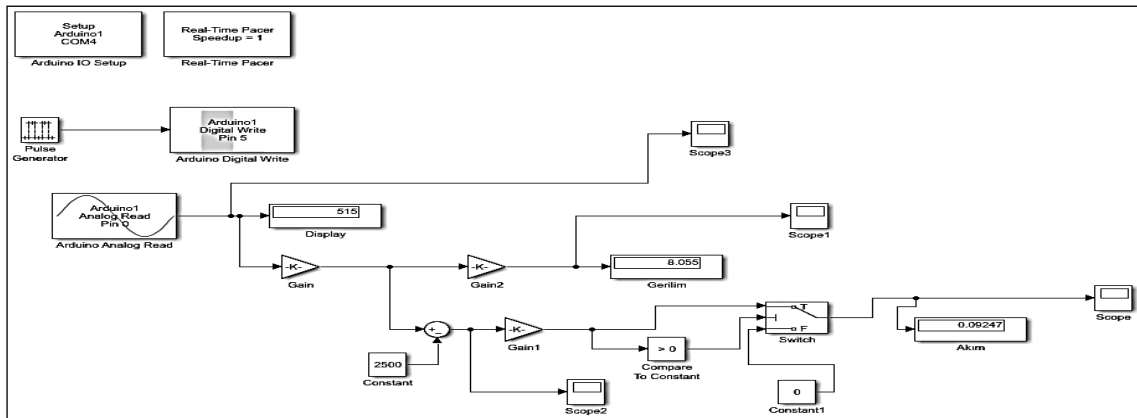
Şekil 4.5' deki simulink modelinin çalıştırılması ile Şekil 4.6'da verilen DC Motorun gerçek zamanlı hız-zaman grafiği elde edilmiştir. Grafikte zaman kayması olduğu görülmüştür. Ayrıca DC Motorun 280 devir/dk referans değerinde çalışmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Gerçek Zamanlı DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği

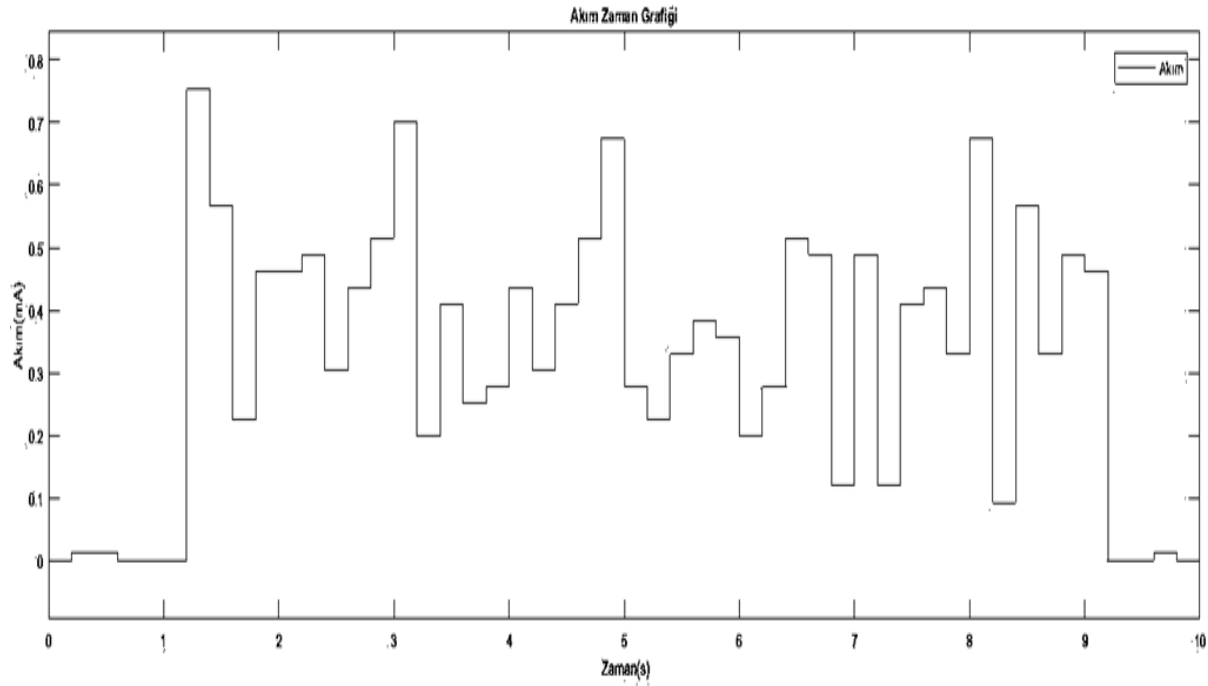
4.2.2. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım Değerinin Ölçümü

Arduino kartına DC Motor sürücü devresi bağlandıktan sonra Arduino kartı usb port üzerinden bilgisayara bağlanmıştır. Bağlantı gerçekleştirildikten sonra Arduino kartı ile Matlab programı arasında Arduino IO kütüphanesi vasıtasıyla bağlantı gerçekleştirilmiştir. Simulink kütüphanesinden Arduino kartı üzerinde kullanılacak analog giriş bloğu seçilmiştir. Acs712 akım sensörü A0 analog pin girişi olarak ayarlanmıştır. Akım sensöründen gelen analog sinyali Analog A0 pin girişi ile Arduino kartına aktarılmış ve dijital değere dönüştürülmüştür. Elde edilen bu dijital değere 5/1024 bölme işlemi uygulanarak gerilim belirlenmiştir. Acs712 akım sensörünün 2,5 V offset değeri çıkartılmıştır. Sonra 1/0,185 bölme işlemi ile veri akıma dönüştürülmüştür. Gerçek zamanlı akım ve gerilim ölçümü için Matlab-Simulink ortamında oluşturulan simulink blok diyagramı şekil 4.7 'te verilmiştir.



Şekil 4.7. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım Değerinin Ölçümü Simulink Modeli

Şekil 4.8’ de verilen simulink modeli ile Arduino mikrodnetleyicisine bağlı DC Motor’a 6V gerilim uygulanarak elde edilen gerçek zamanlı akım - zaman grafiği Şekil 4.6 da verilmiştir.

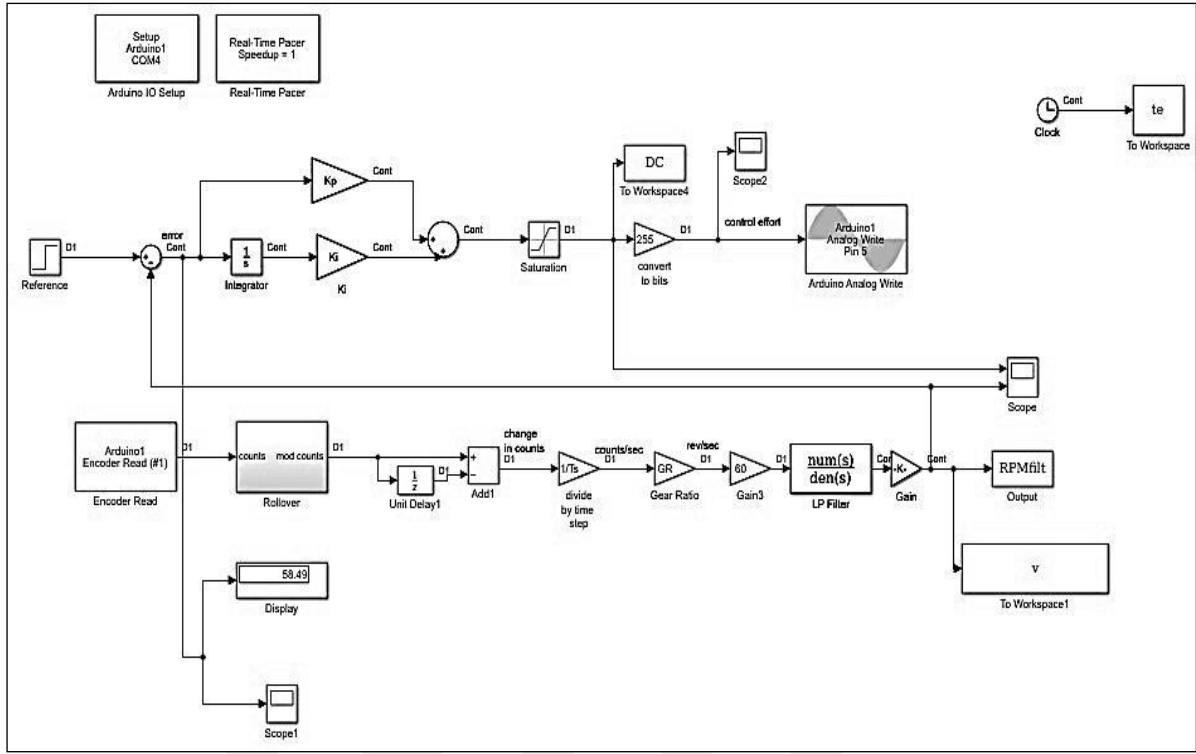


Şekil 4.8. Gerçek Zamanlı DC Motorun Akım-Zaman Grafiği

4.2.3. Gerçek Zamanlı PI Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız(Rpm) Kontrolü

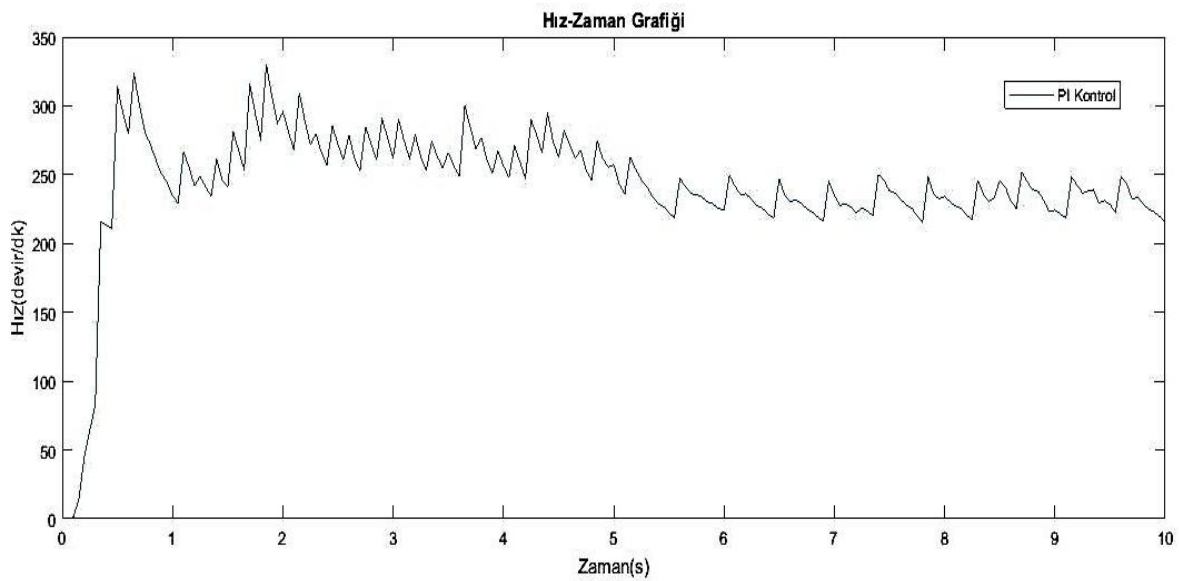
Arduino mikrodnetleyicisine bağlı DC Motorun PI kontrolör ile gerçek zamanlı kontrolü için Şekil 4.5’ de verilen simulink modeline Şekil 4.9’ daki gibi PI kontrolör eklenmiştir. PI kontrolörün K_p ve K_i katsayıları için Şekil 4.1’ de verilen simulink modeli kullanılarak simülasyon ortamında PID Tuner ile elde edilen $K_p = 58.9$ ve $K_i = 411.3$ değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.9’ da verilen PI kontrolör eklenmiş simulink modelinde referans hız 280 devir/dk olarak verilmiştir. Simulink modelinde ölçülen DC Motor hızı referans hızından çıkarılarak çıkışa verilmiştir. Bu işlem sonucunda ölçülen hız hatası kontrolöre verilmiştir. PI kontrolör ile düzeltilen hız hatası Arduino mikrodnetleyicisinin 5. dijital çıkışına verilerek kontrolör içeren geri beslemeli kapalı döngü kontrolör yapısı tamamlanmıştır. Kontrol girişi motora uygulanan PWM sinyalinin görev döngüsüdür. DC Motora uygulanan PWM sinyali için Arduino mikrodnetleyicisinin 5. dijital pin çıkışı kullanılmıştır.

Şekil 4.9’ da verilen simulink modeli ile geri besleme yoluyla elde edilen hata farkına göre PI kontrolör ile çıkışa bir sinyal üretilerek kontrol sağlanmıştır.



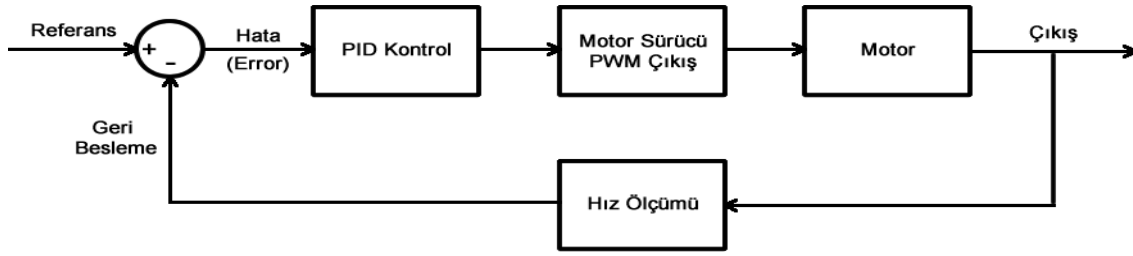
Şekil 4.9. DC Motorun Gerçek Zamanlı PI Kontrolü için Simulink Modeli

Şekil 4.9’da verilen DC Motorun gerçek zamanlı PI kontrolü için simulink modelinin çalıştırılması ile elde edilen hız - zaman grafiği şekil 4.10’ da verilmiştir. Şekil 4.10’ da verilen grafikte kalıcı durum hatası gözlemlenmiştir. Bu durumun düzeltilmesi için integrator katsayısı artırılmıştır. Fakat bu durumda maksimum aşma noktası çok yüksek olduğu için sisteme türev katsayısı eklenmiştir ve sonuçları şekil 4.16’ da verilmiştir.



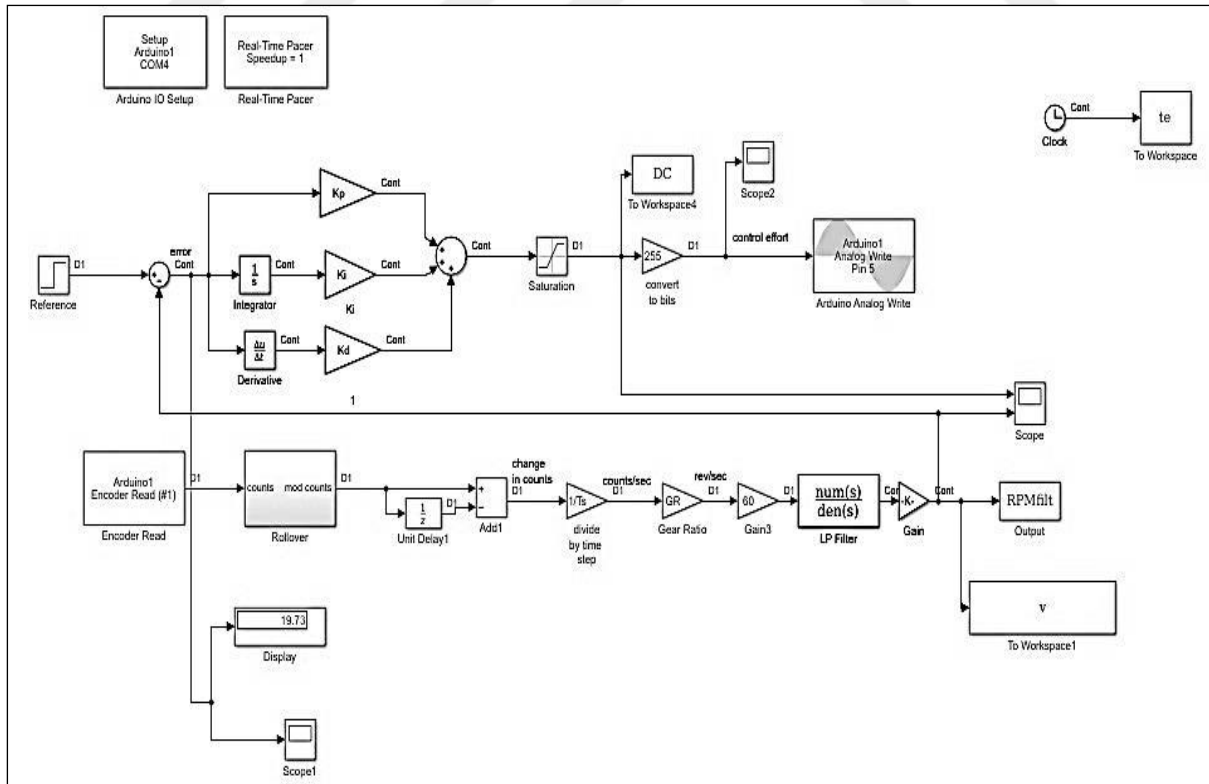
Şekil 4.10. Gerçek Zamanlı DC Motor PI Kontrolü Hız(Rpm)-Zaman Grafiği

4.2.4. Gerçek Zamanlı PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız(Rpm) Kontrolü



Şekil 4.11. DC motor PID Denetimi (Geri Beslemeli)

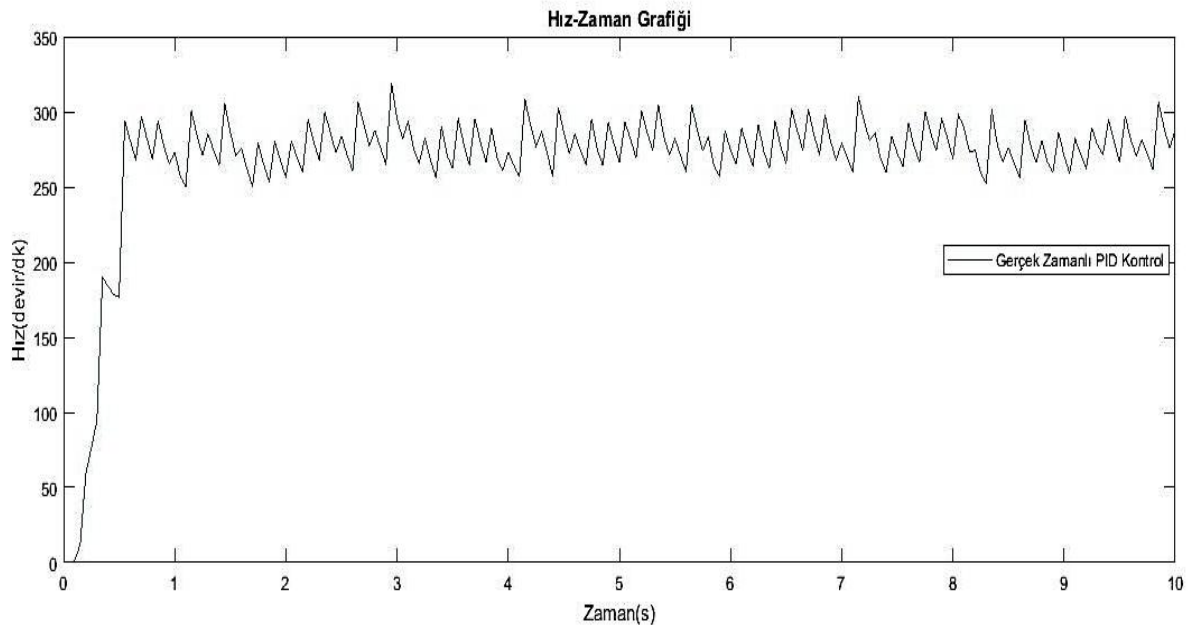
Şekil 4.11’ de verilen DC Motorun PID kontrolör yapısında karşılaştırma elemanı sistemden gelen geri besleme ile referansın farkını alarak hata sinyalini üretir. Üretilen hata sinyali PID kontrol algoritmasına gönderilmiştir. PID kontrol algoritmasının çıkışından da motor sürücüsüne PID çıkışı yani kontrol sinyali uygulanmıştır. Uygulanan kontrol sinyaline göre motor sürücü ile 0-6V arasında gerilim DC Motora uygulanmıştır. Motora uygulanan gerilime göre bir dönüş hızı üretilmiştir. Üretilen dönüş hızı DC Motorun arkasında bulunan optik enkoder ile ölçülmüştür. Enkoder ile ölçülen dönüş hızı değeri ise Arduino mikrodenetleyicisinin 5. dijital girişine uygulanmıştır. Buradan elde edilen hız bilgisi geri besleme olarak girişteki karşılaştırma elemanına gönderilmiştir. Bu şekilde geri beslemeli kapalı döngü kontrolör yapısı tamamlanmıştır.



Şekil 4.12. DC motor PID kontrolü Simulink Modeli

Şekil 4.11’ de verilen PID kontrolör yapısı temel alınarak Şekil 4.12’ deki DC Motorun PID kontrolü için simulink modeli oluşturulmuştur. PID kontrolörün K_p , K_i ve K_d katsayıları için Şekil 4.1’ de verilen simulink modeli kullanılarak simülasyon ortamında PID Tuner ile elde edilen $K_p = 58.9$, $K_i = 411.3$ ve $K_d = 1.89$ değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.12’ de verilen PID kontrolör eklenmiş simulink modelinde referans hız 280 devir/dk olarak verilmiştir. Simulink modelinin çalıştırılması ile elde edilen hız – zaman grafiği Şekil 4.13’ de verilmiştir.

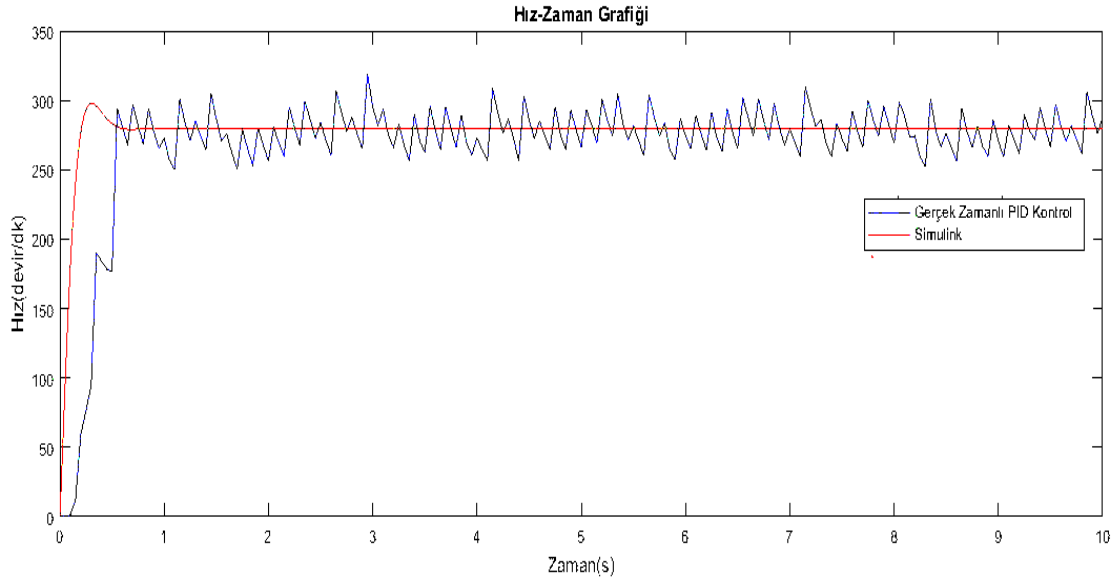
Şekil 4.13’de verilen hız – zaman grafiği ile Şekil 4.2’ deki simulink benzetim modelinden elde edilen hız – zaman grafiği ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Gerçek Zamanlı PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız (Rpm)-Zaman Grafiği

4.3. DC Motorun Simulink ve Gerçek Zamanlı Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması

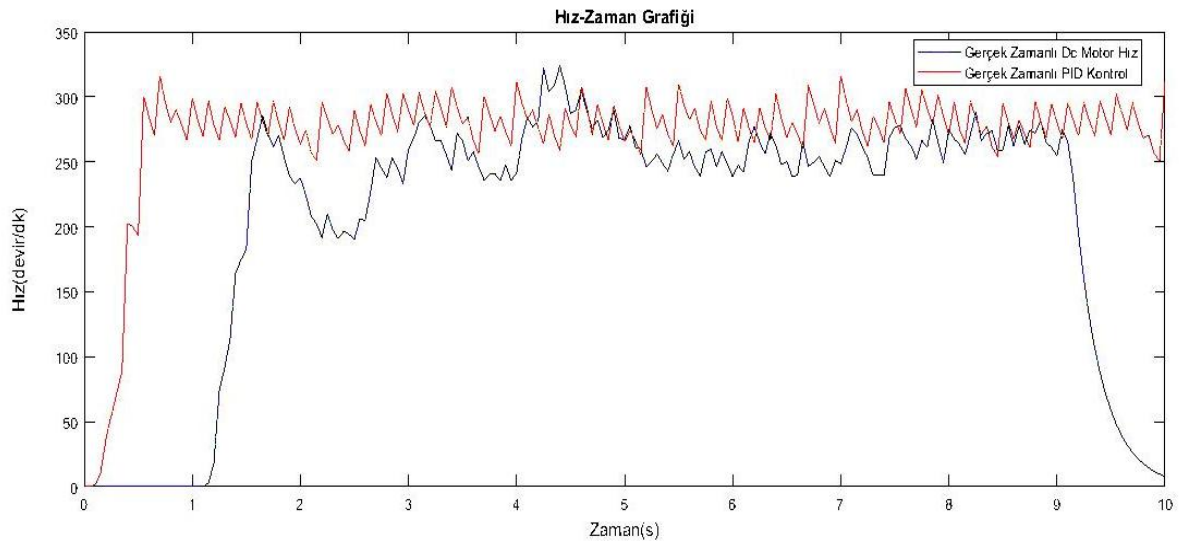
Aynı DC Motor parametreleri ve aynı PID katsayıları kullanılarak Şekil 4.2’ de simulink ortamında oluşturulan simulink modelinden elde edilen hız – zaman grafiği ile Şekil 4.12’ de gerçek zamanlı deneysel sistemden elde edilen hız – zaman grafiği Şekil 4.14’ deki gibi birleştirilmiştir. Şekil 4.14’ de verilen hız – zaman grafiği ile simulink ortamında oluşturulan benzetim çalışması ile gerçek zamanlı deneysel sistemin uyumlu çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. DC Motorun Simulink ve Gerçek Zamanlı Hız-Zaman Grafikleri

4.4. DC Motorun Gerçek Zamanlı ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması

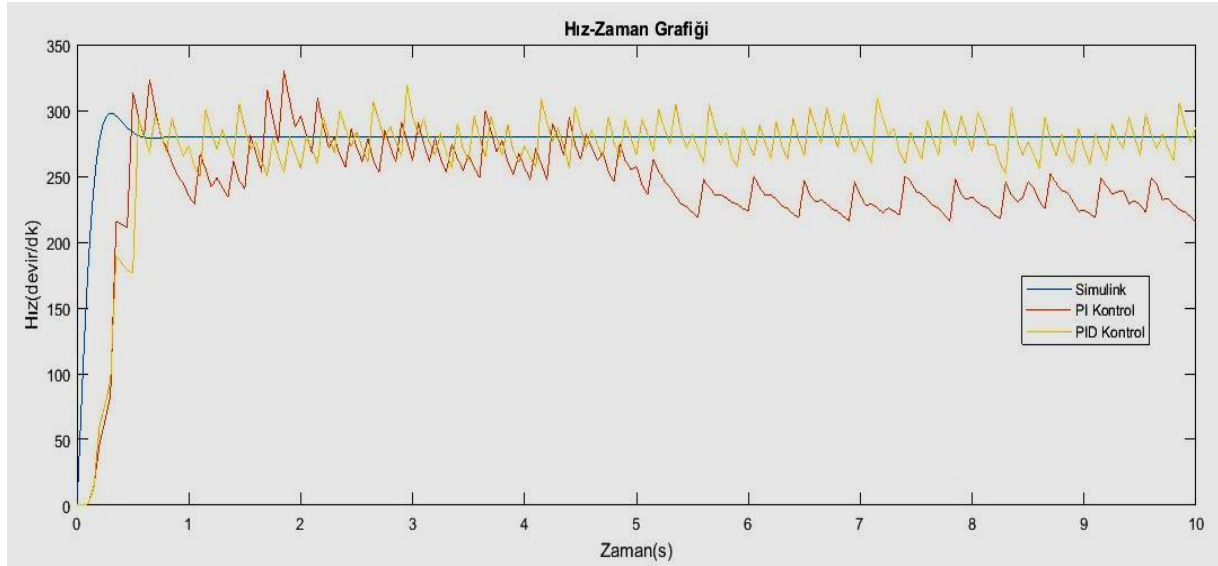
Şekil 4.15' de verilen hız – zaman grafiğinde DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü ile gerçek zamanlı PID kontrolör ile elde edilen grafikleri karşılaştırıldığında gerçek zamanlı kontrol de zaman kayması olduğu ve 280 devir/dk referans hızın elde edilemediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. DC Motorun Gerçek Zamanlı ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafikleri

4.5. DC Motorun Simulink Ortamında, Gerçek Zamanlı PI ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması

DC Motorun simulink, gerçek zamanlı PI kontrolör ve gerçek zamanlı PID kontrolü ile elde edilen grafikler Şekil 4.16' da verilen grafik ile birleştirilmiştir. PID kontrolör ile yapılan kontrolde kalıcı durum hatası sıfırlanmış ve PI kontrolörden daha başarılı sonuç alınmıştır.



Şekil 4.16. DC Motorun Simulink Ortamında, Gerçek Zamanlı PI ve Gerçek Zamanlı PID Kontrolü İle Elde Edilen Hız-Zaman Grafikleri

4.6. Birim Basamak Performans Ölçütleri

Kontrol sisteminin birim basamak cevabı performansının değerlendirilmesinde dört temel performans ölçütü kullanılmaktadır. Bunlar yükselme zamanı, en büyük aşım, yerleşme zamanı ve gecikme zamanıdır.

4.6.1. En Büyük Aşım

Kontrol sisteminde göreceli kararlılığı değerlendirme ölçüsüdür. Kontrol sistemlerinde en büyük aşımın büyük olması istenmeyen bir durumdur. Şekil 1' de verilen grafikte maksimum aşım birinci aşımında gerçekleşmiştir. Bazı sistemlerde negatif alt aşım görülebildiği gibi maksimum aşım diğer tepe değerlerinde gerçekleşebilir. Sistem cevabının tepe veya maksimum noktası ile kararlı haldeki değeri arasındaki farkın kararlı haldeki değere oranıdır. % olarak ifade edilir. Kontrol uygulamalarında maksimum aşımın %20 den küçük olması istenir. Kritik kontrol uygulamalarda, aşımın mümkün olduğunca küçük olması istenir [19].

4.6.2. Gecikme Zamanı (t_d)

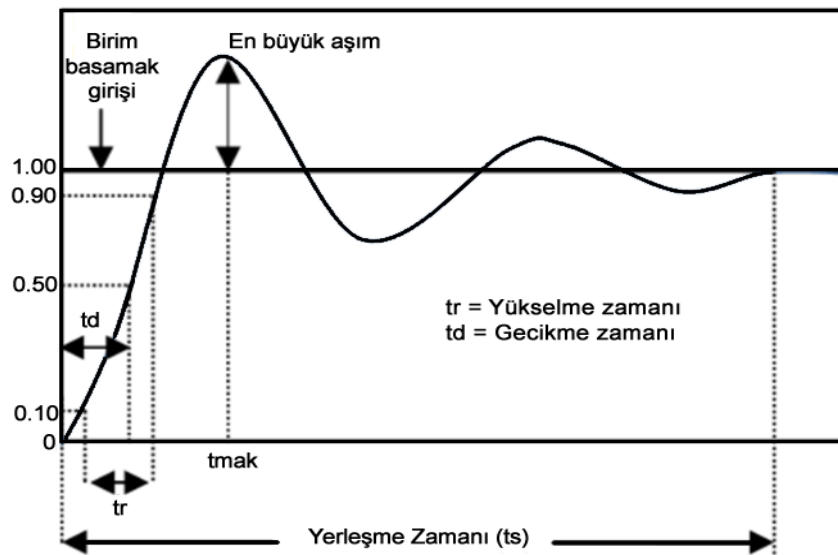
Basamak cevabının son değerinin yüzde 50 değerine ulaşana kadar geçmesi gereken süre olarak tanımlanır.

4.6.3. Yükselme Zamanı (t_r)

Basamak cevabının son değerinin %10 değerinden %90 değerine ulaşma zamanıdır. Ayrıca son değer %50 değerinde basamak cevabı teğetinin tersi olarak ifade edilebilir. Yükselme zamanı, sistem cevabının hızlı değişimlere uyum kabiliyetini ölçer. Sürekli değişkenlik gösteren kontrol işaretlerinin başarılı bir şekilde takibi için sistemin yükselme zamanının mümkün olduğunca küçük olması istenir [20].

4.6.4. Yerleşme Zamanı (t_s)

Basamak cevabının son değerinin belirli bir yüzdesine kadar azalması ve bu değer altında kalması için geçen zamandır. Yani kontrol sistemi çıkışının hedeflenen yerleşme bandına girene kadar geçen zaman periyodunu ölçer [19]. Kontrol uygulamalarında maksimum aşım için yerleşme bandı genellikle %105-%95 olarak kabul görülür [21]. Yerleşme zamanı, sistem cevabının arzu edilen noktaya yerleşebilmesi için ihtiyaç duyulan zamanı ölçer ve kontrol sisteminin cevap süresi hakkında bilgi verir. Hızlı cevap gereken kontrol uygulamalarında yerleşme zamanı mümkün olduğunca küçük belirlenmelidir [21].



Şekil 4.17. Birim Basamak Yanıtı Performans Ölçütü Parametrelerinin temsili gösterimi

Şekil 4.17’de kapalı döngü yapı içerisinde kontrolör tasarımı yapılarak belirlenen referans değerinde bir çıkış elde edilmiştir. Sistem çıkışı istenen referansa belirli bir süre salınım gerçekleştirdikten sonra ulaşmaktadır.

Şekil 4.16’ da verilen grafik kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen yükselme zamanı, yerleşme zamanı, gecikme zamanı ve aşım değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Birim Basamak Yanıtı Değerleri

	Yükselme Zamanı (tr) (ms)	Yerleşme Zamanı (ts) (ms)	Gecikme Zamanı (td) (ms)	Aşım (%)
Simulink Model	181	761	68	6.4
Gerçek Zamanlı PI	465	5568	306	16.6
Gerçek Zamanlı PID	522	4147	284	12.7

Kontrol uygulamalarında aşımın %20’den küçük olması istenmektedir. Gerçek zamanlı PI kontrol uygulamasında aşım değeri %16.6 ve gerçek zamanlı PID kontrol uygulamasında aşım değeri %12.7 olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla PID kontroldeki aşım PI kontroldeki aşımdan daha az olmuştur.

Tablo 4.1’de verilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü için PID kontrolörün kullanılması daha avantajlı olacaktır.

4.7. Performans İndisleri

Bir sistemi tasarlarken, çoğu zaman, performans parametrelerine bağlı olarak uygun değer performansı verecek sistemi bir şekilde belirleyen bir performans indisine ihtiyaç vardır. Uyarlanabilir kontrol sistemlerinde, sistem parametreleri uygun değer performansı verecek şekilde sürekli ayarlanır, böylece uygun değer durumu belirlemede kullanılacak bir parametreye ihtiyaç vardır [19].

4.7.1. ISE(Integral Square Error: Hata karenin integrali)

Bir birim adım girdisi olduğu zaman, en sık kullanılan performans indisi ISE’dir.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (18)$$

4.7.2. ITSE (Integral of Time Square Error: Zaman Kare Hatanın İntegrali)

ITSE sonraki sapmalar, öncekilerden daha az ağırlıklı olacak şekilde, kararlı hal değerinden sapmalara ağırlık verir. Bunu hatanın karesini zamanla çarparak yapar. ITSE (19)' deki gibi tanımlanır.

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t)dt \quad (19)$$

4.7.3. IAE(Integral of Absolute Value of Error: Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali)

Kararlı hal değerinden olan bütün sapmalara eşit ağırlık verir. IAE (20)' deki gibi tanımlanır.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \quad (20)$$

4.7.4. ITAE (Integral of Time Absolute Error: Zaman Mutlak Hatanın İntegrali)

ITAE önceki sapmalar, sonrakilerden daha az ağırlıklı olacak şekilde, kararlı hal değerinden sapmalara ağırlık verir. Bunu hatayı zamanla çarparak yapar. ITAE (21)' deki gibi tanımlanır.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (21)$$

4.7.5. ISE, ITSE, IAE ve ITEA Performans İndislerinin Simulink Modellerinin oluşturulması:

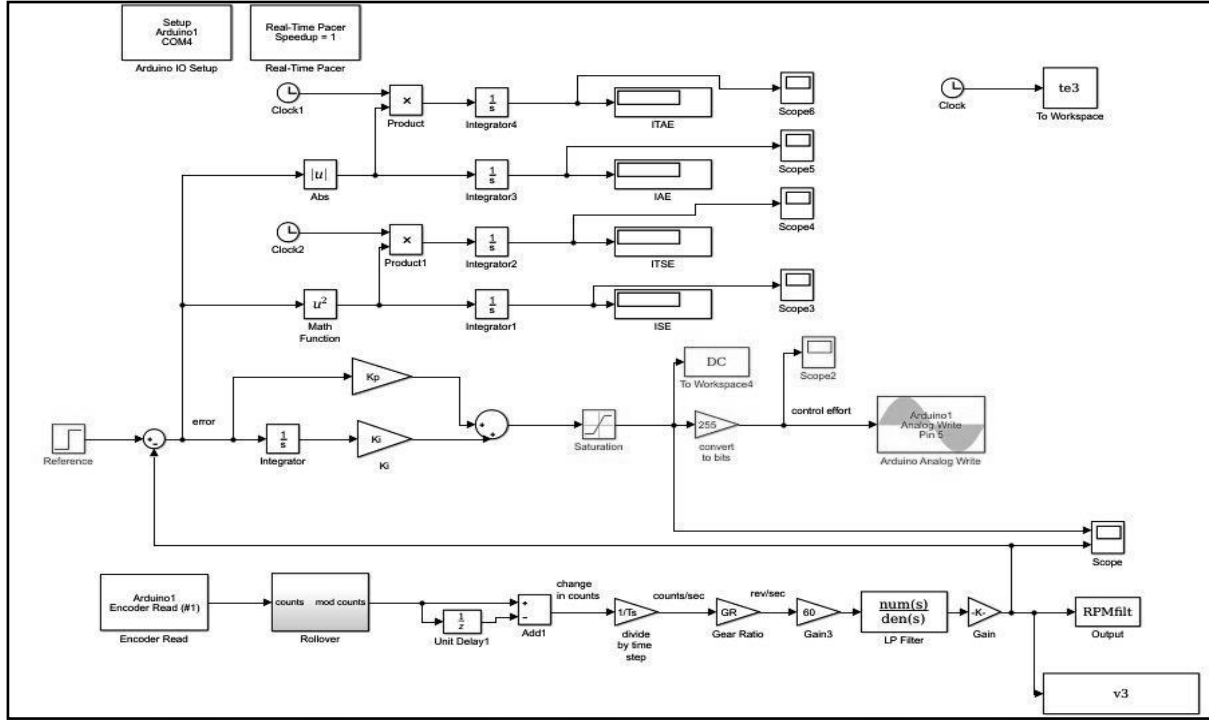
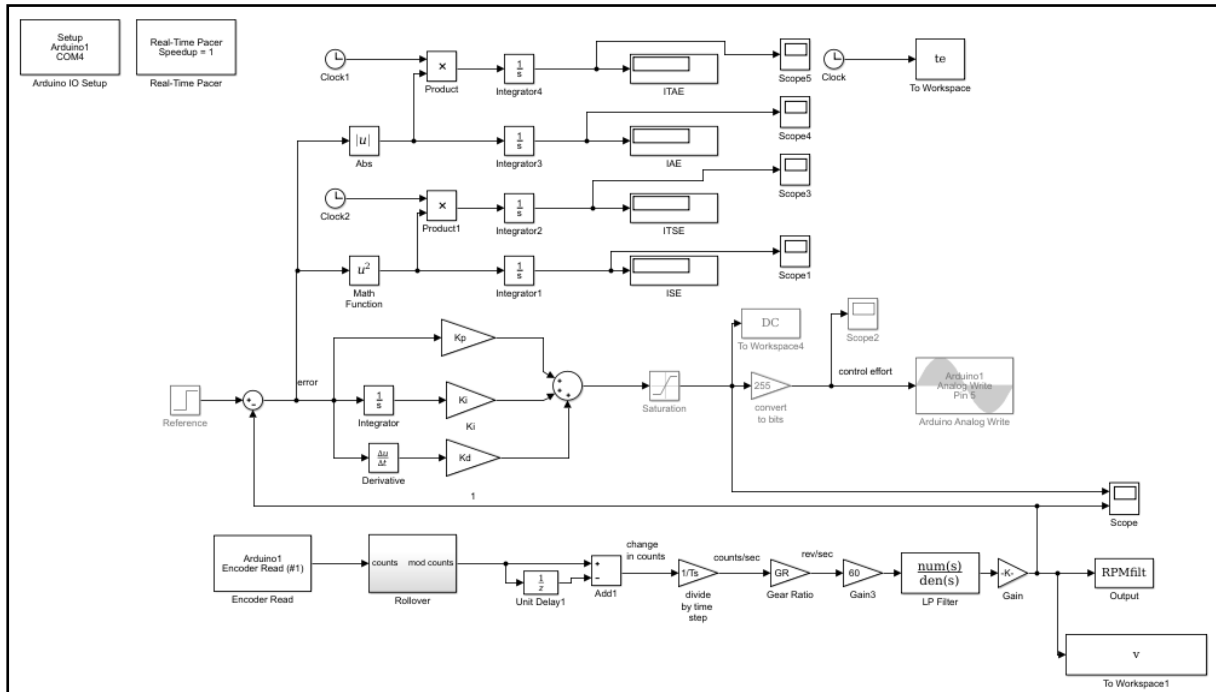
Gerçek zamanlı PI kontrolör simulink modelinde ISE, ITSE, IAE ve ITEA performans indis değerlerinin bulunması için (18), (19), (20) ve (21)' de verilen eşitlikler kullanılarak simulink modeli Şekil 4.18' de verildiği gibi oluşturulmuştur. Simulink modelinin çalıştırılması ile elde edilen performans indislerinin değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

Performans indislerinin gerçek zamanlı PID kontrolör simulink modelinde bulunması için (18), (19), (20) ve (21)' de verilen eşitlikler kullanılarak simulink modeli Şekil 4.19' da verildiği gibi oluşturulmuştur. Simulink modelinin çalıştırılması ile elde edilen performans indisleri değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

PI ve PID kontrolör kullanılarak aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda ISE, ITSE, IAE ve ITAE değerleri kullanılarak kontrolörlerin performansı belirlenmiştir. Tablo 4.2' de verilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü için PID kontrolördeki hata oranı PI kontrolördeki hata oranından daha az olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2. Ölçülen Performans İndis değerleri

	Hız (Dev/dk)	ISE	ITSE	IAE	ITAE
Gerçek Zamanlı PI	280	2.433e+04	1.726e+04	242.7	739.8
Gerçek Zamanlı PID	280	2.719e+04	1.504e+04	234.1	604.1

**Şekil 4.18.** PI Kontrolöre Performans İndislerinin Eklenmesi**Şekil 4.19.** PID Kontrolöre Performans İndislerinin Eklenmesi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında DC Motor Matlab-Simulink ortamında oluşturulan DC Motor kontrol modeli ile Arduino mikrodenetleyicisi üzerinden gerçek zamanlı olarak kontrol edilmiştir. DC Motor parametreleri motor üretici firmasının katalog bilgileri, ölçü aleti ve deneysel yöntemler kullanılarak bulunmuştur. Bu parametreler simulink ortamında oluşturulan DC Motor benzetim simülasyon modelinde kullanıldı ve çıkan sonucun DC Motorun özellikleri ile aynı olduğu görülmüştür. DC Motor parametrelerinin doğruluğu belirlendikten sonra DC Motor hız kontrolü için simulink modeli oluşturuldu.

DC motorun kontrol edilebilmesi için Arduino kartının dijital çıkışlarından biri kullanılmıştır. Arduino mikrodenetleyicisinin dijital çıkışlar için sağladığı akım düşük olduğu için DC motoru doğrudan çalıştıramamaktadır. DC Motorun çalıştırılması ve durdurulması işlemleri için Arduino kartının dijital çıkışı transistora bağlanarak DC Motor transistor ile kontrol edilmiştir. DC motorun çalışması için gerekli olan enerji harici bir gerilim kaynağından verilmiştir. DC Motorun çektiği akım Arduino mikrodenetleyicisine bağlı ACS712 manyetik etkiye bağlı olarak çalışan akım sensörü kullanılarak gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür.

Arduino mikrodenetleyicisine bağlı DC Motoru Matlab-Simulink ortamında hazırlanan simulink modellerini kullanarak kontrol etmek için Arduino IO kütüphanesi kullanıldı. Kütüphanenin eklenmesi ile birlikte Arduino mikrodenetleyicisi üzerinde bulunan giriş/çıkış pinleri Matlab-Simulink ortamında bloklar yardımıyla kontrol edilmiştir.

PID kontrolörlerin yapısının ve ayarının basit olması nedeniyle günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Simulink ortamında DC Motor kapalı çevrim benzetim modeli oluşturuldu. Oluşturulan modele PID kontrolör eklenerek PID Tuner ile PID katsayıları $K_p = 58.9$, $K_i = 411.3$, $K_d = 1.89$ olarak bulundu. Elde edilen bu katsayılar gerçek zamanlı kontrol için hazırlanan simulink modelinde kullanıldı. Simülasyon ve gerçek zamanlı DC Motor hız kontrollerinde aynı PID katsayılarının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Simulink benzetim ortamında bulunan PID katsayıları kullanılarak PI ve PID kontrolör ile DC Motorun gerçek zamanlı kontrolü sağlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. PI kontrolör kullanılarak DC Motorun gerçek zamanlı kontrolünde kalıcı durum hatası olduğu görülmüştür. Bu hatanın düzeltilmesi için integrator katsayısı artırıldı ancak bu artış sonucunda maksimum aşma noktasının da çok yükseldiği gözlemlenmiştir. Sisteme türev katsayısı eklenerek bu durum düzeltilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda DC motorun gerçek zamanlı kontrolü için PID kontrolün PI kontrolünden daha verimli olduğu görülmüştür.

Optimizasyon işleminde yükselme zamanları, yerleşme zamanları ve aşma zamanları dikkate alınmıştır. PI ve PID kontrolörün performansını belirleyebilmek için ITAE (Integral of Time Weighted Absolute Error), IAE (Integral of Absolute Error), ISE (Integral of Squared Error) ve ITSE (Integral of Time Weighted Squared Error) gibi farklı kriterler kullanılarak bir kıyaslama yapılmıştır.

PI ve PID kontrolör kullanılarak aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda ISE, ITSE, IAE ve ITAE değerleri kullanılarak kontrolörlerin performansı belirlenmiştir. Buna göre yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanan değerlerin verildiği Tablo 4.2 incelendiğinde ISE değeri PI kontrolörde PID kontrolörden daha düşük olduğu ve ITSE, IAE ve ITAE değerlerinin ise PID kontrolörde PI kontrolöre göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu performans karşılaştırması sonucunda DC motorun gerçek zamanlı kontrolü için PID kontrolün PI kontrolünden daha verimli olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1]. Shao, J. (2003). *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [2]. Dökmetaş, G. (2016). *Arduino ve Raspberry Pi ile Nesnelerin İnterneti*. İstanbul: Dikeyksen
- [3]. Dutta, R., Kumar, N., Pankaj, D. (2014). PID Control for Ambulatory Gait Orthosis: Application of Different Tuning Methods. *Advances in Biomedical Engineering Research (ABER)*, 2, 44-49.
- [4]. Shahrokhi, M., Zomorodi, A. (2013). Comparison of PID Controller Tuning Methods. Department of Chemical & Petroleum Engineering Sharif University of Technology.
- [5]. *PID*. 03.11.2018 tarihinde <http://tr.wikipedia.org/wiki/PID> adresinden erişildi.
- [6]. Rao, P. V. G. K., Subramanyam, M. V., Satyaprasad, K. (2014). Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, India, 1411-1417.
- [7]. Tan, W., Liu, J., Chen, T., Marquez, H. J. (2006). Comparison of Well-known PID Tuning Formulas. *Computers and Chemical Engineering*, 30, 1416-1423.
- [8]. User, Y. (2015). Matlab-SIMULINK Ortamında Arduino Kartı Kullanma ve DC Motor Uygulaması. *Endüstri Otomasyon Dergisi*, 1, 12-16.
- [9]. Aydoğmuş, Ö. (2006). *Pic mikrodenetleyici yardımı ile DC motorun hız kontrolü*. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [10]. Berki, K. (2013). *Yapay Sinir Ağları ile Robot Kolu Kontrolü*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [11]. Megep, (2009). *Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri Servo Sürücüler*. 08.12.2018 tarihinde http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Servo%20S%C3%BCr%C3%BCc%C3%BCler.pdf adresinden erişildi.
- [12]. Develi, H. (2005). *Ziegler Nichols yöntemi ve Migo*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [13]. Ömürlü, V. Ö. (2005). *Otomatik Kontrol I. P(oransal) I(integral) D(türevsel) kontrol*. 25 Kasım 2018 tarihinde <https://docplayer.biz.tr/271952-Otomatik-kontrol-i-p-oransal-i-integral-d-turevsel-kontrol-dr-vasfi-emre-omurlu.html> adresinden erişildi.
- [14]. Arduino, (2014). *Arduino*. 16.05.2018 tarihinde <http://www.arduino.cc> adresinden erişildi.
- [15]. 34:1 Metal Gearmotor 25Dx52L mm HP 6V with 48 CPR Encoder, (Tarih yok). 14.12.2018 tarihinde <https://www.pololu.com/product/2273> adresinden erişildi.
- [16]. Ersoy, H., Madran, O. R., Gülbahar, Y. (2011). Programlama Dilleri Öğretimine Bir Model Önerisi: Robot Programlama. *Akademik Bilişim '11 - XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri kitabı* içinde (ss. 731-736). Malatya: İnönü Üniversitesi.
- [17]. Arduino, (2016). *Arduino Uno Pin Diagram*. 23.12.2018 tarihinde http://www.easylife.store/arduino_uno_pin_diagram_pdf.php adresinden erişildi.

- [18]. Time-Response Analysis of a DC Motor, (Tarih yok). 28.12.2018 tarihinde http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_DCmotorA adresinden erişildi.
- [19]. Bolton, W. (1999). *Kontrol Mühendisliği Cep Kitabı* (O. Sunay, Çev.) İstanbul: Bileşim.
- [20]. Katsuhiko, O. (2002) . *Modern Control Engineering*. Prentice Hall PTR.
- [21]. Deniz, F., Keleş, C., Alagöz, B., Tan, N. (2014). Kapalı Çevrim PID Kontrolör Tasarımında Birim Basamak Cevabı Çoklu Ölçüt Performans Haritalaması. *SAÜ Fen Bil Der* 18. Cilt, 3. Sayı, s. 157-165.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Erdal BATAN

Doğum Tarihi : 01.02.1983

E-mail : erbaa83@gmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi/Öğretmenliği- Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi	Muğla Üniversitesi	2002-2007
Yüksek Lisans	İmalat Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2016-

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Bilişim Teknolojileri Öğretmeni	Dede Korkut İlköğretim Okulu	2007-2008
Bilişim Teknolojileri Öğretmeni	Mimar Sinan İlköğretim Okulu	2008-2013
Bilişim Teknolojileri Öğretmeni	Ata İlköğretim Okulu	2013-2014
Bilişim Teknolojileri Öğretmeni	Kurttepe Şehit Ali Öztaş Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2014- 2015
Atölye Şefi	Kurttepe Şehit Ali Öztaş Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2015- ...

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)