

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU KULLANILARAK TERS
SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE PLC
ÜZERİNDEN UYGULANMASI**

MUHAMMED KELEŞ

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU KULLANILARAK TERS
SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE
PLC ÜZERİNDEN UYGULANMASI

MUHAMMED KELEŞ

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı ÖZTÜRK
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU
Jüri Üyesi, Bilecik Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan KARAHAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, ters sarkaç sisteminin modellenmesi ve gerçek sistem üzerinde PLC ile kontrolü amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, bana güvenen ve yüreklendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili eşim Aslıhan KELEŞ, babam Mehmet KELEŞ, annem Nuran KELEŞ'e ve tüm kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2021

Muhammed KELEŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	3
1.1. Ters Sarkaç Sisteminin Matematiksel Denklemi.....	3
1.2. Ters Sarkaç Sisteminin Simulink Modeli	8
2. GERÇEK SİSTEM TASARIMI	11
2.1. Ters Sarkaç Sisteminin Mekanik Tasarımı	11
2.1.1. Triger kayış tahrikli lineer yatak	11
2.2. Elektronik Tasarım.....	12
2.1.1. Servo sistemler	13
2.1.2. Enkoder	16
2.1.3. Emniyet ekipmanları	18
2.1.4. PLC	19
3. SİSTEMİN PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI	23
3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu.....	23
3.2. Benzetim Çalışması	25
4. DENETLEYİCİ TASARIMI VE MODEL SİSTEM KONTROLÜ.....	29
4.1. PID Denetleyici Tasarımı	30
4.2. PID Katsayılarının Belirlenmesi	32
4.3. Model Sistemin Kontrolü.....	33
5. DENEYSEL UYGULAMA	35
5.1. Simulink PID Denetleyicinin PLC Koduna Dönüştürülmesi	36
5.2. PLC ile Gerçek Sistem Kontrolü	40
5.2.1. PID bloğunun PLC koduna entegrasyonu.....	41
5.3. Deney Setinin PLC’de PID Denetleyici ile Çalıştırılması.....	45
5.4. PLC’de Bulunan PID Bloğunun Gerçek Sistemde Çalıştırılması.....	47
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
EKLER.....	55
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	60
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Ters sarkaç sisteminin genel gösterimi	3
Şekil 1.2.	(a) Arabaya etki eden kuvvetler (b) sarkaca etki eden kuvvetler	4
Şekil 1.3.	(a) Araba konumunun Simulink modeli (b) sarkaç açısının Simulink modeli	8
Şekil 1.4.	Sarkaç açısına etki eden kuvvetlerin Simulink modeline eklenmesi.....	9
Şekil 1.5.	Ters sarkaç sisteminin Simulink’de oluşturulan modeli	9
Şekil 2.1.	(a) Kremayer tahrikli (b) triger kayış tahrikli (c) vidalı mil tahrikli lineer yatak.....	11
Şekil 2.2.	Triger kayış tahrikli lineer yatak	12
Şekil 2.3.	Gerçekleştirilen sistemin kontrol bloğu	13
Şekil 2.4.	Deneyde kullanılan servo motor sürücüsü	15
Şekil 2.5.	Hız modunda kullanılan servo motor sürücüsünün bağlantı şeması	15
Şekil 2.6.	Enkoder yapısı.....	16
Şekil 2.7.	Enkoderin ters sarkaç sistemine montajı.....	17
Şekil 2.8.	Sistemdeki emniyet ekipmanları	18
Şekil 2.9.	PLC’nin genel gösterimi	19
Şekil 2.10.	Deneyde kullanılan PLC ve giriş çıkış modülleri	21
Şekil 2.11.	Ters sarkaç deney düzeneği.....	21
Şekil 3.1.	PSO Algoritmasının Akış Şeması	24
Şekil 3.2.	Model sistemin ilk denemelerdeki serbest salınımı	25
Şekil 3.3.	Gerçek sistemin serbest salınımı	26
Şekil 3.4.	Gerçek sistem ve model sistemin benzetim çalışması sonucunda elde edilen salınım grafiği	27
Şekil 4.1.	Kontrol sisteminin blok yapısı	29
Şekil 4.2.	PID denetleyici kontrol şeması	30
Şekil 4.3.	Ters sarkaç sisteminin PID denetleyici ile bağlantısı.....	31
Şekil 4.4.	PID denetleyicinin katsayılarının belirlenebilmesinde kullanılan Simulink modeli	32
Şekil 4.5.	Model sistemin PID denetleyici sonucu birim basamak yanıtı	33
Şekil 5.1.	PLC koduna dönüştürülecek PID Simulink modeli	37
Şekil 5.2.	PID denetleyici alt modeli.....	38
Şekil 5.3.	Dönüştürülen PID denetleyicinin PLC kodu.....	39
Şekil 5.4.	Enkoder bilgisinin PLC’de açı bilgisine dönüştürülmesi.....	42
Şekil 5.5.	PID bloğunun PLC programı içerisinde çağırılması	43
Şekil 5.6.	PID blok çıkışının normalizasyonu	44
Şekil 5.7.	PLC ile deney setinin kontrolü ve θ açısının değişimi	45
Şekil 5.8.	Model sistem ve gerçek sistem birim basamak yanıtı.....	46
Şekil 5.9.	PLC ile denge konumunda tutulan ters sarkaç deney seti.....	46
Şekil 5.10.	Servo sürücüye uygulanan referans sinyali ve motora uygulanan hız verileri	47
Şekil 5.11.	Gerçek sistemin Siemens hazır PID fonksiyonu olan	

TCONT_CP ile kontrolü	48
Şekil 5.12. Yapılan deneysel çalışmaların blok gösterimi	48



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Deneyde kullanılan lineer yatak ölçüleri.....	12
Tablo 2.2. Deneyde kullanılan servo motorun etiket bilgileri.....	14
Tablo 3.1. Ters sarkaç sisteminin değişkenleri.....	25
Tablo 3.2. Benzetim çalışması sonucunda ters sarkaç sisteminin değişkenleri	28
Tablo 4.1. PSO sonucunda belirlenen PID katsayıları	33
Tablo 5.1. PLC fonksiyonunun değişkenleri.....	40



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

φ	: Açık, (rad)
θ	: Açık, (rad)
$\dot{\theta}$: Açıkın birinci dereceden türevi,
$\ddot{\theta}$: Açıkın ikinci dereceden türevi,
\dot{x}	: Konumun birinci dereceden türevi,
\ddot{x}	: Konumun ikinci dereceden türevi,
a	: İvme, (m/s ²)
b	: Arabanın sürtünme katsayısı, (N/m/sn)
F	: Kuvvet, (N)
g	: Yerçekimi ivmesi, (m/s ²)
i	: Sarkaç atalet momenti, (kg*m ²)
kd	: Türev zaman katsayısı, (sn)
ki	: İntegral zaman katsayısı, (sn)
kp	: Kazanç katsayısı, (sabit)
l	: Sarkaç kütle merkezine olan uzunluk, (m)
m	: Sarkaç kütlesi, (kg)
M	: Araba kütlesi, (kg)
N	: Sarkaçta etki eden yatay kuvvetlerin toplamı, (N)
P	: Sarkaçta etki eden dikey kuvvetlerin toplamı, (N)
x	: Araba konumu, (m)

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
ADC	: Analog to Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
CPU	: Central Process Unit (Merkezi İşlem Birimi)
d/dk	: Devir/Dakika
DAC	: Digital to Analog Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
FB	: Function Block (Fonksiyon Blok)
FC	: Function (Fonksiyon)
mA	: Miliamper
ms	: Milisaniye
OB	: Operation Block (Operasyon Blok)
PC	: Personal Computer (Bilgisayar)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türev)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Lojik Kontrolör)
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
PWM	: Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)
SCL	: Structured Control Language (Yapısal Programlama Dili)
sn	: Saniye
VDC	: Deterministic Differential Approach (Deterministik Diferansiyel Yaklaşım)

PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU KULLANILARAK TERS SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE PLC ÜZERİNDEN UYGULANMASI

ÖZET

Bu çalışmada, doğrusal olmayan bir sistem olan ters sarkaç sisteminin Matlab Simulink ortamında modellenmesi ve oluşturulan modelin PLC (Programmable Logic Controller) üzerinden PID (Proportional Integral Derivative) kontrolör ile kontrolü amaçlanmıştır. Matlab Simulink ortamında oluşturulan modelde, sistemdeki sabit değişkenler dışında kalan, ölçülenmesi zor olan bağımlı değişkenler, sürü optimizasyonu ile gerçek sistem verilerine benzetim çalışması yapılarak tespit edilmiştir. Sürü optimizasyonu ile belirlenen bağımlı değişkenlerle birlikte elde edilen modelin kontrolü, PID denetleyici ile sağlanmıştır. PID denetleyicide, hedef süre ve tolerans altında sarkacın dik pozisyona gelebilmesi için ihtiyaç duyulan katsayıların hesaplanması yine sürü optimizasyonu ile belirlenmiştir. Simulink ortamında modellenen kontrolörün PLC kodu oluşturulmuş, bu kod Siemens PLC içine gömülmüş ve fiziksel sisteme bir servo motor ile uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonunda, model sistem çalışmasında ve gerçek sistemin çalışmasında elde edilen sonuçların benzer olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Matlab/Simulink, PID, PLC, Sürü Optimizasyonu, Ters Sarkaç.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED PID CONTROL FOR INVERTED PENDULUM THROUGH PLC

ABSTRACT

This study aims to model the inverted pendulum system, a nonlinear system, using Matlab Simulink environment and seeks to control the created model with a PID (Proportional Integral Derivative) controller over PLC (Programmable Logic Controller). The model was created in Matlab Simulink environment, and the dependent variables other than fixed variables in the system, which are difficult to measure, were determined by simulating real system data and particle swarm optimization was used for calculating these variables. The obtained model control with the dependent variables is defined by particle swarm optimization, and it was provided with the PID controller. In the PID controller, the calculation of the coefficients needed for the pendulum to reach an upright position under the target time and tolerance was calculated by particle swarm optimization. The PLC code of the model controller was created in the Simulink environment. This code was embedded by using Siemens PLC and connected to the physical system using a servo motor. The result obtained from this experiment shows that our developed model works successfully, and it is comparably similar to the real system models.

Keywords: Matlab/Simulink, PID, PLC, Particle Swarm Optimization, Inverted Pendulum.

GİRİŞ

Ters sarkaç [1-7], kontrol alanındaki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan, kararsız ve doğrusal olmayan bir sistemdir. Sistem, hareketli bir araba üzerine konumlandırılmış sarkacın, arabaya uygulanan kuvvetle dairesel olarak hareket etme prensibine sahip bir mekanizmadır. Bunun yanı sıra çalışmalarda kullanılan farklı mekanik tahrikli ters sarkaç sistemleri de mevcuttur [8]. Ters sarkaç sistemlerinin kontrolünde genel prensip olarak, arabaya uygulanan kuvvet neticesinde sarkacın dikey pozisyonda durağan kalması amaçlanmaktadır.

Günümüz kontrol çalışmalarında, kontrol edilmek istenen sistemin matematiksel modelinin oluşturulabilmesi [9-12] ve teorik kurgulara tabi tutulabilmesi için bilgisayar tabanlı simülasyon ve gerçekleştirme programlarından faydalanılmaktadır. Mühendislik çalışmalarında yaygınca kullanılan, matematiksel formüller ve fizik yasalarıyla donatılmış bu gerçekleştirme programlardan biri de Matlab/Simulink ortamıdır. Matlab/Simulink ortamı matematikten fiziğe, haberleşmeden uzay bilimine, elektronikten mekaniğe kadar uzanan, matematiğe dayalı çoğu mühendislik çalışmalarında teorik kurguların gerçeğe en yakın hipotezlerinin oluşturulmasında sıkça kullanılan bilgisayar tabanlı bir platformdur.

Endüstriyel kontrol [13-15] alanında mekanik sistemler büyük çoğunlukla PLC [16-20]'ler ile kontrol edilmektedir. Bu kontrolörler hem lojik mantık kurgularına açık hem de bilgisayar [21] ya da PLC tabanlı diğer araçlarla haberleştirilebilir durumdadır. Kâğıt üzerindeki teorik hesaplamalar, Matlab ve benzeri platformlarda oluşturulan kontrol modelleri, endüstride çoğu zaman PLC'li sistemlerle pratik karşılıklarını bulabilir.

Otomatik kontrolün amacı, sistemlere ilişkin kontrol değişkenlerini arzu edilen değerlerde tutarak kararlı bir çalışma ortamı sağlamaktır. Otomasyon sistemlerinde [22-24] amaçlanan, sistemin girişinde meydana gelen etkilere karşı çıkışında da hızlıca bir tepki meydana getirerek, olası salınımların önüne geçmek ve sistem kararlılığını devamlı hale getirmektir. Denetleyici türlerinden biri olan PID denetleyici

[25-30] ise endüstride sistemin kararlılığını sağlamada en yaygın kullanılan denetleyici türüdür.

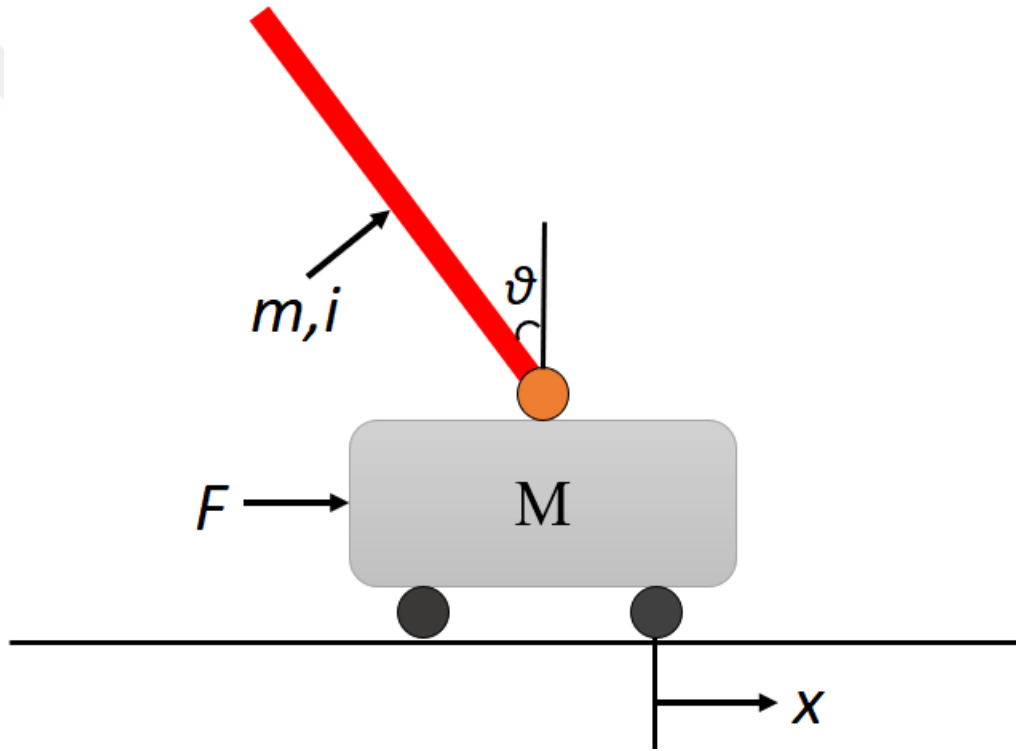
Bu çalışmada, ters sarkaç sisteminin matematiksel model çalışması Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş, model sistem üzerinde PID denetleyici ile kontrol çalışması yapılmıştır. Simulink ortamında tasarlanan PID denetleyicinin PLC kodu üretilip gerçek sisteme uygulanmıştır. Çalışma sonunda, model sistem denetleyici tepkileri ve gerçek sistem denetleyici tepkileri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, ters sarkaç sisteminin matematiksel modeli oluşturulurken sabit değişkenler dışında kalan, hesaplanması oldukça güç olan sarkaç atalet momenti ve sürtünme katsayısının belirlenmesinde ve modelin PID denetleyici ile kontrol edilirken optimum kararlılığını sağlamada oransal, integral ve türevsel sabitlerinin hesaplanmasında, doğadaki kuş ve balık sürülerinin hareketlerinden esinlenilerek oluşturulmuş sezgisel bir algoritma olan parçacık sürü optimizasyonundan faydalanılmıştır [31-34].

Çalışmada amaçlanan bir diğer konu ise, endüstride kullanılan PLC'lere, bilgisayar tabanlı kontrol çalışmalarıyla esneklik kazandırılması olmuştur. PLC sistemleri lojik mantık kapıları kurgularına dayalı sistemler olmaları özelliğiyle, kontrol edilen sistemlerin tam matematiksel modellerinin benzetimi çalışmalarına çok uygun yapıda değillerdir. Bu çalışma ile amaçlanan zorlu mekanik sistemlerin model çalışmalarının Matlab/Simulink gibi esnek ortamlarda sağlanması [35], ardından uygulanan model kontrolün PLC koduna dönüştürülerek, PLC'ye hazır bir kod parçacığı olarak entegre edilmesiyle gerçek sistem kararlılığını ve doğrusallağını optimum seviyelere taşımak olmuştur.

1. TERS SARKAÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

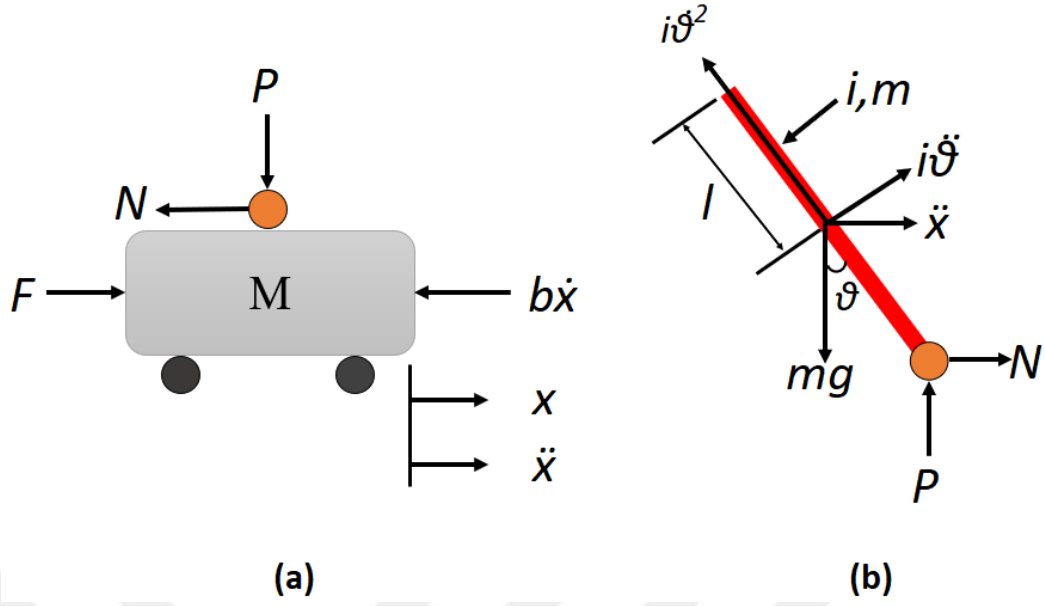
Ters sarkaç sistemlerinin genel mekanik kurgusu Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, hareketli bir araba üzerine konumlandırılmış sarkacın, arabaya uygulanan F kuvveti ile dairesel olarak hareket etmesi temeline dayanır. Sistemin çalışması başlangıç konumu olarak $\theta=0^\circ$ 'de başlatılır ve araba hareketi ile sarkacın $\theta=0^\circ$ 'de kalması sağlanmaktadır.



Şekil 1.1. Ters sarkaç sisteminin genel gösterimi

1.1. Ters Sarkaç Sisteminin Matematiksel Denklemi

Ters sarkaç sisteminin genel matematiksel denklemi tek girişli ve iki çıkışlı bir denklemdir. Sistemde giriş olarak arabaya etki eden F kuvvetinin bir sonucu olarak birinci çıkış, arabanın yol üzerindeki yer değiştirmesidir. Sistemin ikinci çıkışı ise arabaya bağlı bulunan sarkacın F kuvveti sonucunda dairesel olarak kararsız bir salınım gerçekleştirmesiyle değişen açıdır.



Şekil 1.2. (a) Arabaya etki eden kuvvetler (b) sarkaca etki eden kuvvetler

φ	: Açıl, (rad)
θ	: Açıl, (rad)
$\dot{\theta}$: Açılın birinci dereceden türevi,
$\ddot{\theta}$: Açılın ikinci dereceden türevi,
\dot{x}	: Konumun birinci dereceden türevi,
\ddot{x}	: Konumun ikinci dereceden türevi,
a	: İvme, (m/s ²)
b	: Arabanın sürtünme katsayısı, (N/m/sn)
F	: Kuvvet, (N)
g	: Yerçekimi ivmesi, (m/s ²)
i	: Sarkaç atalet momenti, (kg*m ²)
l	: Sarkaç kütle merkezine olan uzunluk, (m)
m	: Sarkaç kütlesi, (kg)
M	: Araba kütlesi, (kg)
N	: Sarkaça etki eden yatay kuvvetlerin toplamı, (N)
P	: Sarkaça etki eden dikey kuvvetlerin toplamı, (N)
x	: Araba konumu, (m)

Şekil 1.2’de araba ve ters sarkaç düzeneği iki denklem olarak ifade edilebilmek için ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 1.2’deki ters sarkaç sisteminin matematiksel modelini oluşturabilmek için, hareket yasalarından yola çıkarak, araba konumunu ve sarkacın θ açısını veren denklemler bulunmuştur.

Genel hareket yasası olan $F=m.a$ eşitliğinden yola çıkarak, yatayda hareket eden araba için temel hareket denklemi elde edilmiştir. Buna göre:

$$F = M\ddot{x} + b\dot{x} + N \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de konumun ikinci türevi (\ddot{x}) ivmeyi, birinci türevi (\dot{x}) ise hızı verecektir. Denklemde yer alan N ifadesi, sarkaçta meydana gelecek dairesel hareketin arabaya olan etkisini temsil etmektedir. Ters sarkaca etki eden yatay kuvvet bileşenleri toplanarak N ifadesi elde edilir:

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (1.2)$$

Denklem (1.2), Denklem (1.1)'de N eşitliği yerine yazıldığında:

$$F = (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (1.3)$$

Denklem (1.3) ile ters sarkaç sisteminin iki ana denkleminde biri olan konum denklemi elde edilmektedir. İkinci ana denklem olan sarkaç açısını bulmak için sarkaca etki eden dik kuvvet bileşenleri toplanır:

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = ml\ddot{\theta} - m\ddot{x} \cos \theta \quad (1.4)$$

P ve N ifadesi, sarkacın atalet momentiyle ilişkili bileşenlerdir. N ve P ifadelerinin yerine:

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = i\ddot{\theta} \quad (1.5)$$

Denklem (1.4) ve Denklem (1.5) birleştirilerek:

$$(i + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = - ml\ddot{x} \cos \theta \quad (1.6)$$

Denklem (1.6) ters sarkaç sisteminin ikinci ana çıktısı olan sarkaç açısı bağıntısını veren denklem olarak elde edilmiştir.

Ters sarkaç sisteminde sarkacın dik tepe noktası $\theta=0^\circ$ ve alt serbest durağan bölgesi $\theta = \pi$ olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla hareket denklemlerinden yola çıkılarak sistemin transfer fonksiyonunu elde etmek için, sistem, $\theta = \pi$ bölgesinde doğrusallaştırılmalıdır. Transfer fonksiyonu çıkarımı için, $\theta = \pi + \varphi$ kabul edilerek ve bu pozitif bölgedeki çok küçük açı bilgisi φ olarak simgeleştirilmiştir. Dolayısıyla denklemde yer alan $\sin \theta = -\varphi$, $\cos \theta = -1$ ve $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = 0$ olarak kabul edilmiştir.

Doğrusallaştırılma sonunda iki hareket denklemi elde edilir. Denklem (1.6) ve Denklem (1.3) için gerekli düzenlemeler yapıldığında Denklem (1.7) ve Denklem (1.8) elde edilir:

$$(i + ml^2)\ddot{\varphi} - mgl\varphi = ml\ddot{x} \quad (1.7)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\varphi} = u \quad (1.8)$$

Denklem (1.8) eşitliğinde yer alan u girişi temsil etmektedir.

Doğrusallaştırılan denklemlerin transfer fonksiyonu gösterimi için Denklem (1.7) ve Denklem (1.8)'de Laplace dönüşümü yapılmalıdır:

$$(i + ml^2)\varphi(s)s^2 - mgl\varphi(s) = mlX(s)s^2 \quad (1.9)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\varphi(s)s^2 = U(s) \quad (1.10)$$

Denklem (1.9)' da $X(s)$ ifadesi yalnız bırakılırsa:

$$X(s) = \left[\frac{i+ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \varphi(s) \quad (1.11)$$

Denklem (1.11) ile elde edilen $X(s)$ ifadesi Denklem (1.10)'da yerine yazıldığında:

$$\frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s^2}{s^4 + \frac{b(i+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgls}{q}} \quad (1.12)$$

$$q = [(M + m)(i + ml^2) - (ml)^2] \quad (1.13)$$

Denklem (1.12) ters sarkaç sisteminin transfer fonksiyonu olmakla birlikte sadeleştirilmiş gösterimidir. Denklem (1.12)'de yer alan q ifadesinin açılımı Denklem (1.13)'de verilmiştir.

Elde edilen transfer fonksiyonu doğrudan Matlab ortamına taşınabilir, ihtiyaca uygun kontrol çalışmalarında kullanılabilir. Bu çalışmada ters sarkaç sisteminin Simulink modeli oluşturulacağından, Denklem (1.3) ve Denklem (1.6) Simulink ortamında oluşturulmuştur.

Denklem (1.3) ve Denklem (1.6) Simulink model gösterimi için tekrar düzenlenirse, arabaya etki eden kuvvet ile değişen araba konumu için;

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{M} \sum_{konum} (Fx) = \frac{1}{M} (F - N - b \frac{dx}{dt}) \quad (1.14)$$

Arabaya etki eden kuvvet ile değişen sarkaç açısı için;

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{i} \sum_{sarkac} (T) = \frac{1}{i} (Nl \cos(\theta) + Pl \sin(\theta)) \quad (1.15)$$

İfadeleri elde edilmektedir. Denklem (1.14) ve Denklem (1.15) genel ifadesinde bulunan N ve P kuvvetlerinin açılımlarını yaparak tam dinamik denklem çıkarımı yapılmalıdır. Bunun için:

$$N = \sum_{sarkac} (Fx) = m \frac{d^2x_p}{dt^2} \quad (1.16)$$

$$m \frac{d^2y_p}{dt^2} = \sum_{sarkac} (Fy) = P - mg \quad (1.17)$$

$$P = m \left(\frac{d^2y_p}{dt^2} + g \right) \quad (1.18)$$

Denklem (1.16) ve Denklem (1.18) içerisinde yer alan x_p ve y_p , θ türevi cinsinden ifade edilirse:

$$x_p = x - l \sin(\theta) \quad (1.19)$$

$$\frac{d^2x_p}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} + l \sin\theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \cos\theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1.20)$$

$$y_p = l \cos(\theta) \quad (1.21)$$

$$\frac{dy_p}{dt} = -l \sin\theta \frac{d\theta}{dt} \quad (1.22)$$

$$\frac{d^2y_p}{dt^2} = -l \cos\theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - l \sin\theta \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1.23)$$

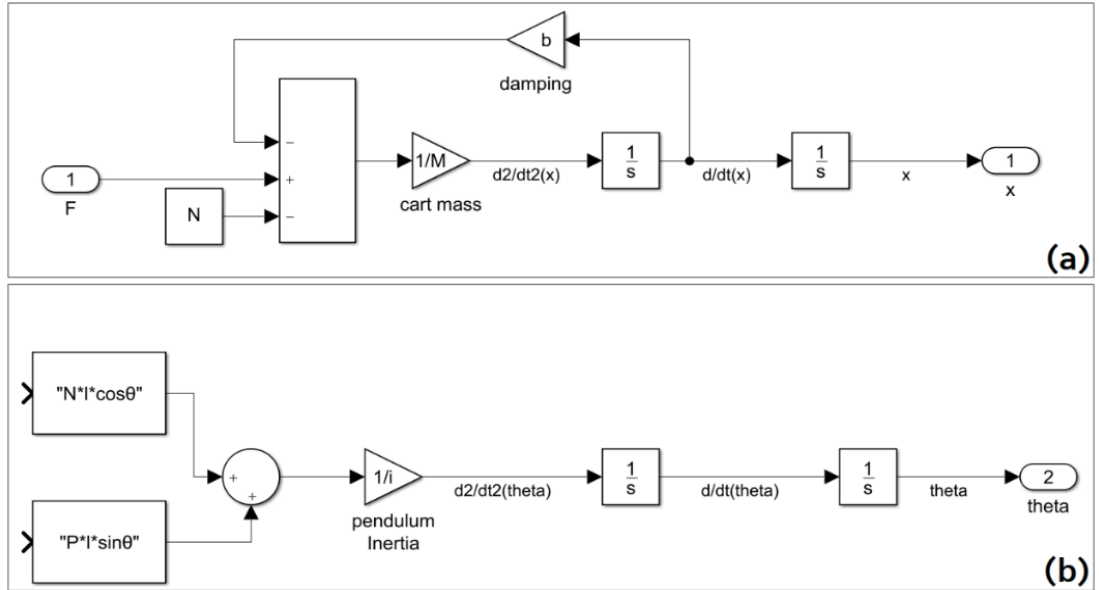
Elde edilen hareket denklemleri, Denklem (1.14) ve Denklem (1.15) Simulink ortamına taşınarak, sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada, sisteme uygulanan F kuvveti neticesinde arabanın konumuyla ilgilenilmeden, sarkaç denge konumunda iken serbest bırakıldığında ya da bozucu bir etkiyle dengesi

bozulduğunda, 1 saniyenin altında en fazla 0,05 radyan sapma ile tekrar $\theta=0^\circ$ konumuna gelerek dengede kalması amaçlanmıştır.

1.2. Ters Sarkaç Sisteminin Simulink Modeli

Simulink'in doğrusal olmayan sistemlerle doğrudan çalışabilme özelliğinden faydalanarak Bölüm 1.1'de oluşturulan hareket denklemlerinden, ters sarkaç sisteminin özinyelemeli uzay durumu modeli çıkarılmıştır.

Sistemin Simulink gösterimi için ilk olarak, sisteme uygulanan F kuvveti sonucunda çıkışta tepki beklenen sarkaç açısı (θ) ve arabanın konumu (x) bağıntısını veren çatı gösterimi oluşturulmuştur. İlk olarak Denklem (1.14)'den hareketle Şekil 1.3'de verilen (a) bloğu ve Denklem (1.15)'den hareketle Şekil 1.3'de verilen (b) bloğu elde edilmiştir.

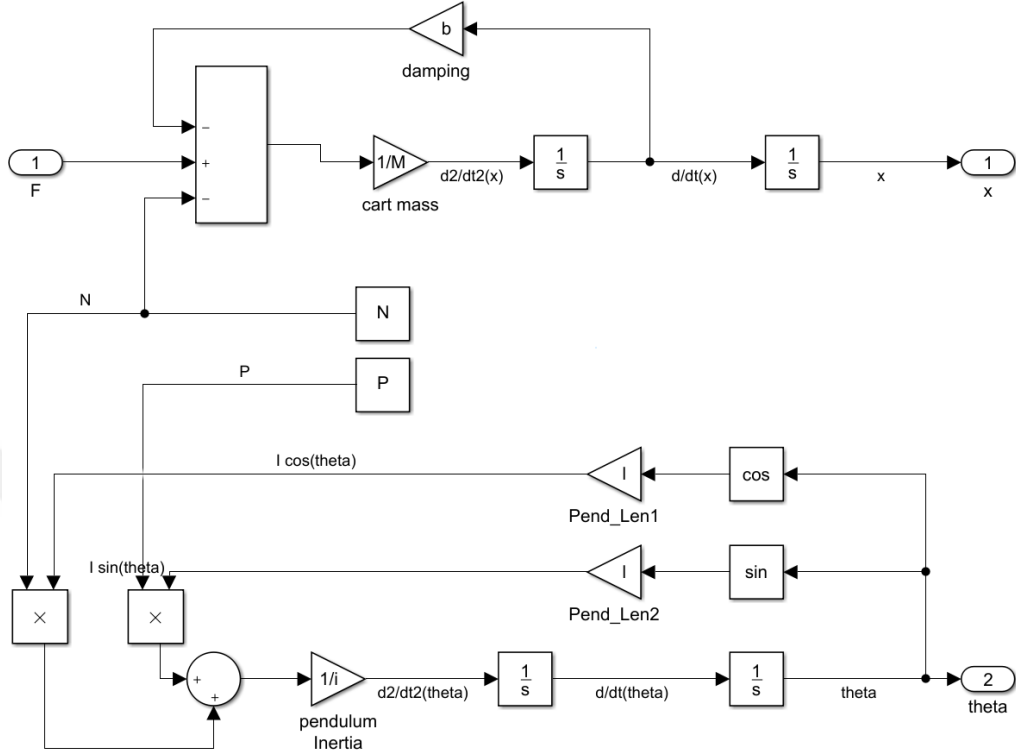


Şekil 1.3. (a) Araba konumunun Simulink modeli (b) sarkaç açısının Simulink modeli

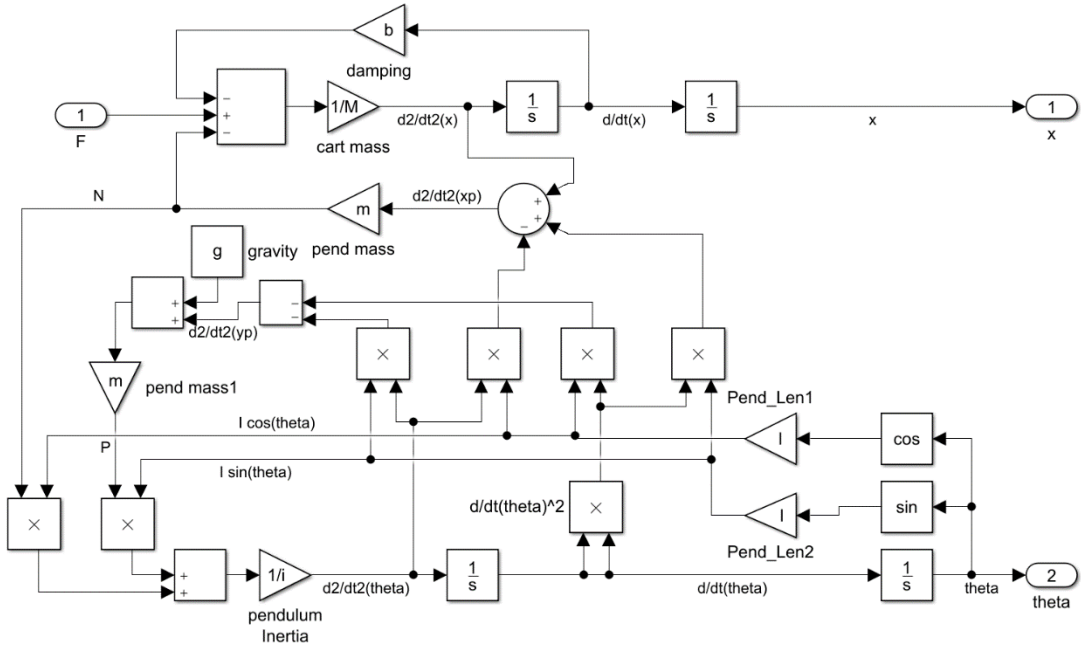
Şekil 1.3'de 1 numaralı çıkış olarak belirtilen x konum gösterimine, Denklem (1.14)'de bulunan N kuvveti dahil ederek tamamlanmıştır. Denklem (1.15) içerisinde bulunan P kuvveti ise x_p ve y_p 'nin açılımları yapılarak tamamlanmıştır.

Şekil 1.4'de sistem modeline, sarkaç ve araba arasındaki kuvvet ilişkisini oluşturacak olan Denklem (1.20) ve Denklem (1.23) bağıntısında kullanılan θ açısının ikinci

dereceden türevi olan açısai ivme ile sarkaç boyuyla bağıntılı olan yatay ve dikey kuvvetleri eklenmiştir.



Şekil 1.4. Sarkaç açısına etki eden kuvvetlerin Simulink modeline eklenmesi



Şekil 1.5. Ters sarkaç sisteminin Simulink'de oluşturulan modeli

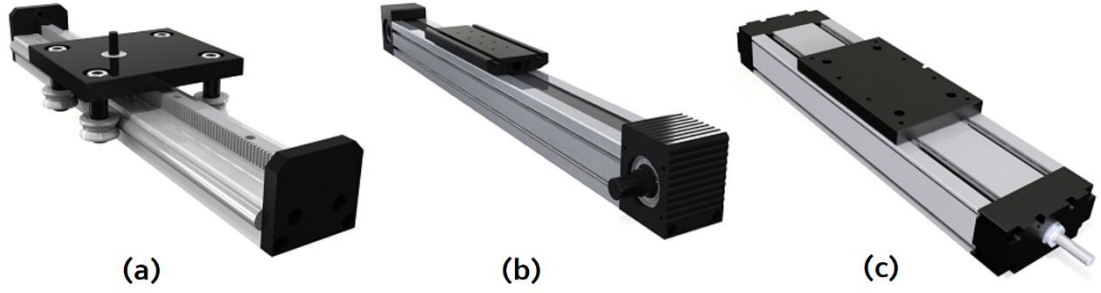
Şekil 1.5’de Denklem (1.19) ve Denklem (1.21) ile gösterilen x_p ve y_p ifadeleri eklenerek, ters sarkaç sisteminin tüm dinamiklerinin yer aldığı Simulink gösterimi oluşturulmuştur. Şekil 1.5’de gösterilen ters sarkaç sisteminin modelinde sistemin 1 numaralı girişinden arabaya uygulanan (F) kuvveti sonucunda, 1 numaralı çıkışında arabanın konumu (x) ve 2 numaralı çıkışında sarkaç açısı (θ) bilgisi elde edilmiştir.



2. GERÇEK SİSTEM TASARIMI

2.1. Ters Sarkaç Sisteminin Mekanik Tasarımı

Bu bölümde Şekil 1.1’de modeli verilen ters sarkaç sisteminin gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Ters sarkaç sisteminin mekanik tasarımının oluşturulabilmesi için öncelikle arabanın üzerinde ileri geri hareket edebileceği yatağın tasarımını gerçekleştirmek gerekmektedir. Piyasada araba yataklama problemine hazır çözüm sunabilecek lineer yataklar bulunmaktadır. Lineer yataklar farklı amaçlara uygun farklı mekanik tahriklerde bulunabilmektedir.



Şekil 2.1. (a) Kremayer tahrikli (b) triger kayış tahrikli (c) vidalı mil tahrikli lineer yatak

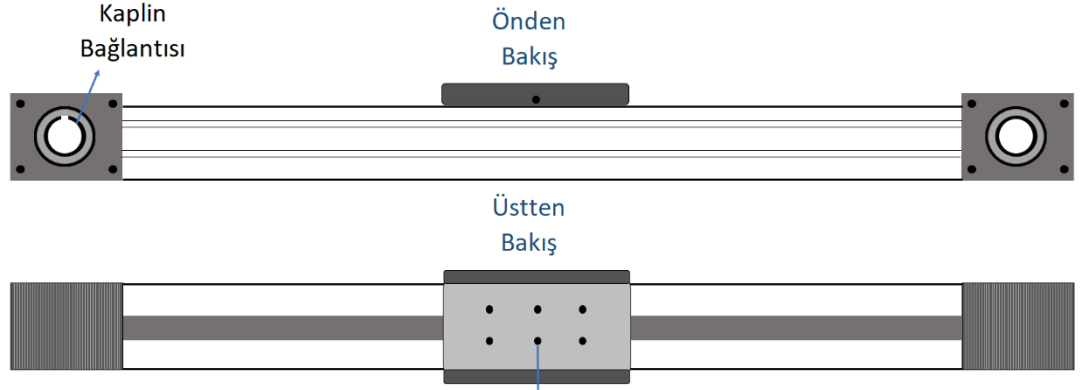
Şekil 2.1’de birkaçının gösteriminin verildiği lineer yataklardan, taşınacak yükün ağırlığı, pozisyon hassasiyeti, arabanın ulaşacağı maksimum hız gibi parametrelere göre sisteme uygun yapıda olanı seçilebilmektedir.

2.1.1 Triger kayış tahrikli lineer yatak

Diğer lineer yataklara kıyasla daha yüksek hızlara çıkılabildiği ve konum hassasiyetinin daha yüksek olması sebebiyle bu çalışmada triger kayış tahrikli sistem tercih edilmiştir. Kremayer ve vidalı mil tahrikli yataklar, tahrik noktalarının sert demir alaşımlı malzemelerden yapılmış olması sebebiyle, sarkaç açısında meydana gelecek ani değişimlerde, arabanın da aynı oranda yüksek çift yönlü tepkisinde kırılabilme ihtimali oluşundan ya da buna izin vermeyecektir. Bu dezavantajlardan

dolayı bu çalışmada, daha esnek yapıda olan triger kayış tahrikli lineer yatak tercih edilmiştir.

Şekil 2.2’de üstten ve önden görünümü verilen triger kayış tahrikli lineer yatak, sol baştaki kaplin bağlantı aparatı ile bir motora direk olarak bağlanmakta ve sağ başta bulunan rulman ile bir mil üzerine geçirilerek şase bağlantısı yapılmaktadır. Bu iki nokta içinde bulunan dişli parçalar üzerine gerdirilmiş olan triger kayışın iki açık ucu, yatağın orta noktasında arabayı da üzerine sabitleyerek birleştirilmiştir. Dolayısıyla sol kaplin bağlantı noktasından bağlanan bir motor ile sisteme tahrik verildiğinde, araba kayışla birlikte ileri geri hareket edebilir duruma getirilmiştir.



Şekil 2.2. Triger kayış tahrikli lineer yatak

Tablo 2.1. Deneyde kullanılan lineer yatak ölçüleri

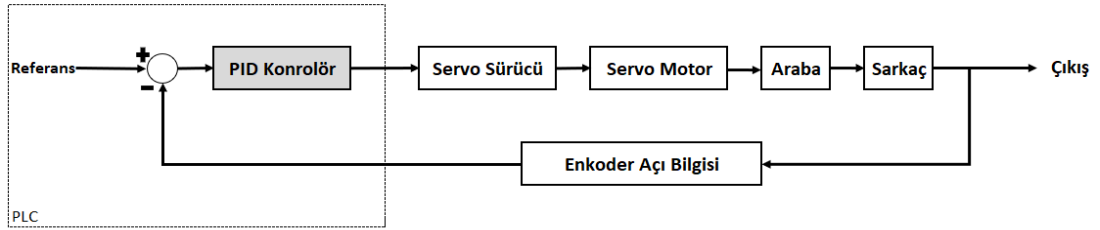
Malzeme adı	Özellik	Açıklama
Modül profili	64x64 cm	Sigma profil kafesi
Modül plakası	85x150 mm	Kayışa bağlı araba
Modül yataklaması	...	DMS marka GHR15 ray
Modül tahrik tipi	...	5M-F30 Z=26 Triger
Maksimum hız	5 m/sn	Arabanın çıkabileceği hız sınırı
Bir turda alınan yol	130 mm	Kaplin turu – araba yolu

Şekil 2.2’de genel gösterimi sunulan triger kayış tahrikli lineer yatak için bu çalışmada kullanılan ölçüler Tablo 2.1’ de verilmiştir.

2.2. Elektronik Tasarım

Genel blok yapısı Şekil 2.3’de verilen ters sarkaç deney seti, arabanın bağlı olduğu triger kayışlı bir lineer yatak, bu triger kayışı ileri geri hareket ettirebilen bir servo motor, araba üzerine bağlı olan, açı bilgisini elde edeceğimiz bir enkoder ve bu

enkoder miline direk rulman yataklı bir kaplin ile bağlı olan sarkaçtan meydana gelmektedir. Blok diyagramında da görüldüğü üzere, sistemin çalışması, sisteme sabit olarak girilecek $\theta=0^\circ$ referans değeri ile sistem çıkışının farkı PID denetleyici ile değerlendirilmektedir. PID denetleyici çıkışı servo sürücüye hız bilgisi olarak aktarılmakta, servo sürücü ise gelen referans hızını servo motora aktarmaktadır. Servo motorun ürettiği tork ile tahrik alan triger kayış, arabanın konumunu değiştirmekte ve bu hareket sonucunda oluşan kuvvet ile dairesel hareket eden sarkacın açısı değişmektedir. Ters sarkacın açısı enkoder vasıtasıyla ölçümlenecek tekrar PID denetleyici girişine hata bilgisi olarak dahil edilmiştir. Bu işlem her 1 milisaniyelik tekrarlarla sistem kapatılana kadar devam edecek bir döngüye sahiptir.



Şekil 2.3. Gerçekleştirilen sistemin kontrol bloğu

2.2.1 Servo sistemler

Endüstride genellikle pozisyon ve açı kontrolünün gerektiği durumlarda servo motorlar kullanılır. Asenkron motorların aksine servo motorlar kararlılığın belirlenen tolerans aralığında tutulabildiği, hassasiyetin önem arz ettiği uygulamalarda tercih edilen bir tahrik sistemidir. AC (Alternatif Akım) ve DC (Doğru Akım) olarak gerilim tiplerine göre ayrılan bu motorlar temelde 2 fazlı asenkron motorlardır. Yüksek güvenilirlik, bakım aralıklarının uzun olması ve stabilizasyonun önemli ve kalıcı olmasının istendiği uygulamalarda tercih edilirler.

Bu çalışmada da sarkacın yukarı konumda sabit kalması için, motorun sarkaçta meydana gelecek ani pozisyon değişikliklerine uyum sağlayabilmesi sebebiyle servo motor tahriğinden faydalanılmıştır.

Çalışmada kullanılan servo motor, Delta marka 400 watt gücünde 1,27 N.m torca sahip bir motordur. Servo motorun etiket bilgileri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2. Deneyde kullanılan servo motorun etiket bilgileri

Özellik	Açıklama
Marka	Delta
Model	Ecma-C10604RS
Besleme gerilimi	110 VAC
Güç	400 Watt
Nominal hız	3000 d/dk
Tork	1,27 N.m

Servo motorun direk gerilim kontrolü ile kullanılması mümkün değildir. Piyasada bulunan her servo motor için uygun tipte bir de sürücüsü bulunmaktadır. Kontrol aslında direk olarak motora değil, motor sürücüsüne yapılmaktadır.

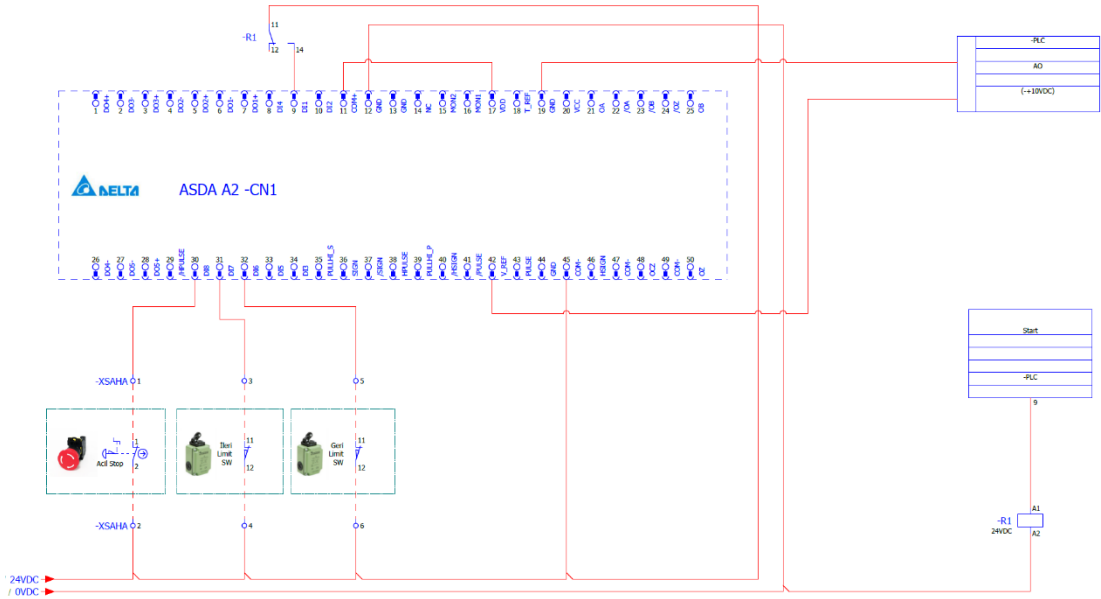
Servo motor sürücüleri hız kontrolü, pozisyon kontrolü, tork kontrolü gibi farklı modda kontrollere uygun yazılımlara sahiptirler. Bununla birlikte servo motor sürücüleriyle, farklı analog sinyallerle kontrol sağlanabilmektedir. Sistemi kontrol edecek olan kontrolör servo motor sürücüsüne hangi referans değeri iletirse servo motor kendi emniyet durumlarını sisteme dahil ederek motora o referans doğrultusunda frekans ve gerilim değeri iletacaktır. Servo sürücüler, kullanılan motor çalışma moduna göre farklı türde referans sinyalleri iletimine uygun yapıdadır. Eğer kullanılan mod hız ya da tork moduysa analog sinyal kontrolüyle sürücü referanslanabilir. Örneğin, ± 10 VDC aralığına sahip bir referans iletiminde, motor ± 3000 d/dk hızlarında, gelen referans sinyalin değerine göre kontrol edilebilir. Kullanılacak mod pozisyon kontrolü olacaksa, bu defa PWM sinyali ile doluluk boşluk oranıyla motor hızının, iletilen kare dalga sayısı ile pozisyon referansın belirlenebildiği yöntemle de kontrol edilebilir.

Şekil 2.4’de verilen, deney setinde kullanılan servo motor sürücü Delta marka ASDA A2 model sürücüdür. Bu çalışmada arabanın konumuyla ilgilenilmeyeceğinden, sarkaçta meydana gelecek açı değişimlerinde ani tepki verebilmesi için, sistemde kullanılan kontrolör ile ± 10 VDC referans sinyal ile kontrol edilen sürücü, hız modunda kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Deneyde kullanılan servo motor sürücüsü

Şekil 2.4’de görülen servo motor sürücüsünün CN1 portunda 50 adet pin bulunmaktadır. Bu pinler kontrol, referans, geri bildirim gibi sürücüyle kurulacak haberleşmede kullanılmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi sürücünün farklı çalışma modlarına göre CN1 portu farklı konfigürasyonlara sahiptir. Ürünün teknik kataloğundan faydalanılarak sistemde kurgulanan elektriksel bağlantı şeması Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

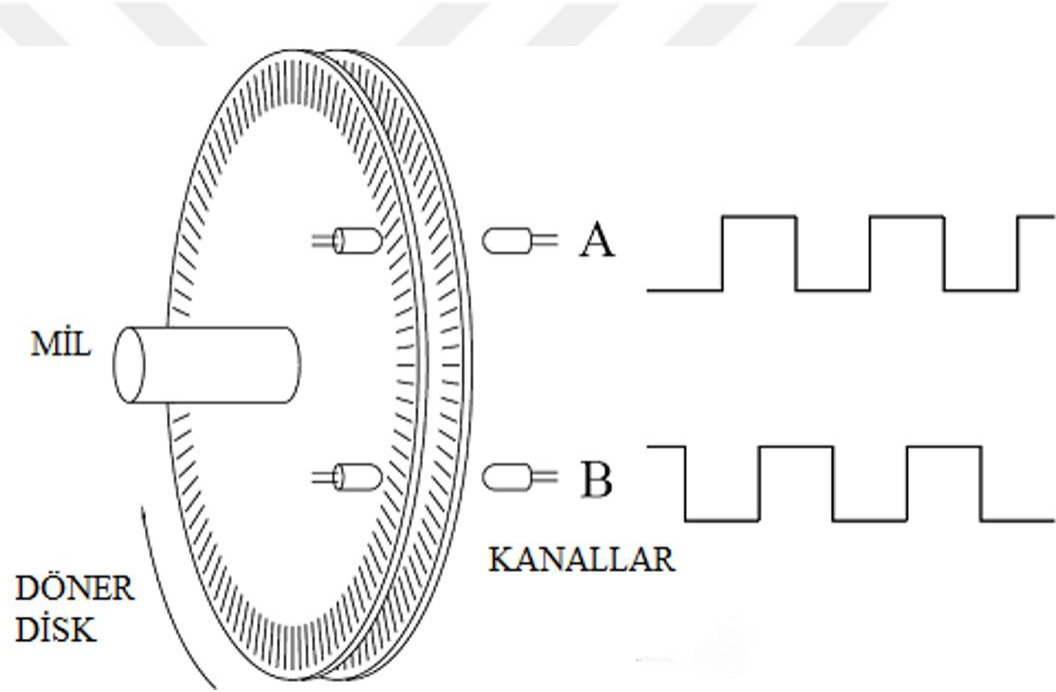


Şekil 2.5. Hız modunda kullanılan servo motor sürücüsünün bağlantı şeması

Şekil 2.5’de verilen bağlantı şemasında 19 ve 42 numaralı pinlere bağlanacak bir potansiyometre yardımıyla ya da bu çalışmada da tercih edildiği gibi harici bir referans kaynağıyla sürücü istenilen hızda motor kontrolünü gerçekleştirecektir. Şekil 2.5’de gösterimi yapılan diğer pinlerle olan bağlantılar ilerleyen bölümler altında anlatılmıştır.

2.2.2 Enkoder

Şaftlarının çalışma şekillerine göre döner ya da doğrusal olarak genelde iki farklı şekilde piyasada bulunabilen enkoderler, bir milin hareket etmesine karşılık elektriksel sinyali anahtarlayan elektromekanik bir ekipmandır. Genel çalışma mantığının Şekil 2.6'da gösterildiği enkoderler, sinyal çıkışı oluşturabilmek için mekanik, manyetik, optik ya da dirençli yapıda olabilirler. Enkoderler, hareketli sistemlerde bağlı bulunduğu ekipmanın konumunu, hızını, sayımını ya da yönünü tespit edebilmek için kullanılabilirler. Çözünürlükleri dairesel disk etrafında eşit parçalara bölünerek oluşturulmuş kanal sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

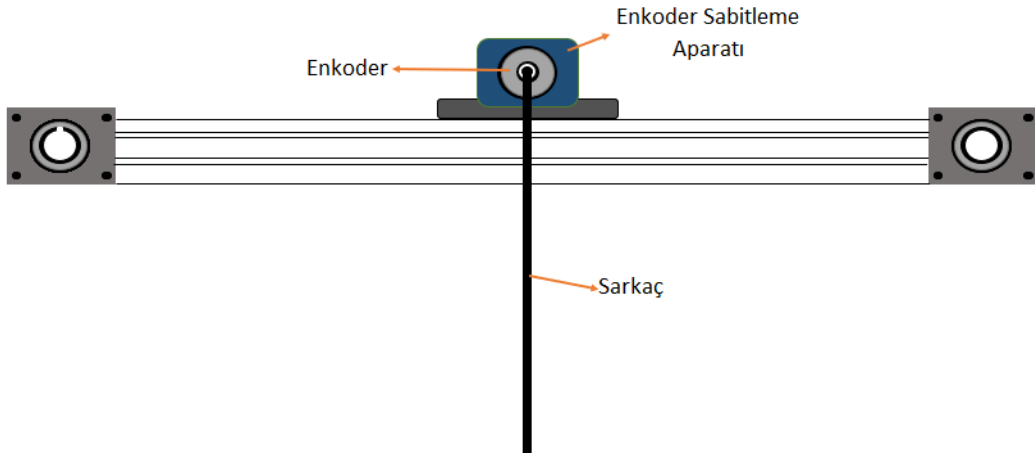


Şekil 2.6. Enkoder yapısı

Enkoderler durumu tespit edilmek istenen ekipmana genelde bir kaplin vasıtasıyla mekanik olarak bağlanırlar. Ekipmanda oluşan hareket değişikliğine bağlı olarak enkoder mili aynı ya da belirlenen oranda döner. Buna bağlı olarak milin etrafına konumlandırılmış disk kanalları, iletim halinde olan sinyali aç kapa yaparak kare dalga işareti üretirler. Piyasada genellikle optik çalışma prensibine sahip enkoderler yaygındır. Şekik 2.6'da genel gösterimde de görüldüğü üzere A ve B çıkışlarından faz farklı kare dalgalar üreten bu elektromekanik ekipman bir kontrolör vasıtasıyla durum tespiti için kullanılabilir.

Hazırlanan ters sarkaç deney düzeneğinde sarkacın arabaya bağlı olduğu noktada bir enkoder vasıtasıyla sarkaçta meydana gelen açı bilgisi kontrol girişine dahil edilmiştir. Kullanılan enkoder PNP çıkış tipine sahip 4096 pulse çözünürlüğünde Autonics marka enkoderdir.

Şekil 2.7’de araba üzerinde sarkaç ile yapılan enkoder bağlantısı verilmiştir. Enkoderler hasas yapıda ekipmanlar olduklarıdır. Enkoder mili üzerinde meydana gelecek yük binmesi zamanla hassasiyetinin kaybolmasına hatta bozulmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle enkoder milinin bağlanılacağı ekipmana esnek bir kaplinle bağlanması, böylece miline yük binmemesi önemli bir durumdur.



Şekil 2.7. Enkoderin ters sarkaç sistemine montajı

Enkoder seçimi yapılırken önemli olan bazı durumlar vardır. Bunlardan biri de çözünürlük bilgisidir. Bir tam turunda çıkışında meydana getireceği kare dalga adeti enkoderin çözünürlüğünü belirlemektedir.

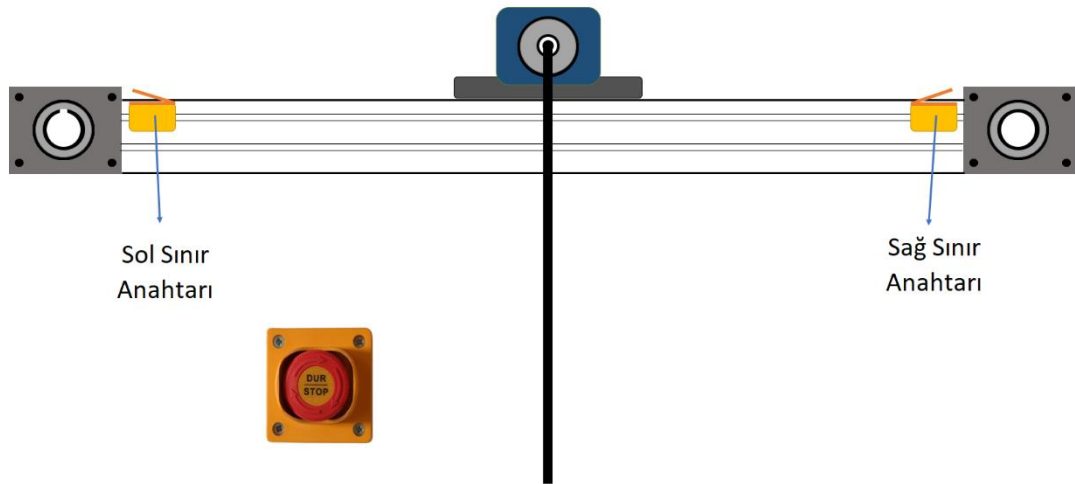
Çalışmada kullanılan enkoder sarkacın 360 derecelik döner hareket bilgisini vereceğinden ve çalışmada amaçlanan sarkacın dik konumdan maksimum 0,05 radyanlık (=0,314 derece) toleransla denge konumunda kalabilmesi olduğundan, seçilen enkoderin bu gereksinimleri karşılamaı gerekmektedir. Dolayısıyla çalışmada, 360 derece / 4096 pulse çözünürlüklü enkoder tercih edilmiştir. Bu seçim sonucunda yaklaşık 0,0879 derece adım aralığında hassasiyet elde edilmiş ve sistem gereksinimlerini karşılanmıştır.

2.2.3 Emniyet ekipmanları

Endüstriyel sistemlerde iş ve ekipman emniyeti önemli bir konudur. Sistemlerin çalışmalarını mal ve can güvenliğini tehdit etmeden sürdürebilmeleri için olumsuz senaryolara karşı gerekli tüm tedbirler alınmalıdır.

Ters sarkaç sisteminin deney setinde sabitleneceği platformda da gerekli tüm tedbirler alınmaya çalışılmıştır. Şase yükseliği hesaplanırken, sarkacın döner hareketi sonucu serbest düşme ile zemine çarpacağı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Bunun yanı sıra daha önce Şekil 2.5’de verilen servo sürücü bağlantı şemasında da görüleceği üzere sisteme bazı emniyet anahtarları dahil edilmiştir. Bu emniyet anahtarlarından biri acil stop butonudur. Herhangi bir olumsuzlukta basılması halinde sistemin tüm çıkışlarını pasif konuma getir amacıyla konulmuştur. Şekil 2.8’de verilen sol ve sağ sınır anahtarları ise servo motor sistemlerinde önem arz eden emniyet durumlarından olup deney düzeneğine dahil edilmiştir. Çalışmada pozisyon kontrolü sağlanmayacağı için, sarkaç denge konumunda tutulmaya çalışırken, araba yatak üzerinde bazı durumlarda belirlenen çalışma aralığını aşabilir ve yatağı bozabilecek bir hızda bağlantı noktalarına çarpabilir. Bu problemin önüne geçebilmek için motorun sol hareketini durduracak sol sınır anahtarı ve sağ hareketini durduracak sağ sınır anahtarı deney düzeneğine Şekil 2.8’de gösterildiği şekilde dahil edilmiştir.

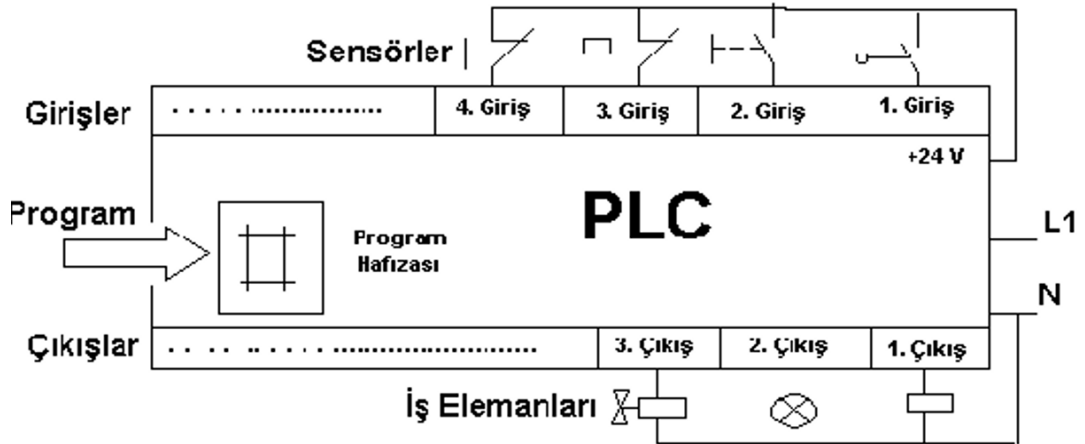


Şekil 2.8. Sistemdeki emniyet ekipmanları

2.2.4 PLC

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde, makine ve tesis sürecinin kontrolünde çoğunlukla kontrolör olarak PLC'ler kullanılmaktadır. PLC'ler zorlu endüstriyel koşullar altında, değişen ortam sıcaklıklarında, bağlı oldukları elektriksel hatlarda meydana gelebilecek gürültülerde kararlılıklarını koruyabildikleri için tercih edilirler. Bilgisayarların aksine sistem gereksinimlerini karşılayabilecek sayıda giriş çıkış arabirimlerine sahip olan bu kontrolörler, lojik mantık kurgularıyla programlanabilmektedirler. PLC'ler değişen giriş bilgilerini neredeyse nanosaniyeler mertebesinde okuyarak, içerisinde kurgulanan lojik mantık kapılarını bu giriş bilgilerine göre tarayıp, yine aynı sürülerde çıkış birimlerine cevap verebilirler. Endüstride sağlamlığını ve kararlılığını ispatlamış olan bu kontrolörle, bir makinanın, bir sürecin ya da komple bir tesisin otomasyon kurgusu sağlanabilmektedir.

Şekil 2.9'da genel gösterimi verilen PLC'ler, CPU (Merkezi İşlem Birimi), bellek birimi, giriş birimi ve çıkış birimi olmak üzere 4 ana bölümden oluşurlar.



Şekil 2.9. PLC'nin genel gösterimi

Merkezi işlem birimi CPU olarak isimlendirilen mikroişlemci alt yapısını kullanan, kontrolörün çalışmasını düzenleyen, aritmetik ve mantıksal kurguları işleten, zamanlama ve sayma gibi işlevleri yürüten birimdir. Yazılan PLC kodu bu birimde çalıştırılır. Yazılacak kodun uzunluğuna ve döngü sayılarına göre tarama süresi değişkenlik gösterir.

Bellek birimi yazılabilen, silinebilen, programlanabilen bir alandır. Her PLC için yazılan kodlar ve veriler bu birim içerisinde saklanır. Bellek biriminin boyutu PLC kodunun ve tutulacak verinin sınırını belirlemektedir.

Giriş birimi dijital ve analog giriş olarak ikiye ayrılır. Dijital giriş birimleri, giriş portundaki gerilim değerine göre, bilgiyi 0-1 lojik mantıkla okurlar. Belirlenen eşik gerilimi altında olan giriş 0 kabul edilirken, üstünde olan gerilim 1 olarak kabul edilir. Endüstride yaygın olarak 24 VDC dijital sinyal kullanılır ve eşik gerilimi olarak yaygın olarak 16-18 VDC aralığı tercih edilir. Analog girişler ise dışarıdan gelen analog sinyalleri ADC (Analog-Digital Converter)'ler ile bir dijital tam sayı aralığına dönüştürerek merkezi işlem birimine aktarırlar. Endüstride tercih edilen çeşitli analog sinyaller vardır. ± 10 VDC, 0-20 mA, 4-20 mA ve direnç bunlardan bazılarıdır. Bunlar arasında uzun mesafelerde kayıp olmadan iletilebilen ve manyetik alana maruz kaldığında diğerlerine kıyasla en az düzeyde etkilenen mA sinyal türü en yaygın şekilde tercih edilmektedir.

Çıkış birimi, giriş biriminde olduğu gibi dijital ve analog olarak ikiye ayrılmaktadır. Dijital çıkışlar ise transistör ve röle çıkışı olmak üzere kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Hızlı anahtarlama gerektiren durumlarda rölelerin kabiliyetleri bu hıza ayak uyduramayacağından, transistör çıkışlı birimler tercih edilir. Analog çıkışlar ise analog girişlerin ters mantığıyla bu defa DAC (Digital-Analog Converter) modülleri ile merkezi işlem biriminden üretilen dijital tam sayıları çıkışında analog değere dönüştürürler.

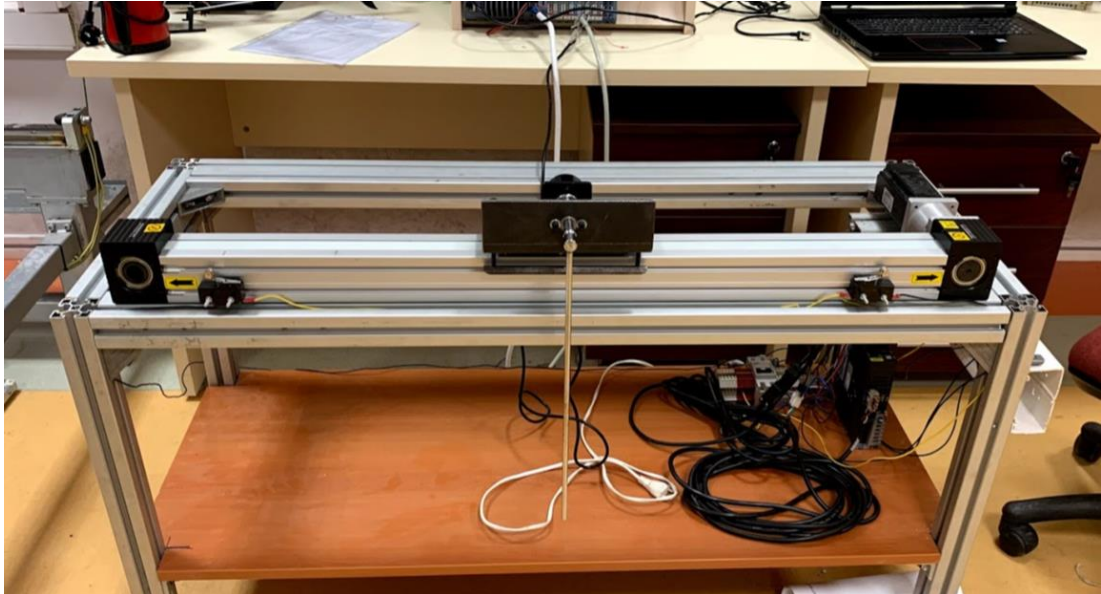
Endüstriyel PLC sistemlerinde bu 4 ana birim modüler halde bulunmaktadır. Bu birimlerin seçimlerinde sistem gereksinimlerine uygun konfigürasyon yapılmalıdır. Proje maliyeti, sistemin ihtiyaç duyduğu tarama hızı, sisteme uygun kodun boyutu, diğer mikroişlemcili sistemlerle haberleşme yeteneği gibi birçok faktör, modül seçimi yaparken göz önünde bulundurulması gereken özelliklerdir.

Bu çalışmada kullanılacak PLC seçimi yapılırken, model sistem üzerinde deneysel çalışmalar yapılırken belirlenen örnekleme zamanı olan 1ms'den daha az tarama süresine sahip olması göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen Siemens CPU 1515SP PC model PLC ve sistem gereksinimlerini karşılamak amacıyla ilave edilen giriş çıkış modelleri Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Denede kullanılan PLC ve giriş çıkış modülleri

Standart sistemlerin dışında zor ve karmaşık mekanik kurguların, hızlı, verimli ve kararlı bir şekilde çalışması, PLC içerisine gömülen kodun esnekliğiyle doğru orantılıdır. Günümüz şartlarında gelişen teknoloji ve zorlaşan mekanik yapıların otomatik kontrol edilmesinde, PLC sistemleri kendi başlarına bazen yetersiz kalabilmektedir.



Şekil 2.11. Ters sarkaç deney düzeneği

Bu çalışmanın da ana konusu olan, endüstride kullanılan bu sağlam ve kararlı kontrolörlere, Simulink ve benzeri modelleme programlarının entegrasyonu

sayesinde esneklik kazandırılarak, zorlu mekanik sistemlerin kontrolünün sağlanması amaçlanmaktadır.

Bölüm 2 içerisinde anlatılan tüm elektromekanik tasarım neticesinde tez çalışmasında kullanılmak üzere hazırlanan deney seti üniversite laboratuvar ortamına kazandırılmıştır. Anlatılan tüm hazırlıklar sonucunda şase bağlantısıyla birlikte oluşturulan deney seti Şekil 2.11’de verilmiştir.



3. SİSTEMİN PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

Kontrol sistemlerinde modelleme çalışmaları yapılırken tespit edilmesi güç olan değişkenler belirlenirken çoğunlukla benzetim çalışmalarından faydalanılmaktadır. Benzetim çalışmalarında, modeli oluşturulan sistemde, sisteme etki eden parametrelerin, gerçek sistemden alınan verilerle gerçeğe en yakın değerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır [34].

Ters sarkaç sisteminde, sisteme etki eden, değerleri ölçümlenebilen değişkenlerden, araba ağırlığı, sarkaç ağırlığı, sarkaç merkez nokta uzunluğu ve yer çekimi kuvveti dışında kalan, arabanın yol ile yaptığı sürtünme katsayısı ve sarkacın atalet momentinin hesaplanması teorik olarak oldukça zordur. Sistemin matematiksel modelinde yer alan bu parametreler, gerçek sisteme benzetim çalışması yapılarak tespit edilmiştir.

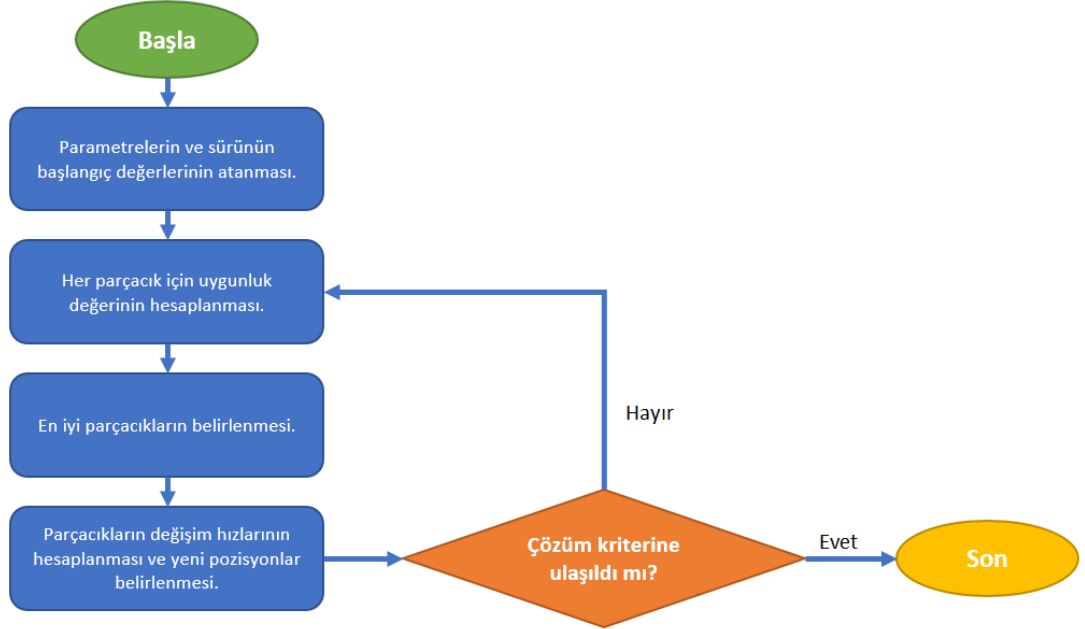
3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Bir problemin doğrudan çözümünün güç olduğu durumlarda, en iyi yaklaşımı bulmak için çok sayıda olasılığı denemek gerekebilir. Problemin çözümünün tespiti için her bir olasılığın tek tek denenmesi oldukça maliyetli, uzun zaman gerektiren, bazende sonsuz sayıda tekrarı içeren, uğraştırıcı bir yaklaşımdır. Bu gibi durumlarda optimizasyon algoritmaları ile problemin çözümüne makul sürede en iyi yaklaşım amaçlanır.

Sezgisel algoritmalarından biri olan PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu), diğer tüm sezgisel algoritmalarda olduğu gibi gerçek hayatta karşılaşılan bir problemi optimize etmek için kullanılmaktadır. Genetik algoritmaları, tabu araması, yapay sinir ağları, benzetmeli tavlama gibi farklı amaçlara uygun birçok sezgisel algoritma bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan PSO ise doğada sürü halinde hayatını devam ettiren hayvanlardan esinlenilerek oluşturulmuş bir arama algoritmasıdır. Sürü bireyleri birbirleriyle etkileşim halinde olarak bir probleme çözüm arayışında olurlar.

Arı kolonisi [36], karınca kolonisi [37], ateş böceği kolonisi [38], PSO haricinde faydalanılabilecek diğer sürü algoritma türlerinden [39] bazılarıdır.

PSO algoritması, belirlenen parametreler eşliğinde çözümü bulmak adına arama yapan her bir varsayıma parçacık ve bu varsayımların oluşturduğu iterasyon kümesine ise sürü adının verildiği optimizasyon algoritmalarından birisidir. Şekil 3.1’de verilen akış algoritması, başlangıçta belirlenen minimum ve maksimum değerler arasında, belirlenen sayıda rastgele değerlerle başlatılır. Algoritma başlatılırken atanacak rastgele değerler her bir parçacığı ve bu parçacıkların bulunduğu küme ise sürüyü temsil etmektedir. Her bir parçacık için, algoritmaya dahil edilen problem çözümü işletilerek çıkan sonuç uygunluğu kaydedilmektedir. Sürü içerisinde belirlenen parçacık sayısı kadar sonuç kümesi tamamlandığında, sürü çözüme en yakın sonucu veren değer dolaylarında tekrar pozisyonlandırılıp, algoritma iterasyon sayısı kadar döngüsüne devam etmektedir. Burada algoritmanın sonuçlandırılması için sınırlı sürü sayısı belirlenebildiği gibi, sonucun istenen aralığa yaklaşılan kadar devam etmesi de sağlanabilmektedir.



Şekil 3.1. PSO algoritmasının akış şeması

Şekil 3.1’de verilen algoritmaya göre oluşturulan Matlab kodu (Ek-A kısmında verilmiştir) sisteme dahil edilerek benzetim çalışmaları sırasında parametrelerin hesaplanmasında kullanılmıştır.

3.2. Benzetim Çalışması

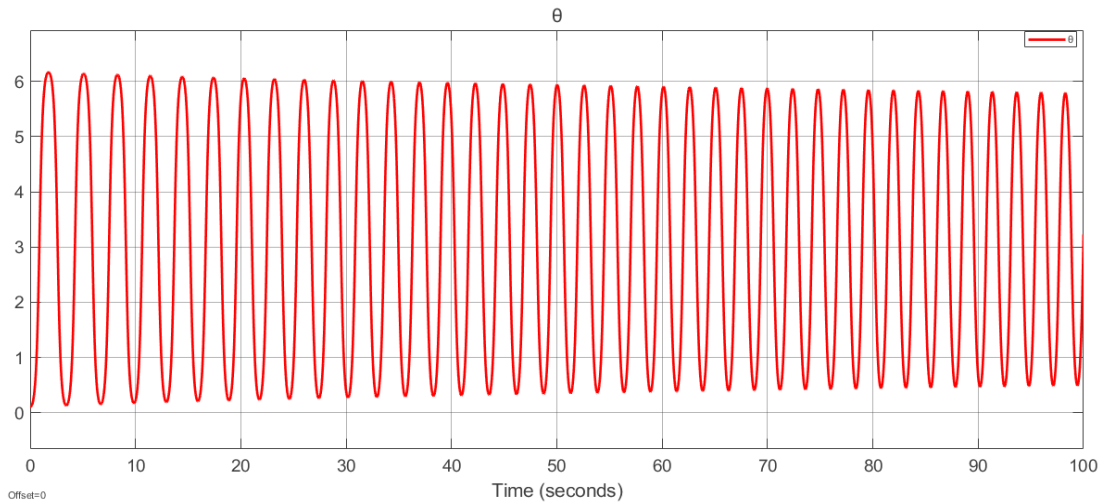
Ters sarkaç sistemine ait parametrelerin listesi Tablo 3.1’de verilmiştir. Tabloya göre arabanın ağırlığı, sarkaç ağırlığı, sarkaç denge noktasının arabaya olan uzaklığı ve yerçekimi ivmesi bağımsız ve ölçümlenebilen değişkenlerdir. Bunlar dışında kalan abanın yatak ile yaptığı sürtünme katsayısı ve sarkacın atalet momenti deneysel olarak ölçülmesi oldukça zor değişkenlerdendir.

Tablo 3.1. Ters sarkaç sisteminin değişkenleri

Parametre	Denklem simgesi	Ölçülen değer
Arabanın kütlesi	M	1,9 kg
Sarkaç kütlesi	m	0,149 kg
Sarkaç kütle merkezine olan uzaklık	l	0,25 cm
Yerçekimi sabiti	g	9,80 m/s ²
Arabanın sürtünme katsayısı	b	...
Sarkaç atalet momenti	i	...

Bu değişkenler ışığında daha önce Bölüm 1’de Simulink ortamında modeli oluşturulan sistem ile gerçek sistem arasında bir benzetim çalışması yapılarak ölçümlenemeyen değişkenlerin değerleri PSO ile hesaplanmıştır.

Benzetim çalışmasında model sistemde, motora hiçbir kuvvet uygulanmadan, serbest salınım halinde bulunan sarkaç belirlenen bir açıya çıkartılmış ve o noktadan serbest bırakılmıştır. Belli bir frekansta kendi ataleti, yerçekimi ve sürütünme kuvvetlerinin etkisiyle bir zaman sonra sönümlenerek durağan hale geçmiştir.



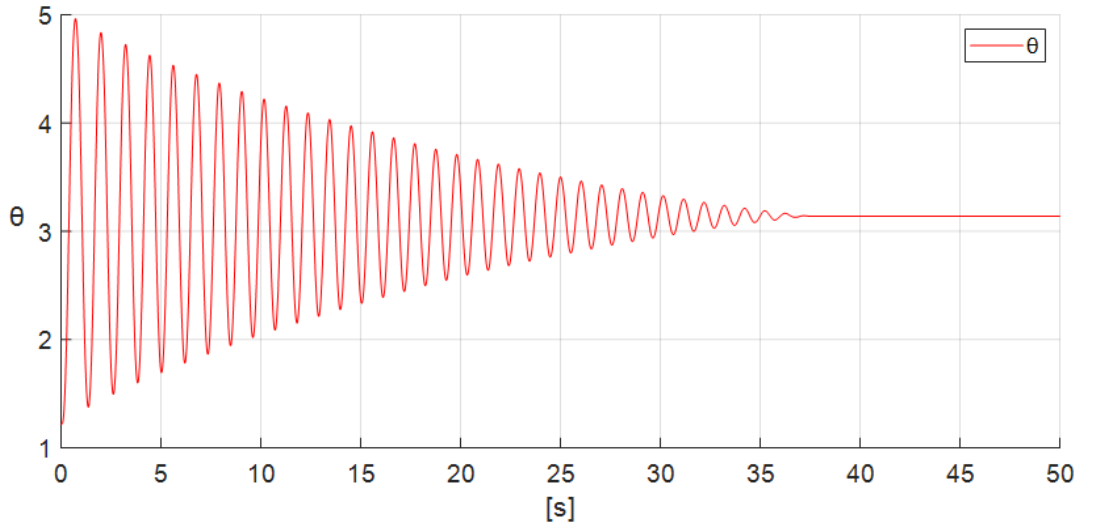
Şekil 3.2. Model sistemin ilk denemelerdeki serbest salınımı

Şekil 3.2’de de gösterildiği gibi, literatürde deneysel çalışmalarda tecrübe edilen olası değişkenler model sisteme parametre olarak girilmiş, sarkaç tepe noktadan serbest bırakılarak sistem tepkisi gözlenmiştir.

Şekil 3.2’de, 100 saniye boyunca neredeyse değişmeyen genlikte ve sabit frekansta sarkacın sürekli olarak alt ve üst noktalar arasında osilasyona girdiği görülmektedir. Şekil 3.2’de verilen grafiğin analizi yapıldığında, görülen salınımın yalnızca model sistem içerisinde, sürtünmenin sıfıra çok yakın olduğu ve ataletin yüksek olduğu görülmüştür.

Literatürde ters sarkaç sistemine ait yapılan teorik çalışmalar çoğunlukla gerçek sistem üzerinde denenmediğinden dolayı, oluşturulan salınım grafiğinin gerçek sistemden oldukça uzak olduğu görülmüştür. Burada ilk değer olarak sarkaç atalet momenti $i=0,006 \text{ kg.m}^2$ ve arabanın yol ile yaptığı sürtünme $b=0,1 \text{ N/m/sn}$ olarak kaynak olarak faydalanılan teorik çalışmadaki [40] değerler olarak denenmiştir.

Model sistem için oluşturulan salınım grafiğinden sonra bu defa gerçek sistemde de aynı deneysel çalışma yapılmıştır. Buna göre çıkan salınım grafiği Şekil 3.3’de verilmiştir.



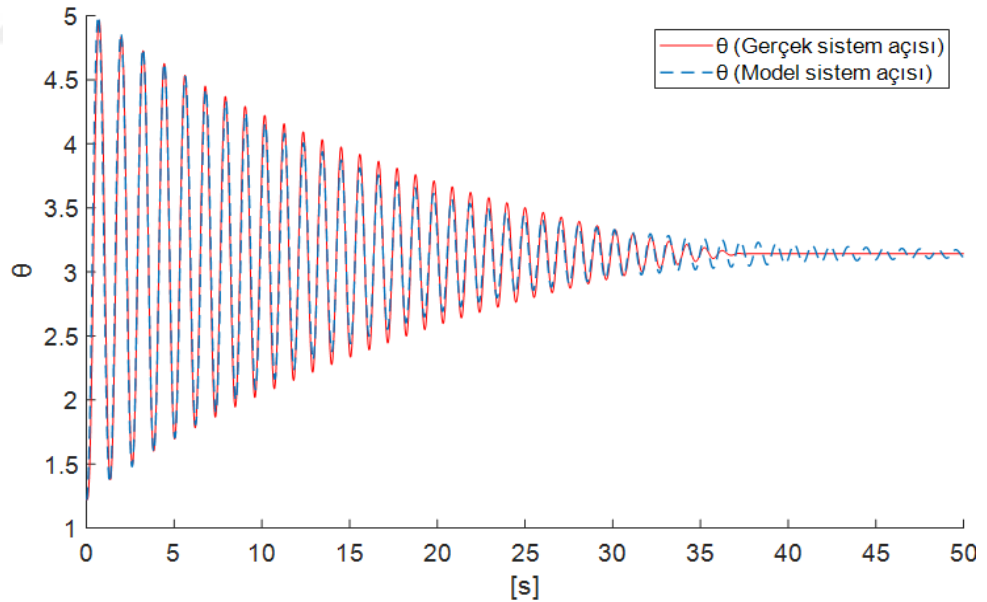
Şekil 3.3. Gerçek sistemin serbest salınımı

Şekil 3.3’de gerçek sistemde yapılan deneysel çalışmalarda, $\theta=0^\circ$ noktasına yakın bir pozisyondan bırakılan sarkacın 37 saniye sonra tamamen durağan hale geçtiği görülmektedir. Şekil 3.2’de görülen model sistemin salınım grafiğinin gerçek sistem

grafiğinden oldukça uzak olduğu görülmektedir. Bunun sebebi arabanın sürtünme katsayısı ve sarkacın atalet momentinin gerçek sistem parametrelerinden uzak oluşudur. Bu değişkenlerin hesaplanması için daha önce Simulink modeli oluşturulan sistem PSO algoritması ile, sürtünme katsayısı ve sarkaç atalet momenti değişkenleri yazılımın her döngüsünde değişken değerler olarak, algoritma gerçek sistem verisine en yakın sonuca ulaşılan kadar tekrarlanmıştır.

PSO algoritmasında uygunluk karşılaştırması yaparken, yazılımın her döngüsünde, model sisteme sokulan bu iki değişken sonucunda 1 milisaniyelik örnekleme zamanı ile tüm genlik değerleri toplanmıştır. Toplanan tüm model sistem verileri ile gerçek sistem verilerinin farkı ne kadar düşükse sürü o değerler dolaylarında tekrar pozisyonlandırılarak yeni iterasyon çalıştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, elde edilen parametrelerle model sistem çalıştırıldığında, gerçek sistemin çalışmasına en yakın benzetim grafiği Şekil 3.4'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Gerçek sistem ve model sistemin benzetim çalışması sonucunda elde edilen salınım grafiği

Şekil 3.4'de kırmızı düz çizgi ile gerçek sistemin salınımı ve kesikli mavi çizgi ile PSO algoritması sonucu gerçeğe en yakın sonucu veren parametrelerle çizdirilen model sistemin salınım grafiği elde edilmiştir. Grafikten hareketle gerçek sistemin 37. saniyede sönümlendiği ana kadar iki sistem verisinin aynı frekansta olduğu

görülmektedir. Genlik değerlerinin benzerliğindeki sapma ise kabul edilen tolerans içinde olduğu görülmektedir. Şekil 3.4’de gerçek sistem verisinin 37. saniyede sönümlenmesi ve model sistem verisinin bir süre daha salınma devam etmesi, hesaplanamayan ve ihmal edilen, model sisteme dahil edilmeyen etmenlerden dolayı olduğu düşünülmüştür.

Şekil 3.2’de ilk değer olarak sarkaç atalet momenti $i=0,006 \text{ kg.m}^2$ ve arabanın yol ile yaptığı sürtünme $b=0,1 \text{ N/m/sn}$ olarak bir ön gösterim yapılmıştı. Yapılan benzetim çalışması sonucu bulunan değerler $i=0,00088 \text{ kg.m}^2$ ve $b=7,4 \text{ N/m/sn}$ olarak güncellenmiştir. Belirlenen bu değerlerle sistemin güncel parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Yapılan benzetim çalışması sonucunda gerçeğe en yakın model sistem oluşturulmuş ve bundan sonra sistem üzerinde yapılacak kontrol çalışmalarına bu parametreler ile devam edilmiştir.

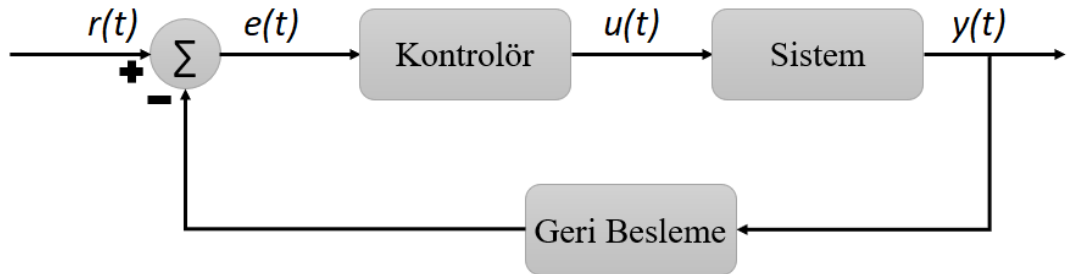
Tablo 3.2. Benzetim çalışması sonucunda ters sarkaç sisteminin parametreleri

Parametre	Denklem simgesi	Belirlenen değer
Arabanın kütlesi	M	1,9 kg
Sarkaç kütlesi	m	0,149 kg
Sarkaç kütle merkezine olan uzaklık	l	0,25 cm
Yerçekimi sabiti	g	9,80 m/s ²
Arabanın sürtünme katsayısı	b	7,4 N/m/sn
Sarkaç atalet momenti	i	0,00088 kg.m ²

4. DENETLEYİCİ TASARIMI VE MODEL SİSTEM KONTROLÜ

Kontrol sistemlerinde amaçlanan, kontrol edilmek istenen sistemin istenilen yöntem, zaman ve sonuç doğrultusunda, kararlı hale getirilmesidir. Sistemlerde uygulamak üzere literatürde birçok denetleyici çeşiti bulunmaktadır. Kontrol edilmek istenen sistem için denetleyici seçiminde, sistem ile uygunluk önemli bir kriterdir.

Kontrol sistemleri temelde açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık çevrim kontrolde, kontrol edilen sistemden uygulanan çıkış neticesinde bir geri bildirim alınmazken, geri beslemeli kontrol olarak da adlandırılan kapalı çevrim kontrolde ise, sisteme uygulanan kontrol sonucunda çıkışta meydana gelen değişim tekrar sisteme bir geri besleme olarak bildirilmektedir. Şekil 4.1’de kapalı çevrim kontrol şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kontrol sisteminin blok yapısı

Şekil 4.1’de $r(t)$ istenen durumu, $e(t)$ sisteme uygulanan kontrol sonucunda meydana gelen değişimin, istenen durumla olan farkını, $u(t)$ denetleyici çıktısını ve $y(t)$ sistem çıkışını temsil etmektedir. Ters sarkaç sisteminde de kontrol edilmek istenen sarkaç açısı enkoder ile ölçümlenerek sisteme geri bildirim olarak alınarak, sisteme kapalı çevrim kontrol uygulanmıştır.

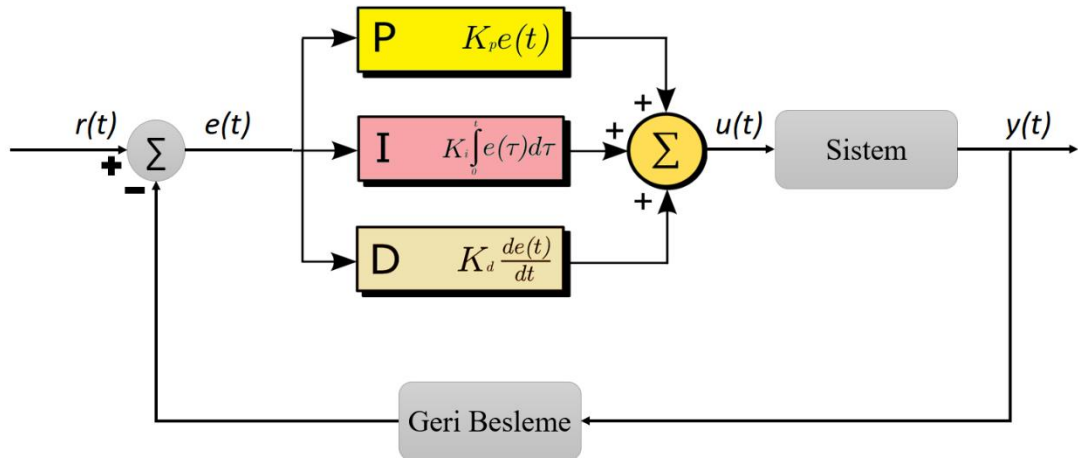
Ters sarkaç sisteminin kontrolünde iki farklı problem bulunmaktadır. Bu problemler alt tepe noktada durağan halde bulunan sarkacın müdahale edilmeden üst tepe noktaya yaklaştırılması veya üst tepe dolaylarına elle getirilen sarkacın $\theta = 0^\circ$

noktasında kararlı halde tutulması şeklinde literatürde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ikinci problem deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Ters sarkaç sistemi doğrusal olmayan, kararsız ve mekanik olarak dolaylı tahrikle kuvvetlendirilecek bir sistem olması sebebiyle kontrolü oldukça zor olan bir sistemdir. Sisteme uygun kontrolör tasarımında sistemin dinamikleri ve kontrol zorlukları göz önünde bulundurulmuştur. Bu sistemin denetleyici seçiminde göz önünde bulundurulan bir diğer durum ise, tasarlanacak denetleyicinin PLC ile gerçek sistem üzerinde kontrolünde, PLC içerisinde hazır bulunan bir kontrol fonksiyonu olması durumu olmuştur. Endüstride çok yaygın şekilde kullanılan PID denetleyici hem bu sistem için uygun bir denetleyici olarak görülmüş hem de PLC içerisinde bulunan hazır PID denetleyici ile tasarlanacak model denetleyicinin karşılaştırmasını yapabilmek amaçlanmıştır.

4.1. PID Denetleyici Tasarımı

PID oransal, integral ve türevsel denetleyici olarak sistemlerinin kontrolünde kullanılan en yaygın denetleyicilerden biridir. PID denetleyici sürekli olarak sistem durumunu denetleyici girişinde istenen durumla mukayese ederek, istenen durum ve sistem durumunun farkını alarak tekrar denetleyici girişine dahil eder. Şekil 4.2’de bir PID denetleyicinin kontrol şeması, Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)’de ise PID denetleyicinin transfer fonksiyonu verilmiştir.



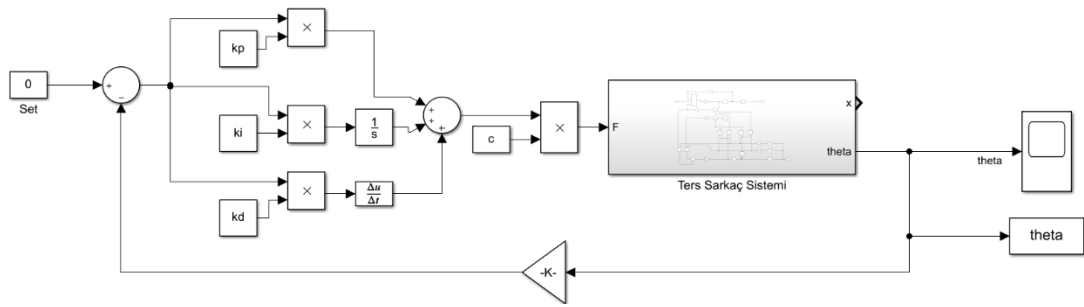
Şekil 4.2. PID denetleyici kontrol şeması

$$U(s) = \left(Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \right) E(s) \quad (4.1)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \quad (4.2)$$

PID denetleyicilerde oransal sabit olan P mevcut olan hataya bağlıdır. İntegral sabiti olan I geçmiş hatalar toplamı ve türevsel sabit D ise gelecek hatalar toplamı olarak yorumlanmaktadır. Sisteme göre değişen PID, PI, PD, P veya I gibi denetleyici tasarımları yapmak mümkündür. PID denetleyici çıkışı Şekil 4.2’de de görüleceği üzere bu katsayıların ağırlıklı toplamlarını içerdiğinden istenmeyen parametre sıfır girilerek sisteme uygun denetleyici tasarımı yapılabilmektedir.

Daha önce Simulink ortamında modeli oluşturulan ters sarkaç sistemi yine aynı ortamda PID kontrolör tasarımıyla kontrol edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.3’de blok yapıda PID denetleyicinin ters sarkaç sistemine bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4.3. Ters sarkaç sisteminin PID denetleyici ile bağlantısı

Şekil 4.3’de sistem girişi olan $r(s)$ sarkacın denge konumu olan $\theta = 0^\circ$ referansıdır. Bu referans sinyalinin, model sistem çıkışında görülen mevcut sarkaç açısı ile farkı, PID denetleyiciye giriş olarak uygulanacak $e(s)$ hata fonksiyonunu oluşturmaktadır. Denetleyiciye bildirilen giriş denklemi, belirlenen k_p , k_i ve k_d katsayılarıyla ağırlıklı toplam denklemi olan $u(s)$ ’yi oluşturmuştur. Oluşan $u(s)$ sistemin beklediği kuvvet birimine dönüştürülerek sisteme uygulanmıştır. Sisteme uygulanan kuvvetle arabaya tahrik verilmiş, arabada oluşan konum değişikliği sarkaç açısında bir değişim meydana getirmiştir. Sarkaç açısında meydana gelen bu değişim tekrar denetleyici girişine hata değeri olarak geri beslenmiştir.

PID denetleyicilerde katsayıların sisteme uygun belirlenmesi, sistem kararlılığı için önemli bir durumdur. Doğrusal kontrol sistemlerinde genellikle geçici hal yanıtının değerlendirilmesi, birim basamak yanıtından faydalanılarak yapılır. Bu durum kontrol sistemin birim basamak girişine, birim basamak yanıtı olarak tepkisi grafiksel

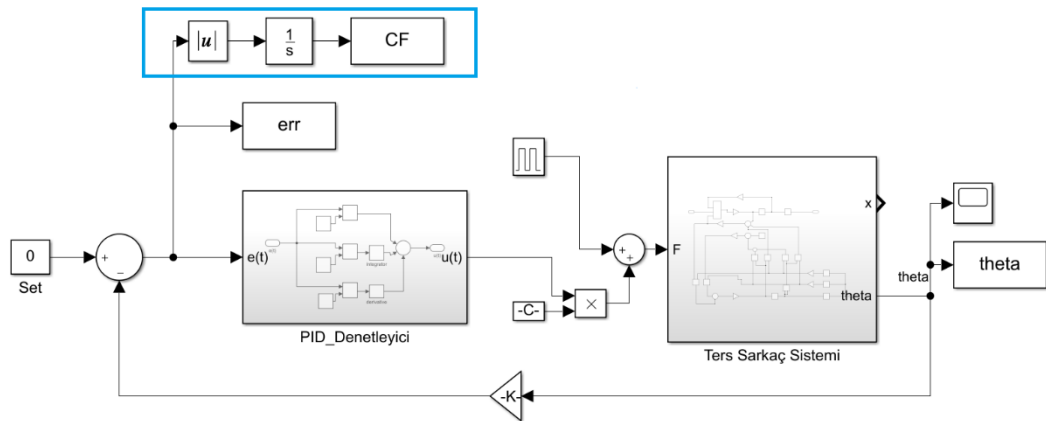
olarak incelenerek, en büyük aşım noktası, yükselme zamanı, gecikme zamanı ve yerleşme zamanının belirlendiği durumdur. Belirlenen bu parametreler sistemin toleranslar dahilinde kararlılığını belirleyecektir.

Bu çalışmada, sisteme uygulanan F kuvveti neticesinde arabanın konumuyla ilgilenilmeden, sarkaç denge konumunda iken serbest bırakıldığında ya da bozucu bir etkiyle dengesi bozulduğunda, 1 saniyenin altında en fazla 0,05 radyan sapma ile tekrar $\theta=0^\circ$ konumunda kalmasıyla ilgilenilmiştir. Dolayısıyla sistemin birim basamak yanıtında yerleşme zamanı 1 saniye olarak belirlenmiştir.

Tasarlanacak PID denetleyicinin sistemi istenen bu parametreler ışığında kontrol edebilmesi, belirlenecek PID katsayılarıyla doğrudan ilişkilidir. Sisteme uygun parametrelerin belirlenmemesi durumunda, sistem osilasyona girerek kararlılığını koruyamayacaktır.

4.2. PID Katsayılarının Belirlenmesi

Bu çalışmada tasarlanan PID denetleyicinin katsayılarının belirlenmesi için, daha önce sistemin parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan PSO algoritması, gerekli düzeltmeler yapılarak tekrar kullanılmıştır.



Şekil 4.4. PID denetleyicinin katsayılarının belirlenebilmesinde kullanılan Simulink modeli

Bölüm 3’de anlatıldığı gibi PSO algoritması, K_p , K_i ve K_d değişkenleri için belirlenecek minimum ve maksimum değerlerle birlikte, belirlenecek parçacık ve sürü sayısı ile birlikte başlatılmıştır. Algoritmanın her döngüsünde Şekil 4.4’de verilen Simulink modeli çalıştırılarak, sistem girişinde bir darbe ile bozucu etki

meydana getirilmiştir. Çalıştırılan simulink modelinde $e(s)$ çıktıları mavi dikdörtgen içinde gösterildiği gibi mutlak değer toplamına alınmıştır. Bu sayede her döngü sonunda değerlendirilen karar eşiği, sifira en yakın toplam olmuştur. Kontrol sonucunda, model çıkışında, sarkaç açısının istenen durumu $\theta=0^\circ$ olduğundan, bunu en hızlı ve en az aşım ile gerçekleştirecek olan kontrol sistem için uygun kontrol ve kontrolü sağlayacak K_p , K_i ve K_d katsayıları uygun katsayılar olarak belirlenmiştir.

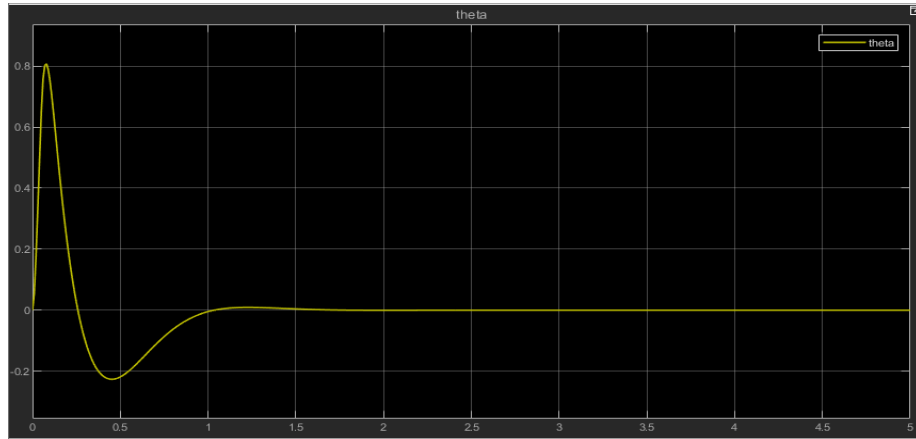
Tablo 4.1’de çalıştırılan PSO algoritması sonucunda belirlenen, sisteme en uygun PID katsayıları verilmiştir.

Tablo 4.1. PSO sonucunda belirlenen PID katsayıları

Katsayı	Değeri
K_p	4,5
K_i	17
K_d	0,5

4.3. Model Sistemin Kontrolü

Tablo 4.1’de verilen değerlerle model sisteme uygulanan PID denetleyici sonucunda meydana gelen sarkaç açısının değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Model sistemin PID denetleyici sonucu birim basamak yanıtı

Simulink modelinde $t=0$ anında $\theta=0^\circ$ noktasında denge halinde bulunan ters sarkaç sistemine, sistemin kararlılığını bozacak bir darbe uygulanmıştır. Uygulanan bozucu etkiyle birlikte PID denetleyicinin Şekil 4.5’de de görüleceği üzere, model sistemi 1 saniye içerisinde tekrar $\theta=0^\circ$ noktasında kararlı hale getirdiği gözlemlenmiştir. Buradaki ilk aşım değeri olarak görülen 0,8 radyanlık sapma, daha önce bahsedilen

en büyük aşım noktası değildir. Grafikte $t=0$ anında uygulanan anlık darbeye birlikte sarkaç açısında meydana gelen bozucu etki olarak değerlendirilmektedir. En büyük aşım noktası, kontrol başlatılığında istenilen değerden uzak olan mevcut sistem durumunun, yerleşme zamanı içerisinde istenilen durumu geçerek yaptığı ilk dönüş noktası olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada denetleyiciden beklenen, sistemde meydana gelen bozucu etki sonucunda, sistem durumunun 1 saniye içerisinde en fazla 0,05 radyan toleransla tekrar denge konumuna getirmesi olmuştur.



5. DENEYSEL UYGULAMA

Daha önce Bölüm 2.2.4 içerisinde anlatılan PLC'ler endüstride en yaygın kullanılan kontrolörlerdir. PLC'ler hem basit lojik mantık kurgularının oluşturulabilmesi, hem de karmaşık tesis ya da makine algortimalarının otomatik, sürekli ve kararlı olarak kontrol edilebilmesi için kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada endüstride bu kadar yaygın olarak kullanılan PLC'ler ile, kontrol sistemlerinin deneysel çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Simulink programının entegrasyonu da amaçlanmıştır.

PLC'lerin zorlu fiziksel şartlara karşı dayanıklı ve uzun yıllar boyunca kararlı bir şekilde sistemlerin kontrolünü sağlamalarının yanında sahip oldukları dezavantaj, sürekli olarak gelişen ve karmaşıklaşan mekanik sistemlerin doğrudan kontrolünde yapılarının çokta esnek olmamasıdır. Bir sistemin henüz tasarım aşamasındayken, sistemin maruz kalacağı fizik yasalarıyla matematiksel modelinin oluşturulması ve simüle edilmesi, sisteme uygun denetleyici seçimi ve tasarımı gibi karmaşık süreçler PLC'ler için oldukça güçtür.

Sürekli gelişen teknoloji çağında, PLC'ler ile sistem kontrolünde, klasik kontrol yöntemlerinin düşük hassasiyeti, PLC ortamında denetleyici tasarımının zorluğu ve sistem durumunda istenilen kararlılığın sağlanamaması gibi olumsuzluklar, kontrol alanında yeniliklerin gerekliliğini beraberinde getirmiştir.

Endüstride bu zamana kadar PLC'lerin yetersiz kaldığı durumlarda daha esnek yapıda olan bilgisayar tabanlı farklı yazılımlar devreye girerek sistem kontrolüne iyileştirmeler yapılmaya çalışılmıştır. Genel sistem kontrolünü sağlayan PLC işlemcisinin yanında, uygun şartlarda bilgisayar tabanlı programa PLC tarafından istenilen durum parametreleri iletilir, bilgisayar tabanlı program ise içerisine gömülen kodu işleterek PLC'ye hazır sonucu tekrar bildirir. Bu sayede PLC'ler için karmaşık olan sistemin bazı bölümlerinin kontrolünde PLC'ye esneklik kazandırılması mümkün hale getirilmektedir.

Fakat bu PLC-PC haberleşme yapısı beraberinde bir dezavantajı doğurmaktadır. Günümüz şartlarında iki sistemin haberleştirilmesinde meydana gelecek gecikme zamanları bazı sistemler için istenmeyen durumlar oluşturabilir. PLC, içerisindeki mikroişlemcinin yetenekleri doğrultusunda yüksek hızlarda bit işlem performansı gösterebilmektedir. Örneğin bu çalışmada kullanılan Siemens marka CPU 1515SP-PC model PLC, 1 milisaniyenin altına inebilen tarama zamanına sahip, oldukça yetenekli bir modeldir. Kontrol edilmek istenen sistemin ihtiyacına uygun hızı karşılamak için seçilen bir PLC, bilgisayar tabanlı yazılımla haberleşme esnasında ciddi miktarda zaman gecikmesine maruz kalacaktır. Her uygulama için önemli olmasada, bu bazı kritik uygulamalar için dezavantaj oluşturmaktadır.

Bu kurgunun bir diğer dezavantajı ise, bilgisayar tabanlı programların bir standartının olmayışı ve sistemden sisteme değişen her durum için, kodun tekrar yeniden yazılacak oluşudur. Sistemde meydana gelebilecek mekanik değişikliğin kontrol sistemine hemen entegre edilemeyecek oluşu, endüstri ortamında istenilen bir durum değildir.

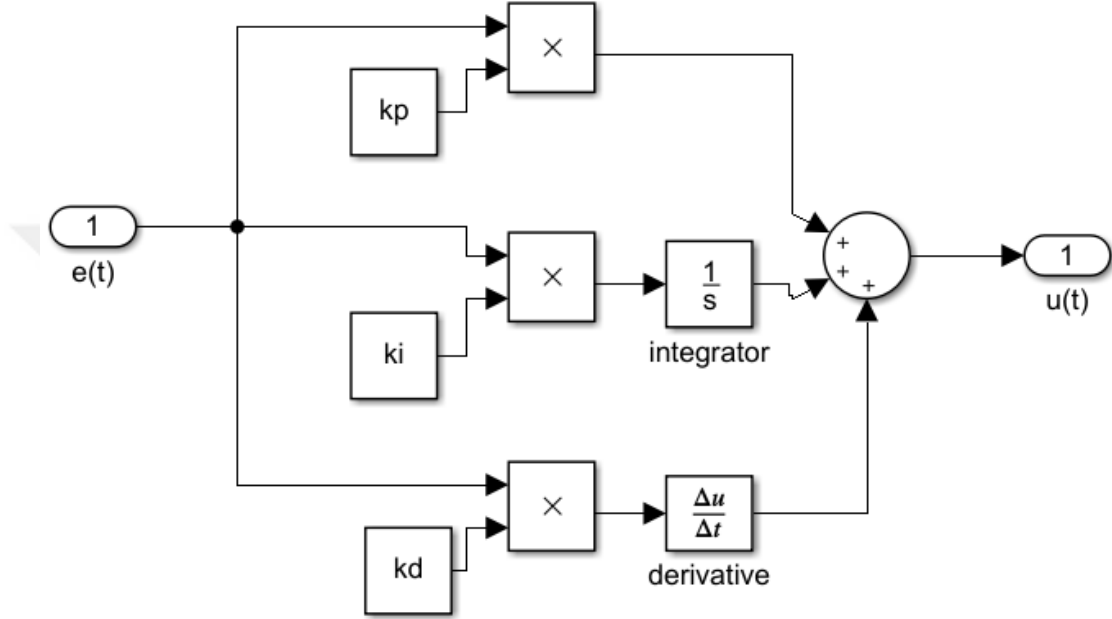
Bu çalışmanın hemen her aşamasında faydalanılan Simulink programı sayesinde, oluşturulan denetleyici tasarımları PLC koduna çevrilebilmekte ve PLC içerisinde hazır bir blok olarak entegre edilebilmektedir. Dolayısıyla yukarıda bahsi geçen tüm bu olumsuzluklar ortadan kalkarak, iki sistem arasında haberleşme gecikmesi yaşanmayacak ve sistemde olabilecek değişiklikler Simulink'in oluşturduğu hazır fonksiyon içerisine işlenebilecektir.

5.1. Simulink PID Denetleyicinin PLC Koduna Dönüştürülmesi

Daha önce Bölüm 4.2'de anlatılan PID denetleyici, Simulink'in sunduğu bir özellik olarak PLC koduna dönüştürülebilmektedir. PLC içerisinde döngü halinde çalışan kod, tarama zamanıyla ilişkili olduğu için burada önem arz eden konulardan biri de Simulink ortamındaki modelin örnekleme zamanını PLC ile aynı hale getirmektir. PLC bir mikroişlemci olduğu için, program büyüklüğüne ve döngü sayısına bağlı olarak değişken tarama zamanlarına sahipken, işlemci içerisinde sabit tarama zamanına sahip kesmeler oluşturulabilmektedir. Simulinkte yapılan deneysel çalışmaların PLC ortamında benzer çıktılarının alınabilmesi için örnekleme zamanı dikkat edilmesi gereken önemli bir kriterdir.

Şekil 5.1’de Simulink’te hazırlanan PID denetleyici modelinin PLC koduna dönüştürülmeden önce zamansal sabitlerin PLC’ye uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Şekil 5.1’de, PID denetleyicinin daha önce Şekil 4.3’de verilen PID’li kontrol sisteminden ayrılarak bir alt model haline getirildiği görülmektedir.



Şekil 5.1. PLC koduna dönüştürülecek PID Simulink modeli

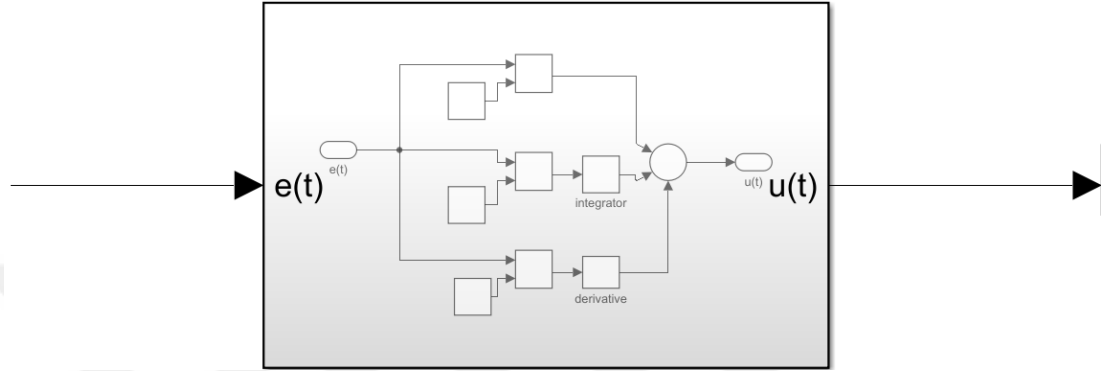
Denetleyici modeli PLC koduna dönüştürülürken sistem modelinden ayrılarak alt model oluşturulur. Zaten Simulink ortamında yapılan deneysel çalışmalar, ters sarkaç sisteminin matematiksel modeli, gerçeğe uygun benzetim çalışmaları gibi tüm durumlar, gerçek sistemle uyumlu çalışacak bir denetleyici tasarımının ön hazırlığı niteliğindedir. Dolayısıyla buradan sonra Simulink çalışmasında ilgilenilen konu sadece PID denetleyici olmuştur.

Simulink ortamından gerçek sistem kontrolüne geçişte, denetleyici haricindeki tüm modeller, gerçek sistemle pekiştirileceğinden bunlara PLC kodunda yer verilmeyecektir.

Buna göre, daha sonra PLC kodunda detaylıca anlatılacak olan, PLC içerisinde oluşturulacak kesme bloğu ile sabit olarak 1 milisaniyelik örnekleme zamanı,

Simulink ortamında da yapılan tüm deneysel çalışmalarda olduğu gibi, dönüştürülecek PID denetleyici içinde tanımlanmıştır.

Şekil 5.1’de detay modeli gösterilen PID denetleyici tasarımı, PLC koduna dönüştürebilmek için Şekil 5.2’de gösterildiği gibi bir alt model haline getirilmiştir.

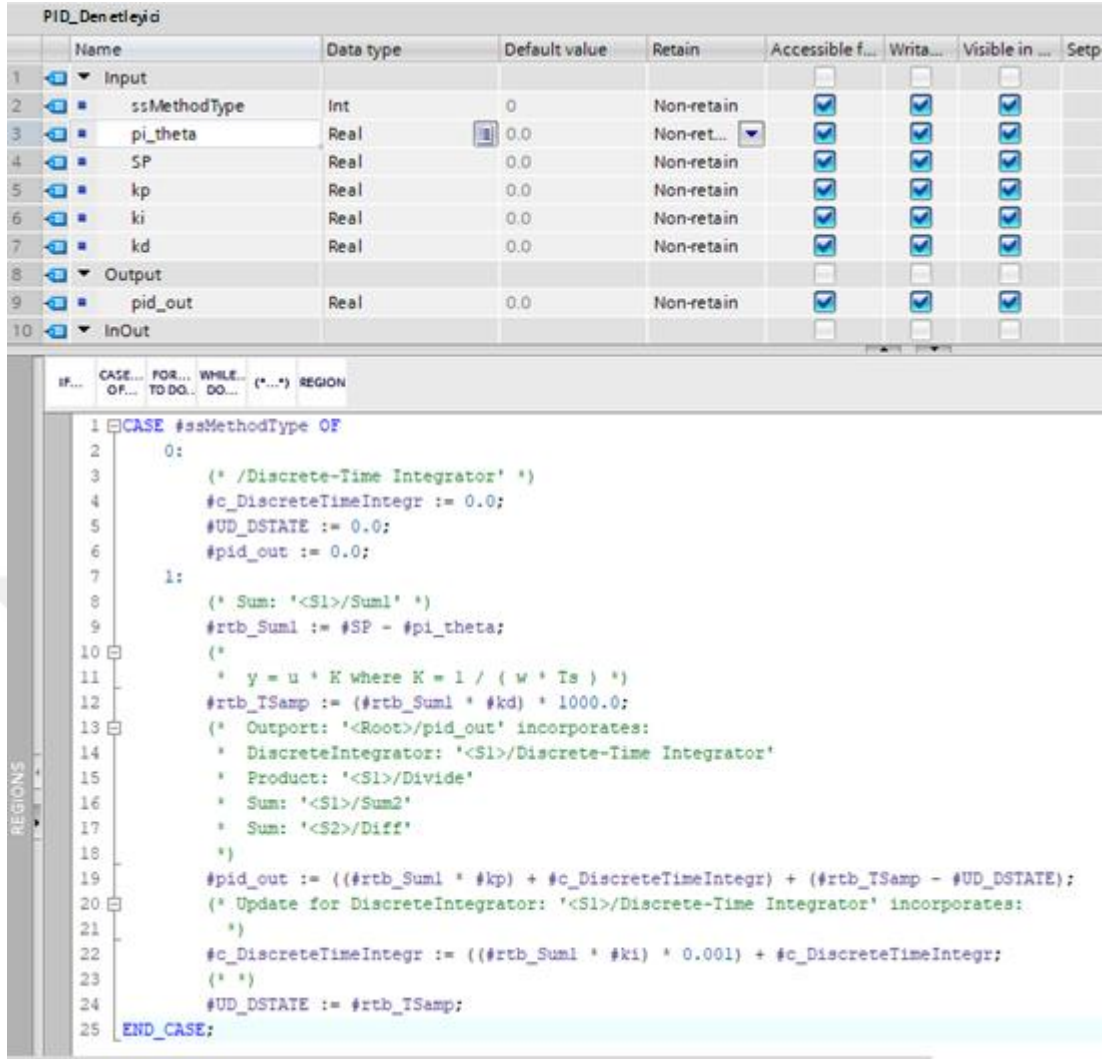


Şekil 5.2. PID denetleyici alt modeli

Simulink model çalışmalarında PID denetleyicilerin zaman alanı ayar bölümünde iki seçenek sunulmaktadır. Bunlardan biri sürekli zaman seçeneği diğeri ise ayrık zaman seçeneğidir. Modelin PLC koduna dönüştürülmesi ve kodun PLC içerisinde tarama döngüsüne dahil edilebilmesi için, sunulan özellik yalnızca ayrık zaman modunda kullanılabilir. Simulink içerisinde kod dönüştürme ayarları yapıldıktan sonra, PID denetleyici alt sistemi doğrudan PLC ile uyum sağlayacak SCL dilinde bir koda dönüştürülmüştür.

PLC’de oluşturulan programlar, fonksiyonlar ve fonksiyon blokları olarak adlandırılırlar. Fonksiyonlar FC (Function) ismiyle, fonksiyon blokları FB (Function Block) ismiyle anılır. FB’lerin FC’lerden farkı, fonksiyon içerisinde yazılacak kodun belirli giriş çıkış parametrelerinin doğrudan adreslerinin kendisi tarafından oluşturulabilmesidir. Simulinkten dönüştürülen PID kodu PLC’ye FB olarak aktarılacak, bloğun kendisinin oluşturduğu veri alanları programın geri kalanı tarafından ilgili giriş çıkış değişkenlerince kullanılacaktır.

Şekil 5.3’de SCL diline dönüştürülmüş olan, Simulink ortamında tasarlanan PID denetleyici bloğu verilmiştir.



Şekil 5.3. Dönüştürülen PID denetleyicinin PLC kodu

Şekil 5.3'de verilen SCL dilinde PLC kod parçacağı bir FB olarak programda çağırılmaktadır. Oluşturulan FB PID fonksiyonu, program içerisinde istenilen sayıda tekrarlanan yapılarda kullanılabilir. Bu çalışma içerisinde tek bir durum kontrolü sağlanmak istendiğinden şekilde gösterilen FB tek bir blok olarak program içerisinde çağırılmıştır.

PLC'de oluşturulan FB bloğunda, daha önce Simulink model gösteriminden aşına olunan değişken isimleri blok gösteriminin üstünde giriş çıkış parametreleri olarak sunulmaktadır. Burada blok kontrolünü değiştirecek olan kp, ki ve kd PID katsayıları giriş olarak oluşturulmuştur. Geri beslemeli kontrol sisteminin ihtiyaç duyduğu geri besleme elemanı, ters sarkaç sisteminde enkoderden alınacak açı bilgisi olduğundan bu da blok içerisinde değişken tanımlaması yapılırken pi_theta ismiyle

oluşturulmuştur. İngilizce set point kelimelerinin baş harflerini temsil eden SP isimli değişken ise sistemin çıkışında istenilen durum referansını temsil etmektedir. Son olarak blok içerisinde son giriş değişkeni olarak görülen ssMethodType isimli değişken blok için start-stop değişkeni olarak düşünülebilir. Eğer bu değişken sonucu program içerisinden sıfır girilirse blok herhangi bir sonuç döndürmeyecektir. Giriş değişkenlerinden sonra sistemin tek çıkışı olarak görülen pid_out değişkeni ise, kontrol bloğunun sisteme uygulayacağı mevcut sonuç değişkenidir.

Tablo 5.1’de PLC kodunda bulunan giriş çıkış değişkenlerinin açıklamasına yer verilmiştir.

Tablo 5.1. PLC fonksiyonunun değişkenleri

Değişken adı	Açıklama	Veri tipi
ssMethodType	Blok içi start stop değişkeni	Boolean
pi_theta	Denetleyici geri besleme değişkeni	Real
SP	Çıkışta görülmek istenen durum	Real
kp	Oransal katsayı	Real
ki	İntegral katsayısı	Real
kd	Türevsel katsayı	Real
pid_out	Denetleyici çıkışı	Real

Tablo 5.1’de ayrıntılı olarak verilen PLC kodu değişkenleri Simulink programı tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Dönüştürülen kod ise açık kaynak olarak sunulduğundan istenildiği takdirde üzerinde düzeltmeler ve değişiklikler yapılabilmektedir. Her ne kadar bu çalışmada ihtiyaca uygun olarak tek bir blok üzerinde durulmuş olsa da Simulink ortamının kontrol ve model çeşitliliği hemen her kontrol çalışmasını kapsadığından, kapsam ve çalışmalar istenilen doğrultuda geliştirilip çoğaltılabilir. Bu durum bir önceki bölümde anlatılmaya çalışılan, PLC’ye entegre edilebilecek PC tabanlı programların müdahale edilemeyen dezavantajını ortadan kaldıran en önemli konulardan birisidir. Bu sayede tasarımı Simulink ortamında esnekleştirilen kod blokları, PLC ortamında geliştirmeye açık olmaktadır.

5.2. PLC ile Ters Sarkaç Deney Setinin Kontrolü

PLC işlemcisi kesme kontrollü kod tarama özelliğine sahip bir kontrolördür. PLC içerisinde kesme bölümleri farklı OB (Operation Block) isimleriyle anılmaktadır. Bu

OB'ler farklı kurgulara açık yapıdadırlar. Örneğin PLC sisteminin yazılıma tanıtılan donanım modüllerinden birinde arıza meydana geldiğinde, sistem ilk enerjilendiğinde bir defaya mahsus olmak üzere, yılın ya da ayın ya da günün belirlenebilecek belli bir zamanında bir kere, düzenli olarak her birim zamanda veya tarama zamanının aşılması gibi hata durumlarında, anlatılan her durum için ayrı ayrı OB'ler birer kesme olarak belirlenebilir. Bu kesme blokları programın tümünü kapsamamakla birlikte, program sadece kesme bloklarından da meydana gelebilir. Bu tamamen uygulamaya ve kullanıcıya göre değişkenlik gösterebilir.

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, bu çalışmada kullanılan OB, belirlenen sabit zaman taramasına sahiptir. PLC içerisinde bir geri beslemeli sistem kontrolü tasarımı yapıldığında, kontrolörün kararlı bir davranış sergilemesi için bu elzem bir durumdur. Programın normal akışının yer aldığı operasyon blokları bir döngü içerisinde programın kısa bölümlerinin çalıştırılmasıyla 1 birim zamanda taramasını bitirirken, diğer bir döngüde daha uzun bir bölümü çalıştırıp 10 birim zaman tarama süresi performansı sunabilir. Bu kararsızlığı ortadan kaldırmak için hem bu çalışmada hem de PLC içerisinde yapılacak tüm geri beslemeli kontrol çalışmalarında sabit tarama süreli kesme bloklarıyla çalışılması daha sağlıklı bir yöntem olmaktadır.

Çalışmada, Simulink ortamında yapılan deneysel çalışmalarda belirlenen 1 milisaniyelik örnekleme zamanı PLC içerisinde de bir kesme bloğuyla oluşturulmuştur. Çalışma sonunda yapılacak model sistem ve gerçek sistem karşılaştırmasının sonuçlarının doğru analizi için deneysel çalışmalara uygunluk sağlayacak kabiliyetli bir PLC modeli seçilmiştir. Aksi durumda Simulink'te bulunan PID parametreleri, sistemin kontrolünde hatalı çıktılar verebilmektedir.

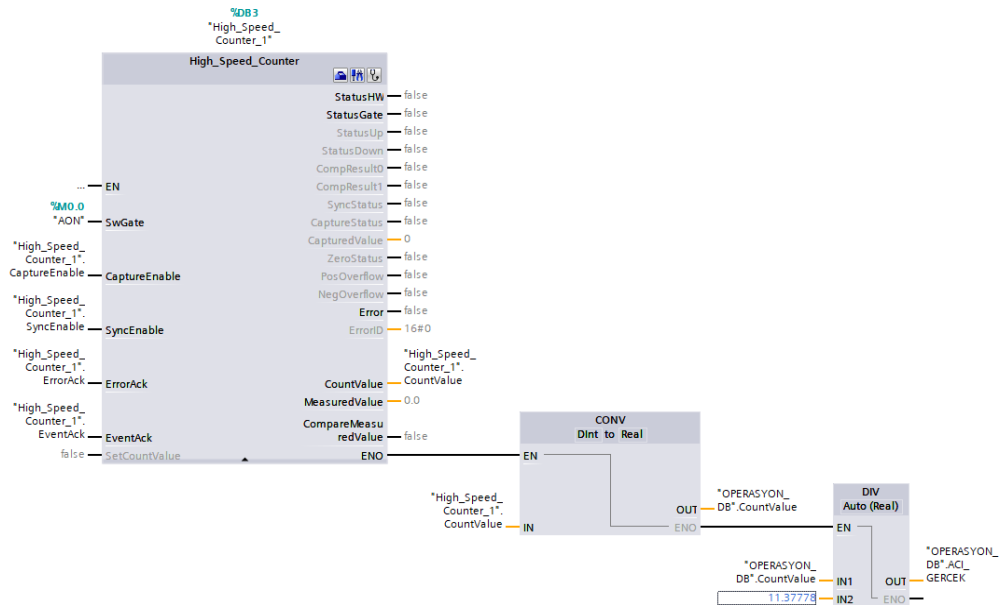
5.2.1. PID bloğunun PLC koduna entegrasyonu

Simulink ortamında PSO algoritmasıyla belirlenen PID katsayıları, PLC koduna çevrilen PID bloğuna aynı değerlerle girilmiştir. Daha önce model çalışmalarında model sistemi istenilen kararlılıkta kontrol ettiği gözlenen bu katsayılar $k_p=4,5$, $k_i=17$ ve $k_d=0,5$ olarak PSO algoritması ile belirlenmiştir.

PID bloğunun ihtiyaç duyduğu geri besleme elemanı olan sarkaç açısı enkoderden alınan ölçümlerle açı dönüşümü yapılarak sistem girişine ilave edilmiştir. Kullanılan

enkoder artırımsal enkoderdir. Artırımsal enkoderler başlangıç kabul edilen bir noktayı referans alarak, milin dönüş yönüne göre bir önceki değerinin üzerine toplayarak ya da çıkartarak sayısal bir değer iletmektedirler. Bu haliyle program içerisinde doğru kullanımı söz konusu olmamaktadır. Enkoder PLC içerisinde hazır sunulan bir blok konfigürasyonu yardımıyla, programa ileteceği sayısal değer her tam bir turunda sıfırlanacak şekilde düzenlenmiştir. Kullanılan enkoder 4096 pulse çözünürlüğünde olduğu için, sisteme gelen her bu sayıdaki değer sonrası sarkacın bir tam tur attığı kabul edilerek değer sıfırlanacaktır. Sarkacın dairesel olarak hareketi derece birimi olarak 360 derece olduğundan, enkoderden gelen her sayısal veriyi $4096/360=11,37778$ katsayısına bölerek, sarkacın o anki açı değeri derece cinsinden programa aktarılabilir. Aynı şekilde radyan hesabı için $4096/6,283185 = 651,898$ olarak dönüşüm katsayısı hesaplanabilmektedir.

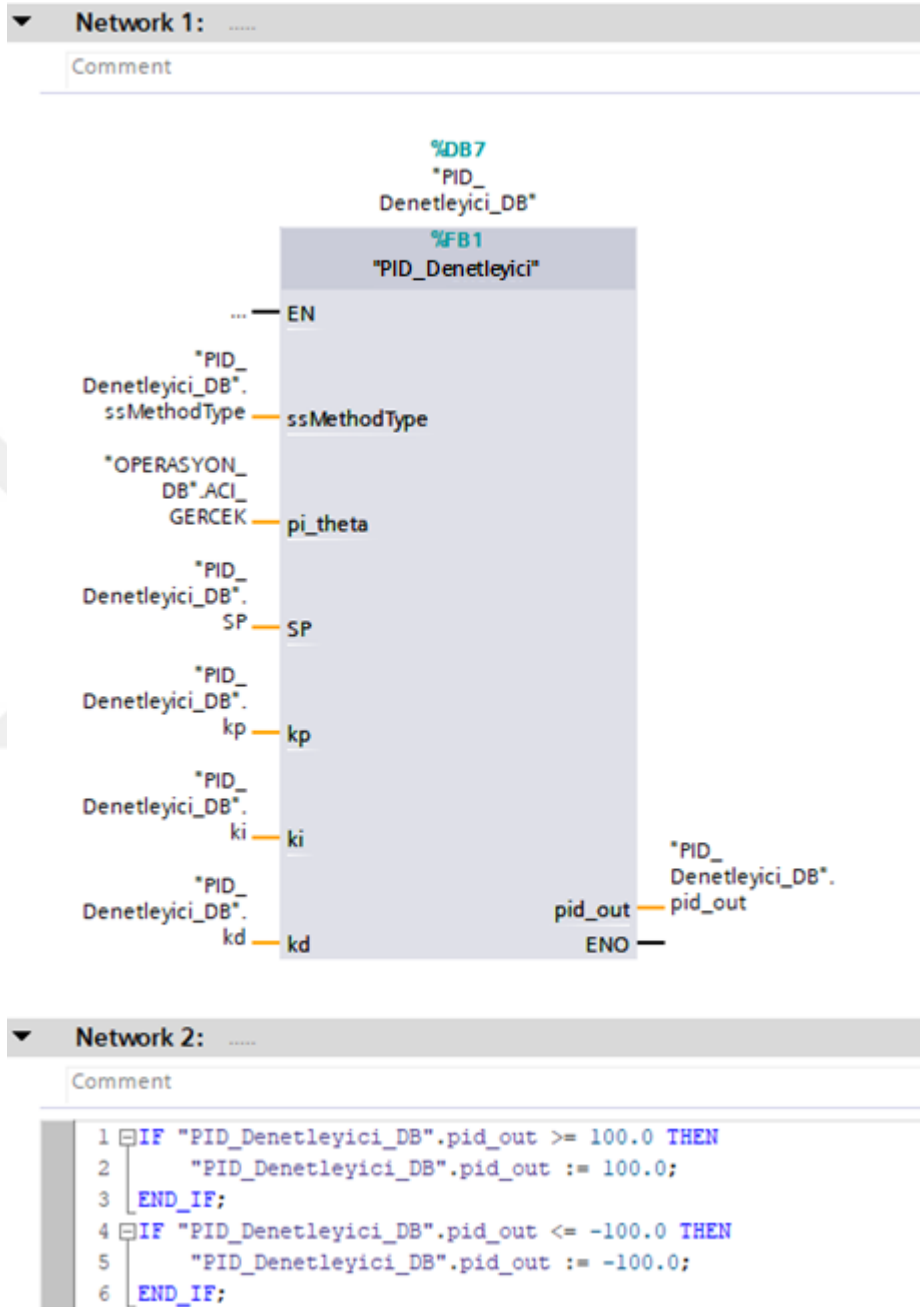
Yazılan PLC programından önce, ters sarkacın açı bilgisi alınmıştır. Enkoder değerini almak için Şekil 5.4'de verilen High_Speed_Counter fonsiyon bloğu çağırılmıştır.



Şekil 5.4. Enkoder bilgisinin PLC’de açı bilgisine dönüştürülmesi

Şekil 5.4’de gösterimi verilen enkoder okuma bloğu sayesinde PID denetleyici bloğu girişine ters sarkaç açı bilgisi entegrasyonu sağlanmıştır. Bu kod parçacığı denetleyici bloğundan bağımsız olarak işlemci içerisinde sunulan yüksek hızlı sayıcı kesmesi sayesinde 200 kHz frekansında okunmuştur.

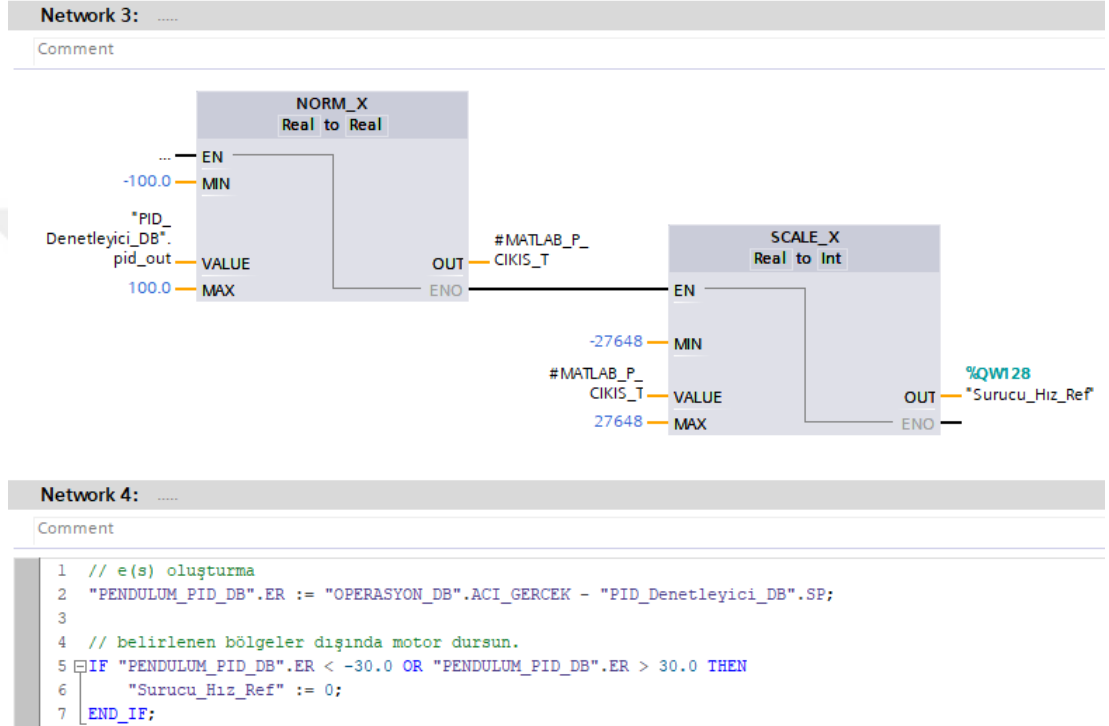
Daha önce Şekil 5.3’de verilen Simulink tarafından oluşturulmuş PID fonksiyon bloğu artık PLC programı içerisinde Şekil 5.5’de gösterildiği şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 5.5. PID bloğunun PLC programı içerisinde çağırılması

Şekil 5.5’de üst satırda çağırılan PID bloğu ve alt satırda bloğun üreteceği pid_out değişkeninin düzenlemeye tabi tutulduğu gösterilmiştir. PID denetleyici bloğu, ters sarkaç sisteminde meydana gelecek yüksek sapma bozulmalarında yüksek çıkış değerleri üretecektir. Bu çıkışın, servo sürücüyeye iletilecek referans sinyalinde

kararsızlık durumu oluşturmaması için normalize edilmesi gerekmektedir. Daha önce de anlatıldığı gibi servo sürücü, ters sarkaç sistemine tahrik verecek olan servo motoru kontrol edecektir. PLC tarafından servo sürücüyü iletilecek olan referans sinyali ± 10 VDC kullanılmıştır. Analog sinyalin minimum ve maksimum değerleri karşısında programın üreteceği sayısal veri yine minimum ve maksimum değerlerle sınırlandırılmıştır.



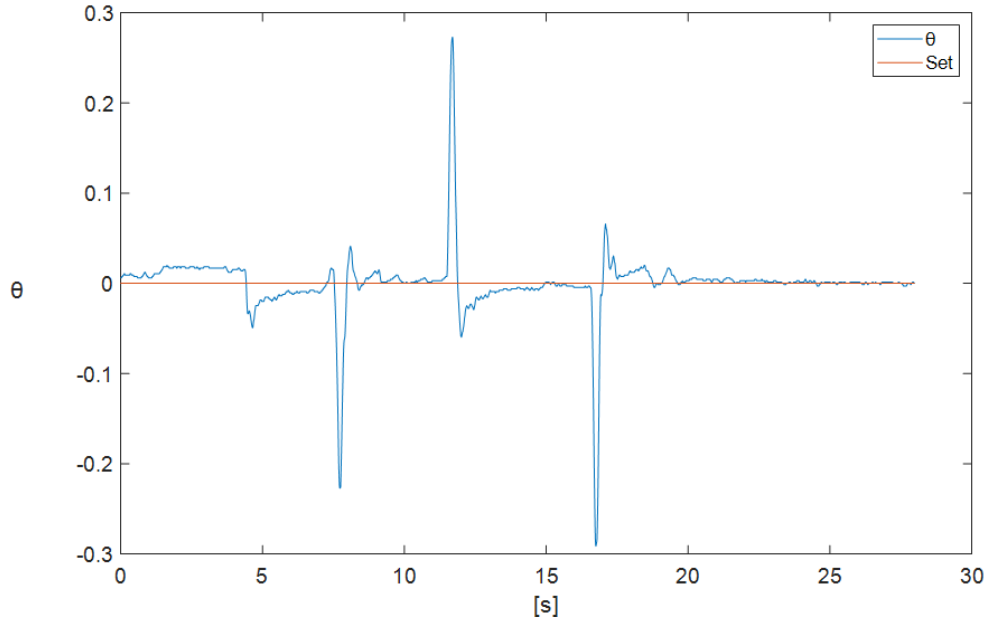
Şekil 5.6. PID blok çıkışının normalizasyonu

Şekil 5.6’da PLC programının son bölümü olan PID denetleyici çıkışının servo sürücüyü iletilecek analog sinyalinin ölçeklendirilmesi verilmiştir. -100 ve +100 değerleri arasında sınırlandırılmış olan PID denetleyici çıkışı, bir analog sinyalin PLC’nin ilgili modülünde oluşturulabilmesi için standart prosedürü olarak önce normalize sonrada ölçeklendirmeye tabi tutulmuştur. Şekil 5.6’da son satırda görülen kod parçacığı ise sarkaç açısında istenen durumdan ± 30 derece ($\approx 0,5$ radyan) sapma meydana gelirse motorun durdurulması için yazılımsal limit anahtarı olarak kullanılmıştır. Yüksek hızlarda hareket eden servo motor, sarkaç açısında meydana gelen, bu çalışma için büyük kabul edilen sapma karşısında sürekli olarak bir yönde yüksek hızla hareket etmeye çalışacak ve deney setinin sol ve sağ bağlantı aparatlarına çarpmalar meydana getirecektir. Her ne kadar sol ve sağ sınırlandırma

anahtarlarıyla servo sürücü donanımında bu emniyet alınmış olsa da PLC içerisinde yazılımsal olarak bu emniyetin alınması çalışmanın daha güvenli ilerlemesini sağlamıştır.

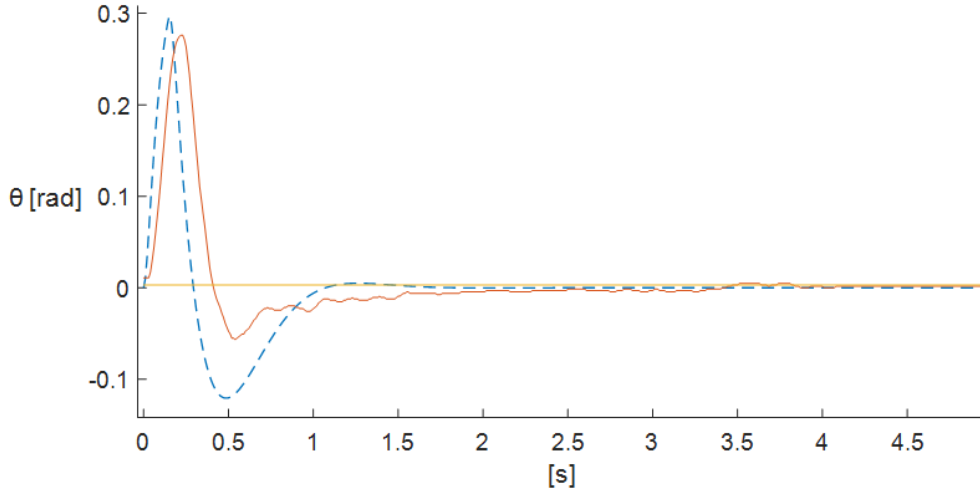
5.3. Deney Setinin PLC’de PID Denetleyici ile Çalıştırılması

PLC ile gerçek sistem üzerinde çalıştırılan kontrol neticisinde oluşan ters sarkaç açığı grafiği Şekil 5.7’de verilmiştir.



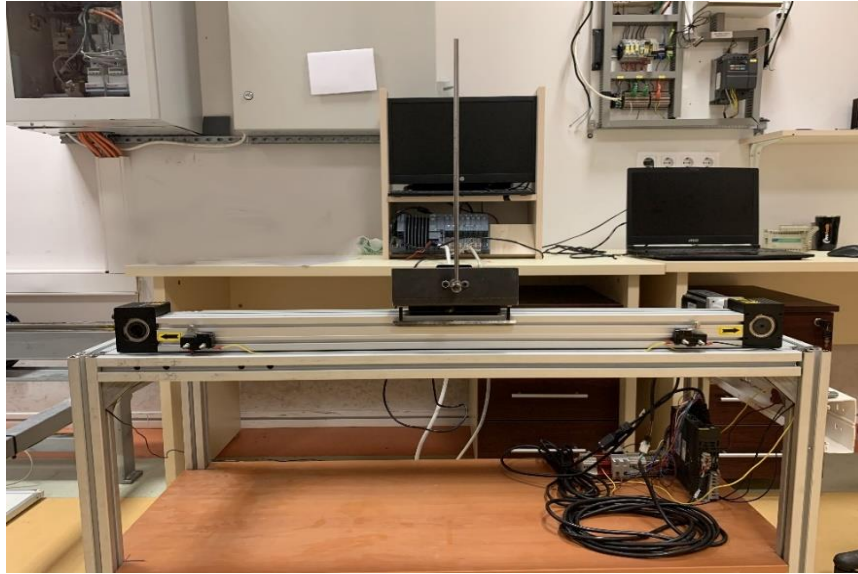
Şekil 5.7. PLC ile deney setinin kontrolü ve θ açısının değişimi

Simulink ortamında elde edilen veriler sonrasında, deney setine uygulanan kontrol sonucunda sarkaç açısının zamana bağlı değişimi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Grafikte de görüleceği üzere başlangıçta denge konumuna yakın olan ters sarkaç, 30 saniye içerisinde 7. saniyede, 12. saniyede ve 16. saniyede 3 defa bozucu etkiye maruz bırakılmış ve her seferinde 1 saniye altında tekrar denge konumuna döndüğü görülmüştür. Deney aşamasında tespit edilen Şekil 4.5 gösteriminde açıklanan çıktı sonucu, gerçek sistem tepkisinde beklenmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 5.7 grafiklerinden yola çıkarak, model sistem davranışı ve gerçek sistem davranışının benzerlik gösterdiği görülmüştür. Model sistem ve gerçek sistem birim basamak yanıtlarının benzerliği Şekil 5.8’de gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.8. Model sistem ve gerçek sistem birim basamak yanıtı

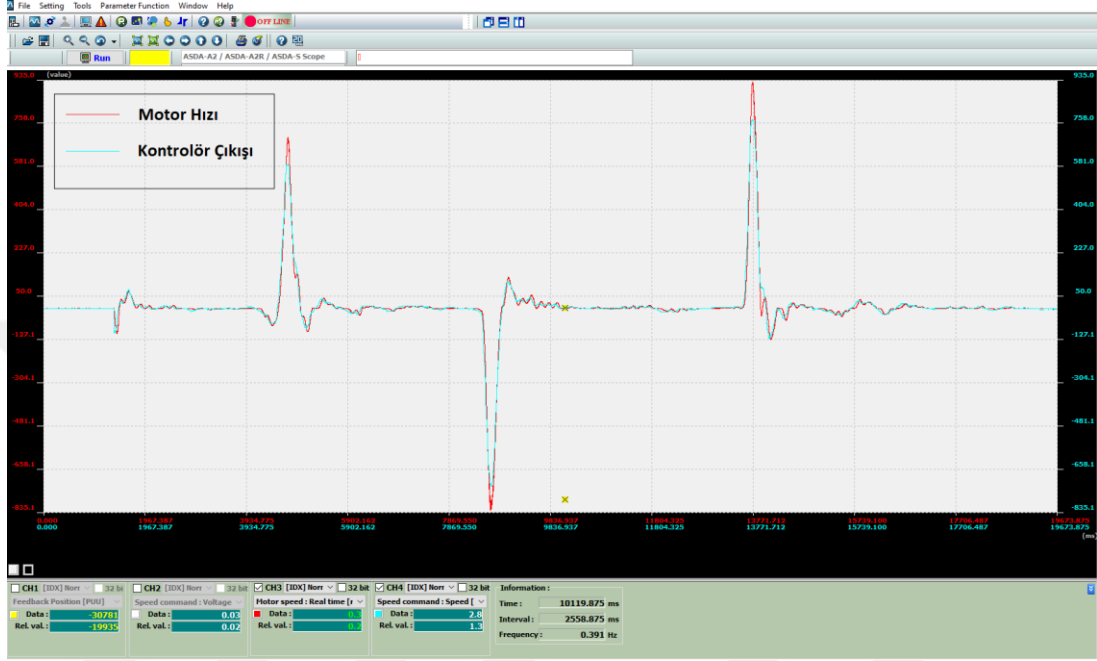
Şekil 5.8’de mor renk ile verilen grafik model sistemin, kırmızı renk ile verilen grafik ise gerçek sistemin birim basamak yanıtıdır. Gerçek sistemde meydana gelen 0,3 radyanlık bozulma sonrası PLC’nin sistemi tekrar denge konumuna getirmesini, model sistem üzerinde de simüle edebilmek için benzer bozucu etkiye bulunulmuştur. Sistem tepkilerinin üst üste koyularak çizdirildiği grafikte her iki sistem tepkisinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. PLC ile denge konumunda tutulan ters sarkaç deney seti

Şekil 5.10’da ise motor sürücüsünden toplanan aynı zaman dilimine ait, PLC tarafından sürücüye uygulanan analog referans sinyali ve buna karşılık sürücünün motora uyguladığı hız verisi verilmiştir. Şekil 5.7’de ters sarkaç açısı PID kontrol

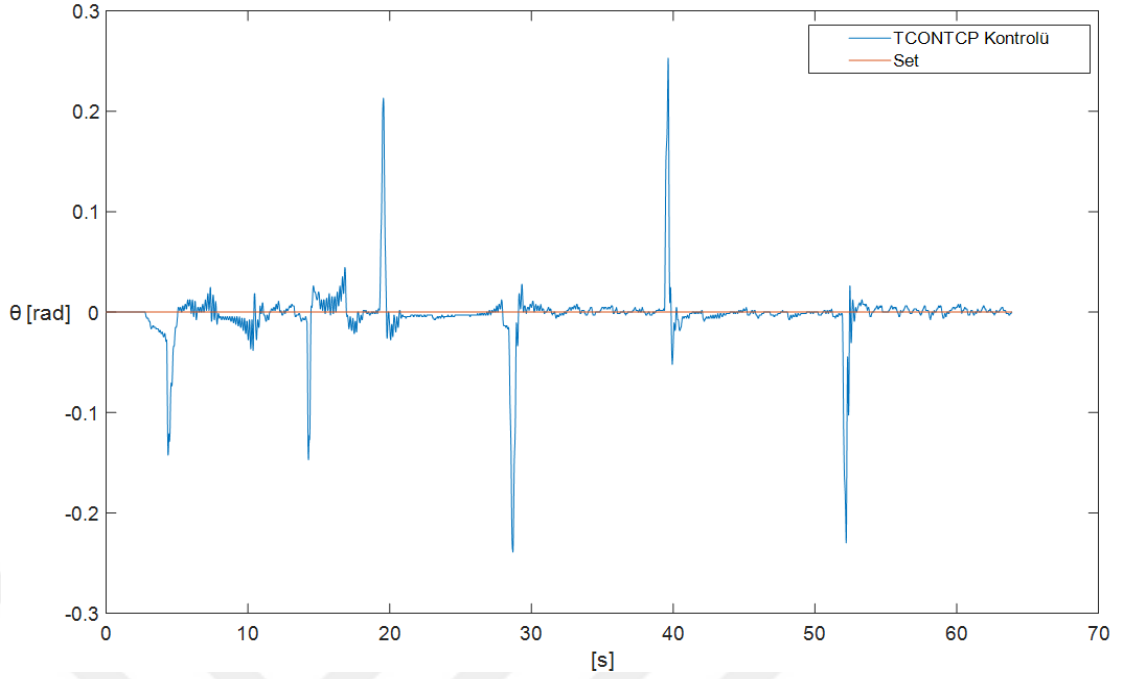
grafığı ile karşılaştırıldığında arabanın hızının, sarkaçta meydana gelen açı değişimine ters yönde oluştuğu görülmüştür. Kontrolör çıkışı belirli bir katsayı ile doğrultulup sürücüye referans olarak uygulandığından, sarkaç açığı ve araba hız grafiğinin benzer olduğu görülmüştür.



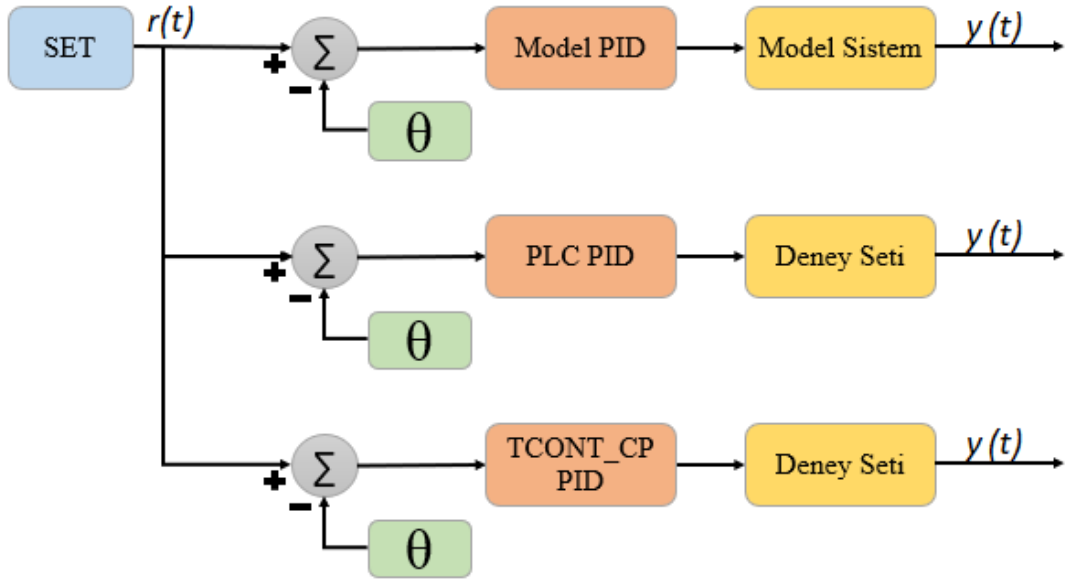
Şekil 5.10. Servo sürücüye uygulanan referans sinyali ve motora uygulanan hız verileri

5.4. PLC'de Bulunan PID Bloğunun Gerçek Sistemde Çalıştırılması

Bu çalışmalara ilave olarak Siemens PLC kütüphanesinde bulunan, Siemens tarafından kullanıcılara sunulan hazır PID fonksiyonu olan TCONT_CP isimli fonksiyon bloğu ile deney seti çalıştırılmıştır. Şekil 5.11'de verilen gerçek sistem verilerinden de görüleceği üzere, PID denetleyici sonucunun Simulink fonksiyon bloğu ile elde edilen sonuçlarla benzer olduğu deney sonucunda gözlemlenmiştir. Buradan hareketle hem model sistem üzerinde denenen model denetleyici, hem gerçek sistem üzerinde denenen PLC koduna çevrilmiş Simulink PID denetleyicisi hem de Siemens dahili bloğu olan TCONT_CP PID denetleyicinin tepkileri, sisteme uygun katsayı ve aynı örnekleme zamanlarıyla karşılaştırıldığında benzer kontroller sağladıkları görülmüştür. Bu çalışmada yapılan üç farklı deneysel çalışmanın blok gösterimi Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Gerçek sistemin Siemens hazır PID fonksiyonu olan TCONT_CP ile kontrolü



Şekil 5.12. Yapılan deneysel çalışmaların blok gösterimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, öncelikle ters sarkaç sisteminin Newton hareket yasalarından faydalanılarak matematiksel modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel model, üzerinde kontrol çalışmaları yürütmek adına Simulink ortamında modellenmiştir.

Ters sarkaç sisteminin matematiksel modeli oluşturulurken sistemin tüm dinamiklerinin fiziksel olarak ölçümü pek mümkün olmadığından, sistemde bulunan parametrelerden arabanın yol ile yaptığı sürtünme ve ters sarkacın atalet momenti, gerçek sistem verilerine benzetim çalışmaları yapılarak bulunmuştur. Benzetim çalışmalarında kullanılan parçacık sürü optimizasyonu algoritmasının, belirlenemeyen değişkenlerin hesaplanmasında oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

PSO sonucu belirlenen parametrelerle oluşan sistemin tüm dinamik modeli, Simulink ortamında PID denetleyici ile kontrol edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada amaçlanan doğrultuda, tasarlanan denetleyiciden, denge halinde bulunan ters sarkaç sisteminde meydana gelecek bozulmalarda, sistemi, maksimum 1 saniye içerisinde, maksimum 0,05 radyan hata payıyla tekrar denge noktasında kararlı bırakması beklenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda tasarlanan denetleyicinin sistem için uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Simulink ortamında tasarlanan PID denetleyici için, sistem kontrolünün kararlılığında elzem olan P, I ve D katsayıları PSO algoritmasından faydalanılarak bulunmuştur. Genel durum incelendiğinde PSO algoritmasının, belirlenen mevcut verilere benzetim çalışması yapılırken ve PID katsayıları hesaplanırken, denetleyicinin sistemi minimum zamanda minimum aşma ve minimum toleransla kontrol edebilmesinde sağladığı fayda tespit edilmiştir.

Model ortamda yürütülen ters sarkaç sistemi kontrol çalışmalarından sonra, tasarlanan kontrolör gerçek sistem üzerinde denenirken, endüstride hemen her

ortamda yaygın olarak bulunan PLC'ler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada Simulink programında oluşturulan model kontrolör, PLC ile uyum sağlayacak SCL koduna dönüştürülmüş ve mevcut PLC programı içine bir fonksiyon olarak dahil edilmiştir. Kontrolör tasarımında PSO algoritmasıyla tespit edilen PID katsayıları gerçek sistem denemesinde de kullanılmıştır. PLC'nin sistemi model sisteme benzer tepkilerle kontrol ettiği gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmanın amacı, endüstride PLC'ler ile modelleme kurgusu yapılamayacağından, zorlu bir mekanik sistemin matematiksel modelinin önceden bilgisayar tabanlı bir modelleme ortamında kurgulanması, ön kontrol çalışmalarının bu ortamda tamamlanması ve daha sonra PLC ortamına geçerek gerçek sistem üzerinde çalışılması olduğundan hem model sistem sonuçlarının hem de gerçek sistem sonuçlarının birbirlerine benzerliği beklenmiştir. Sistemin modelinin tüm dinamikleri oluşturulduğunda, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ölçümleri doğru yapıldığında ve model-gerçek ortam algortimalarının örnekleme zamanları aynı olduğunda, iki sistem verilerinin ve sistemlerin tepkilerinin benzer olacağı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma ile, PLC sistemlerinde kurgulanması çok güç olan mekanik model çalışmalarının, gerçek sistem kontrolü öncesinde Simulink ve benzeri programlarla modelleme çalışmalarının yürütülerek teorik kontrolün önemi ve benzetim çalışmalarının faydası amaçlanmıştır. Bu doğrultuda matematiksel ifadesi oluşturulabilen her sistem için, gerçek sistem kontrolü öncesinde, sisteme en uygun kontrolör tasarım çalışmaları Simulink ortamında sağlanabilir, oluşturulan kontrolör PLC programına dahil edilerek, otomasyon alanında zorlu mekanik sistemlere kontrol esnekliği kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Patra A.K., Mishra A.K., Nanda A., Subudhi D.K., Agrawal R., Patra A., Stabilizing and Trajectory Tracking of Inverted Pendulum Based on Fractional Order PID Control, Editors: Mohanty M., Das S., *Advances in Intelligent Computing and Communication*, 2nd ed., Springer, Singapore, 338-346, 2020.
- [2] Fauziyah M., Zakiyah A., Indrazno S., Denda D., Rendi P., Erni Y., Linear quadratic regulator and pole placement for stabilizing a cart inverted pendulum system, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, Online, 3 Ocak 2020.
- [3] Sharma A., Bhushan B., Comparison of Various Fuzzy Sliding Mode Based Controller on Single Link Inverted Pendulum, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, DOI: 10.3233/JIFS-189740.
- [4] Zangeneh-Madar M.R., Mazinan A.H., Control of the inverted pendulum system: a Smith fractional-order predictive model representation, *Sadhana*, DOI: 10.1007/s12046-020-01356-8.
- [5] Shao Y., Li J., Modeling and Switching Tracking Control for a Class of Cart-Pendulum Systems Driven by DC Motor, *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978269.
- [6] Magdy M., El-Marhomy A., Attia M. A., Modeling of inverted pendulum system with gravitational search algorithm optimized controller, *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, **10**(1), 129-149.
- [7] Shalaby R., El-Hossainy M., Abo-Zalam B., Fractional order modeling and control for under-actuated inverted pendulum, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2019, **74**, 97-121.
- [8] Yaren, T., & Kizir, S., LQR Kontrolcü Parametrelerinin Sistem Davranışına Etki Analizi: Çift Çubuklu Ters Sarkaç Sistemi, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020, **8**(1), 175-191.
- [9] Gürbüz Y., Terzioğlu R., Deniz A., Rezistif Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının MATLAB/SIMULINK'te Modellenmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2021, **1**(23), 173-180.
- [10] Topçu E., Bali E., DGM tekniği ile sürülen aç-kapa tipi solenoid yapılı elektro-pnömatik fren valfinin modellenmesi ve analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2021, **36**(3), 1417-1430.

- [11] Endiz M., Akkaya R., Matlab/Simulink ile Bipolar ve Unipolar PWM Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2021, **1**(24), 309-313.
- [12] Wei H., Wang J., Jian M., Mei S., Huang M., Steer-by-Wire Control System Based on Carsim and Simulink, *2021 IEEE International IOT Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, DOI: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422502.
- [13] Habib F.A., Mehtabali K.S., Athar K., Afwan A.M., Automatic Segregation and Supervision of Waste Material Using Industrial Control Devices, Editors: Goyal D., Chaturvedi P., Nagar A.K., Purohit S., *Proceedings of Second International Conference on Smart Energy and Communication. Algorithms for Intelligent Systems*, 1st ed., Springer, Singapore, 401-406, 2021.
- [14] Eirini A., Lowri W., Matilda R., Pete B., Adam W., Adversarial attacks on machine learning cybersecurity defences, *Industrial Control Systems Journal of Information Security and Applications*, DOI: 10.1016/j.jisa.2020.102717.
- [15] Seddari, N., Boukelkoul, S., Bouras, A., Belaoued, M., & Redjimi, M., A new transformation approach for complex systems modelling and simulation: application to industrial control system, *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2021, **16**(1), 34-48.
- [16] He X., Chen X., Application of PLC-Based Stroke Control in Industrial Production, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Kamakura City, Japan, 10-11 Ekim 2021.
- [17] Kayar A., Öztürk F., Ceyhan H., Increasing Productivity and Quality with IoT Technologies in Industrial Treatment Systems, *European Asian Middle Eastern North African Conference on Management & Information Systems*, DOI: 10.1007/978-3-030-77246-8_18.
- [18] Ali M., Miry A., Salman T., Implementation of Intelligent Industrial Controller Based On Fuzzy Logic and PLC, *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Science*, DOI: 10.30772/qjes.v13i1.626.
- [19] Tomar B., Kumar N., PLC and SCADA based Industrial Automated System, *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 6-8 Kasım 2020.
- [20] Sharma Y. C. R. T. J., Muneesa H. K., Design and Implementation of Industrial Scrap Segregation System using PLC, *International Journal for Scientific Research & Development*, Online, 2020.
- [21] Zhang, H. X., Design of Industrial Computer Control System in Grease Production, *Procedia Computer Science*, 2020, **166**(1), 376-380.
- [22] Fedullo T., Tramarin F., Vitturi S., The Impact of Rate Adaptation Algorithms on Wi-Fi-Based Factory Automation Systems, *Sensors*, DOI: 10.3390/s20185195.

- [23] De las Morenas J., Da Silva C., Funchal M., Melo G. S., Vallim V. M., Leitao P., Security Experiences in IoT based applications for Building and Factory Automation, *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Buenos Aires, Arjantin, 26-28 Şubat 2020.
- [24] Zucker G., Ferhatbegovic T., Bruckner D., Building automation for increased energy efficiency in buildings, *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, China, 28-31 Mayıs 2012.
- [25] Guo B., Zhuang Z., Pan J. S., Chu S. C., Optimal design and simulation for PID controller using Fractional-Order Fish Migration Optimization algorithm, *IEEE Access*, 2021, **9**(1), 8808-8819.
- [26] Noordin A., Basri M. A. M., Mohamed Z., Lazim I. M., Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for quadrotor UAV attitude and position stabilization, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, **46**(1), 963-981.
- [27] Yang B., Wang J., Wang J., Shu H., Li D., Zeng C., Yu T., Robust fractional-order PID control of supercapacitor energy storage systems for distribution network applications: A perturbation compensation based approach, *Journal of Cleaner Production*, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123362.
- [28] Acharya D., Das D. K., Swarm optimization approach to design PID controller for artificially ventilated human respiratory system, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105776.
- [29] Taşkıran Z. G. Ç., Sedef H., Anday F., A new PID controller circuit design using CFOAs, *Circuits Systems and Signal Processing*, 2021, **40**, 1166-1182.
- [30] Ekinci S., Hekimoğlu B., Izci D., Opposition based Henry gas solubility optimization as a novel algorithm for PID control of DC motor, *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2021, **24**(2), 331-342.
- [31] Wang F., Zhang H., Zhou A., A particle swarm optimization algorithm for mixed-variable optimization problems, *Swarm and Evolutionary Computation*, DOI: 10.1016/j.swevo.2020.100808.
- [32] Ramirez-Figueroa J. A., Martin B. C., Nieto-Librero A. B., Leiva V., Galindo-Villardón M. P., A new principal component analysis by particle swarm optimization with an environmental application for data science, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, DOI: 10.1007/s00477-020-01961-3.
- [33] Vadi S., Bayındır R., DA Motoru Kapalı Çevrim Hız Denetim Sistemindeki PI Parametrelerinin Genetik ve Parçacık Sürü Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, *Veri Bilimi*, 2019, **2**(1), 51-60.
- [34] Habib M. K., Ayankoso S. A., Modeling and Control of a Double Inverted Pendulum using LQR with Parameter Optimization through GA and PSO,

2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics, Krakov, Polonya, 9-11 Aralık 2020.

- [35] Bayrak G., Murr P. J., Ulewicz S., Vogel-Heuser B., Comparison of a transformed Matlab/Simulink model into the programming language CFC on different IEC 61131-3 PLC environments, *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Krakov, Polonya, 17-21 Eylül 2012.
- [36] Eke İ., Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına Dayalı PID Denetleyicisini Kullanan Termal Üniteli Mikro Şebeke Güç Sisteminde Frekans Kontrolü, *International Journal of Engineering Research and Development Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Özel Sayısı*, 2020, **12**(3), 11-23.
- [37] Zhao D., Liu L., Yu F., Heidari A. A., Wang M., Oliva D., Chen H., Ant colony optimization with horizontal and vertical crossover search: Fundamental visions for multi-threshold image segmentation, *Expert Systems with Applications*, DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114122.
- [38] Garip Z., Çimen M. E., Boz A. F., Comparative performance analysis on parameter extraction of solar cell models using meta-heuristic algorithms, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2021, **36**(2), 1133-1144.
- [39] Demirci U., Sezgisel Algoritmalar Kullanarak Derin Öğrenme Ağlarında Performans İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2021.
- [40] MIT University, Control Tutorials for MATLAB and Simulink, <https://lost-contact.mit.edu/afs/umich.edu/class/ctms/Public/html/simulink/examples/pend/pendsim.htm/> (Ziyaret tarihi: 1 Ocak 2021).



EKLER

Ek-A

Aşağıda kullanılan PSO algoritması ve geliştirilen algoritmanın değişkenleri ve MATLAB kodları verilmiştir;

w, c1, c2 = PSO için ağırlık ve hız çarpanları,

t_salinim=gerçek sistem verilerinin zaman eksenini,

start_time, samp_time, sim_time=başlangıç, örnekleme ve bitiş zamanları,

swarm_size, stpmax=kuş ve iterasyon sayısı,

model_name=açılacak Simulink modeli,

CF=Simulink'ten gelecek veriler kümesi,

Geliştirilen Algoritma

```
clc;clear all;close all;
```

```
tStart=tic;
```

```
w=0.8;
```

```
c1=2.0;
```

```
c2=2.0;
```

```
t_salinim=0:0.01:5000*0.01;
```

```
load salinim.mat
```

```
t_aci=(t_salinim)-0.05;
```

```
aci_salinim=((salinim/4096)*2*pi)+pi;
```

```
M=2.5;
```

```
m=0.23;
```

```
l=0.225;
```

```
g=9.80665;
```

```
% b=6;
```

```
% i=0.002;
```

```
b=4.8;
```

```
i=0.002;
```

```
c=0.000001;
```

```
%swarmmin=[ b i c ];
```

```

swarmmin=[2 0.001 1 ];
swarmmax=[8 0.01 1];
start_time=0;
samp_time=0.01;
sim_time=50;
model_name='v0_s';
swarm_size=200;% iterasyondaki kus sayisi
stpmax=20;% iterasyon sayisi
stp=1;
open(model_name);    % Open the Simulink Model
% pause(5.000);
    for ix=1:swarm_size
        swarm(ix,:)=swarmmin+(swarmmax-swarmmin).*rand(size(swarmmin));
    end
for ix=1:swarm_size
    V(ix,1:3,1)=0;
end
while(stp<=stpmax)
    % send to system values
    for sw=1:swarm_size
        fprintf(1,'-----The Optimal Parameters\n');
sira=sw
b=swarm(sw,1,stp)
i=swarm(sw,2,stp)
c=swarm(sw,3,stp)
        sim(model_name);    % simulate the system
        pause(0.002);
        % Calculating Cost Function-----
        t=start_time:samp_time:sim_time;
fark=aci_salinim-ans.CF;
fark_abs= sum(abs(fark));
err=fark_abs;
        CFSW(sw,stp)=err(end);
    end
end

```

```

end
% G, Calculating best Position found by swarm (Global Best)
[a,ind]=min(CFSW(:,:));
[ss,stps]=min(a);
G=swarm(ind(stps),:,stps);
% pbl(j), Calculating Best Position found by ith Particle(Personal Best)
for j=1:swarm_size
    [b,indx(j)]=min(CFSW(j,:));
end
for ix=1:swarm_size
    plb(ix,:)=swarm(ix,,:,indx(ix));
end
% Updating the Velocity and Position of all prticles
for ix=1:swarm_size
    V(ix,,:,stp+1)=w*(V(ix,,:,stp))+c1*rand*(plb(ix,,:)-swarm(ix,,:,stp))+c2*rand*(G-
swarm(ix,,:,stp));
end
for ix=1:swarm_size
    swarm(ix,,:,stp+1)=swarm(ix,,:,stp)+V(ix,,:,stp+1);
    swarm(ix,,:,stp+1)=min(swarmmax(1,,:,1),swarm(ix,,:,stp+1));
    swarm(ix,,:,stp+1)=max(swarmmin(1,,:,1),swarm(ix,,:,stp+1));
end
fprintf('Iteration: %d, Best Cost: %f \n',stp,a(stp));
stp=stp+1
end
tElapsed_PID = toc(tStart);
fprintf(1,'The Number Of The Best Particle is %d in swarm at %dth
step\n',ind(stps),stps)
fprintf(1,'The Best Cost so far is %f at %dth step\n',ss,stps);
fprintf(1,'The Optimal Parameters\n');
disp('b      i      c ')
disp(num2str([swarm(ind(stps),1,stps),
swarm(ind(stps),2,stps),swarm(ind(stps),3,stps)]));

```

```
save finaly1;
b=swarm(ind(stps),1,stps);
i=swarm(ind(stps),2,stps);
c=swarm(ind(stps),3,stps);
sim(model_name);
plot(t_aci,aci_salinim,'r','LineWidth',2);
hold on
plot(ans.tout,ans.CF,'-', 'LineWidth',2);
```



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Keleş M., Öztürk S., Modeling The Inverted Pendulum System And Control Of The Real System Through The Created Model Through Pid Controller Through Plc, 2. *International Göbeklitepe Scientific Studies and Innovation Congress*, Şanlıurfa, Türkiye, 20-21 Mart 2021.



ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Tuzla Behiye Dr. Nevhiz Işıl Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında mezun oldu. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde ters sarkaç sisteminin modellenmesi ve kontrolü konusunda çalışmaları bulunmaktadır.

