

**Bir Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi**

Gökhan Dındış

**DOKTORA TEZİ**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2007

Design And Implementation of An Inverted Pendulum System

Gökhan Dındış

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Electrical And Electronics Engineering

June 2007

Bir Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Gökhan Dındış

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Kontrol ve Kumanda Sistemleri Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Osman Parlaktuna

Haziran 2007

Gökhan Dındış' in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Bir Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Doç. Dr. Osman Parlaktuna

Üye : Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serdar Tunaboşlu

Üye : Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

Üye : Yrd. Doç. Dr. Rifat Edizkan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

## **Bir Ters Sarkaç Sistemi Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi**

**Gökhan Dındış**

### **ÖZET**

Bu çalışmada belirgin kalitede bir ters sarkaç sisteminin ticari bir ürün olarak üretime hazırlanması sunulmuştur. Piyasadaki benzer ürünler araştırılmış, rekabet edebilecek kriterlerde bir sistem mekanik ve elektronik olarak gerçekleştirilmiştir. Uygun yazılım üretilerek ters sarkaç sisteminin kontrolü sağlanmıştır.

Sistem bir kişisel bilgisayar, bir elektronik kontrol ünitesi, bir elektromekanik donanım ile gerekli güç ve haberleşme kablolarından oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, kişisel bilgisayarda kullanılmak üzere bir arayüzü programı da geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: sarkaç kontrolü, ters sarkaç, sayısal kontrol

## **Design And Implementation Of An Inverted Pendulum System**

**Gökhan Dındış**

### **SUMMARY**

In this study, an inverted pendulum system has been realized and engineered as a marketable product. First, reasonable products in the market have been analyzed for the price and the quality, then a competitive product has been designed and implemented mechanically and electronically. Also a suitable software library has been prepared to test the unit for the controllability.

System contains a personal computer, a control unit, an electromechanical hardware and all the cables needed for power and communication. In the development process, a graphical user interface program also prepared to be used on the personal computer of the system.

Keywords: pendulum, inverted pendulum, swing-up, digital control

## TEŞEKKÜR

Bütün tez alıőmalarım boyunca, beni yönlendiren, bana çalışma azmi ve morali veren danıőmanım Sayın Doç. Dr. Osman Parlaktuna'ya ve yardımcı danıőmanım Sayın Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu'na teőekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET .....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>xii</b>
<b>TABLolar DİZİNİ.....</b>	<b>xviii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>	<b>xix</b>
<b>BÖLÜM 1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM 2 MEKANİK DONANIM .....</b>	<b>5</b>
2.1 Hassas Ray Düzenegi .....	6
2.1.1 Hassas ray .....	6
2.1.2 Aluminyum taban .....	7
2.1.3 Motor montaj plakası .....	7
2.1.4 Serbest kasnak sağ-sol plakaları .....	8
2.1.5 Serbest kasnak mili burçları.....	9
2.1.6 Ray sonu destek parçası.....	9
2.1.7 Taban ayakları.....	10
2.1.8 Kanal montaj parçaları.....	10
2.1.9 Hassas ray düzenegi montajı.....	11
2.2 Araba Düzenegi .....	14
2.2.1 Rulman bloğu.....	14
2.2.2 Kayış bloğu .....	15
2.2.3 Yatay montaj bloğu.....	15
2.2.4 Dikey montaj bloğu .....	16
2.2.5 Araba düzenegi montajı.....	17
2.3 Sarkaç Düzenegi .....	18
2.3.1 Enkoder bloğu.....	18



## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3.2	Çubuk montaj silindiri ..... 19
2.3.3	Sarkaç çubuğu..... 19
2.3.4	Stabilizasyon kütlesi ..... 19
2.3.5	Sarkaç düzeneği montajı..... 20
2.4	Tahrik Motorlu Kayış – Kasnak Düzeneği ..... 21
2.4.1	Tahrik motoru ..... 21
2.4.2	Motor mil silindiri..... 21
2.4.3	Motor kasnak parçaları ( Sağ-Sol) ..... 22
2.4.4	Serbest kasnak parçaları ( A-B )..... 22
2.4.5	Serbest kasnak rulmanları..... 22
2.4.6	Serbest kasnak mili ..... 23
2.4.7	Serbest kasnak montajı ..... 23
2.4.8	Motor - kasnak montajı..... 23
2.4.9	Motor kayış düzeneği montajı ..... 24
<b>BÖLÜM 3</b>	<b>ELEKTRONİK DONANIM ..... 25</b>
3.1	Sayısal Sinyal İşlemcisi (DSP) Kartı ..... 26
3.1.1	5V Besleme girişi..... 27
3.1.2	Giriş / Çıkış genişleme konnektörü ..... 27
3.1.3	Seri haberleşme portu ..... 28
3.1.4	Enkoder portu ..... 28
3.1.5	Giriş / Çıkış portu ..... 29
3.1.6	LCD portu ( opsiyonel )..... 30
3.2	Tuş / Gösterge Kartı..... 31
3.2.1	Tuş/Gösterge kartı - DSP kartı bağlantısı..... 31
3.2.2	Tuş/Gösterge kartı - DSP kartı adresleri..... 31
3.3	DC-Servo Motor Sürücü Kartı..... 32
3.3.1	DSP bağlantısı..... 32

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3.2 Motor enkoder bağlantısı .....	33
3.3.3 Sürücü güç besleme girişi .....	34
3.3.4 Motor PWM kontrollü güç çıkışı .....	34
<b>BÖLÜM 4 MALİYET ANALİZLERİ .....</b>	<b>35</b>
4.1 Yurt Dışı Üretiminde Maliyet Analizleri .....	36
4.2 Yurt İçi Üretiminde Maliyet Analizleri .....	38
4.3 Üniversite İmkanları ile Maliyetler .....	40
<b>BÖLÜM 5 TERS SARKAÇ SİSTEMLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR. 42</b>	
5.1 Ters Sarkaç Konfigürasyonları .....	42
5.1.1 İki serbestlik dereceli konfigürasyon .....	43
5.1.2 İkiden fazla serbestlik dereceli konfigürasyonlar .....	43
5.2 Sarkaç Kontrol Sistemi .....	45
5.3 PC Geliştirme Ortamı .....	46
5.4 Kullanıcı Arayüzü .....	47
5.5 Kontrol Ünitesi Yazılımı .....	49
5.6 Kontrol Uygulamaları .....	51
5.6.1 Deney 1- Geri beslemesiz kontrol .....	53
5.6.2 Deney 2- Oransal (P) konum kontrolü .....	56
5.6.3 Deney 3- Oransal (P) konum kontrolü ile pist sınırı tayini .....	59
5.6.4 Deney 4- Oransal ve türevsel (PD) konum kontrolü .....	61
5.6.5 Deney 5- Oransal, integral ve türevsel (PID) konum kontrolü-1 .....	65
5.6.6 Deney 6- Oransal, integral ve türevsel (PID) konum kontrolü-2 .....	68
5.6.7 Deney 7- Sarkaç açısı için referans tesbiti .....	70
5.6.8 Deney 8- Çubuk aşağıda, minimum çubuk salınımı ile PD konum kontrolü .....	72
5.6.9 Deney 9- Serbest düşme .....	75

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.6.10 Deney 10- PD kontrol ile ters çubuk dengesi .....	77
5.6.11 Deney 11- PD kontrol ile çubuk dengesi ve araç konum kontrolü -1.....	79
5.6.12 Deney 12- PID kontrol ile çubuk dengesi ve araç konum kontrolü -2 ...	81
5.6.13 Deney 13- PID kontrol ile çubuk dengedeiken konum değiştirme.....	83
5.6.14 Deney 14- PD kontrol ile çubuk dikme deneyi.....	85
5.6.15 Deney 15- Belirli bir senaryo ile kontrol – “dik, dengede tut, götür” ...	87
 <b>BÖLÜM 6 SONUÇ .....</b>	 <b>89</b>
 <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	 <b>92</b>
 <b>EKLER .....</b>	 <b>94</b>
 <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	 <b>103</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Quanser firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç .....	2
1.2 EOS Mühendislik firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç.....	2
1.3 Googol firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç.....	3
1.4 Active Robots firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç.....	3
1.5 Educational Control Products firmasından ters sarkaç aksesuarı .....	4
2.1 Mekanik Donanım (kasnaklara kayış takılmamış hali) .....	5
2.2 Mekanik Donanım (kayış bağlandıktan sonra deney esnasında).....	5
2.3 Hassas ray düzeneği.....	6
2.4 Hassas ray .....	6
2.5 Hassas ray üzerindeki bilya kanalları .....	6
2.6 Alüminyum taban .....	7
2.7 Motor montaj plakası .....	7
2.8 Serbest kasnak sağ plaka.....	8
2.9 Serbest kasnak sol plaka .....	8
2.10 Serbest kasnak mili burcu .....	9
2.11 Ray sonu destek parçası.....	9
2.12 Taban ayağı.....	10
2.13 Tekli kanal montaj parçası .....	10
2.14 Çiftli kanal montaj parçası.....	10
2.15 Çiftli montaj parçası yerleşimi.....	11
2.16 Motor plakasının M5 vidalar ile sabitlenmesi .....	11
2.17 Serbest kasnak sağ-sol plakalarının ve burçların uygun vidalar ile montajı.....	11
2.18 Havşa kafalı M3 vidalar ile destek parçasının montajı.....	12
2.19 Hassas ray ayaklarının havşa kafalı M5 vidalar ile montajı. ....	12
2.20 Hassas rayın, alüminyum taban üzerine allen kafalı M3 vidalar ile sabitlenmesi. .....	13
2.21 Araba düzeneği .....	14
2.22 Rulman bloğu.....	14

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.23 Kayış bloğu .....	15
2.24 Yatay montaj bloğu.....	15
2.25 Dikey montaj bloğu .....	16
2.26 Araba düzeneği montajı.....	17
2.27 Sarkaç düzeneği .....	18
2.28 Enkoder bloğu.....	18
2.29 Çubuk montaj silindiri .....	19
2.30 Sarkaç çubuğu.....	19
2.31 Stabilizasyon kütlesi .....	20
2.32 Sarkaç düzeneği montajı.....	20
2.33 Tahrik motorlu kayış – kasnak Düzeneği .....	21
2.34 Tahrik motoru olarak kullanılan fırçalı DC servo motor .....	21
2.35 Motor mil silindiri.....	21
2.36 Motor kasnak sağ-sol parçaları .....	22
2.37 Serbest kasnak sağ sol parçaları.....	22
2.38 Serbest kasnak rulmanları .....	22
2.39 Serbest kasnak mili .....	23
2.40 Serbest kasnak montajı .....	23
2.41 Motor - kasnak montajı.....	23
2.42 Tahrik motor-kasnak düzeneği montajı.....	24
2.43 Serbest kasnak montajı .....	24
3.1 Elektronik kartlar kutulanmadan önce .....	25
3.2 DSP kartı ve bağlantıları.....	26
3.3 DSP kartı blok şeması.....	26
3.4 5V Besleme girişi konnektörü .....	27
3.5 Giriş / Çıkış genişleme portu konnektör bağlantıları.....	27
3.6 Seri haberleşme konnektörleri .....	28
3.7 Enkoder bağlantısı .....	29

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.8	Enkoder portunun kutu üzerindeki konnektöre bağlantısı..... 29
3.9	Giriş / Çıkış portu konnektör bağlantıları ..... 30
3.10	Tuş/Gösterge kartı ve bağlantısı ..... 31
3.11	Güç kontrol kartı ve bağlantıları ..... 32
3.12	Motor enkoder konnektör bağlantıları ..... 33
3.13	Sürücü güç besleme girişi konnektörü..... 34
3.14	Motor PWM kontrollü güç konnektörü ..... 34
5.1	Doğrusal hareketli ve iki serbestlik dereceli (tek eklemli) konfigürasyon ..... 43
5.2	Dairesel hareketli ve iki serbestlik dereceli (tek eklemli) konfigürasyon ..... 43
5.3	Dairesel çift eklemli ve doğrusal çift eklemli sarkaç konfigürasyonları ..... 44
5.4	Dairesel paralel çift eklemli ve doğrusal paralel çift eklemli sarkaç konfigürasyonları ..... 44
5.5	Düzlemsel tek eklemli sarkaç konfigürasyonları ( doğrusal-doğrusal, daireysel daireysel ve daireysel doğrusal )..... 44
5.6	Kontrol sistemi blok diagramı ..... 46
5.7	Kullanıcı arayüzü ..... 47
5.8	İnterrupt döngüsü akış diyagramı ..... 49
5.9	Ana program akış diyagramı..... 50
5.10	Araç konumu ve çubuk açısı tanımları ..... 51
5.11	Deney 1 - Deney 6 için deney düzeneği ..... 52
5.12	Deney 7 ve sonrası için deney düzeneği ..... 52
5.13	Deney 1, referans ( $Xr$ ) ve konum( $x$ ) grafikleri ..... 54
5.14	Deney 1, konum hatası $E_x(t)$ grafiği ..... 54
5.15	Deney 1, uygun ölçekle $E_x(t)$ grafiği ..... 55
5.16	Deney 1, aynı konumdan başlatılarak üç farklı testin $E_x(t)$ grafikleri ..... 55
5.17	Deney 1, üç farklı konumdan başlatılarak üçer farklı testin $E_x(t)$ grafikleri..... 55
5.18	Deney 2, $K_{pa} = 15$ için referans ( $Xr$ ) ve konum( $x$ ) grafikleri ..... 57

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.19 Deney 2, $K_{pa} = 15$ için $E_x(t)$ grafiği .....	57
5.20 5.20 Deney 2, $K_{pa} = 30$ ve $K_{pa} = 60$ için $E_x(t)$ grafikleri.....	58
5.21 Deney 2, $K_{pa} = 250$ için $E_x(t)$ grafiği.....	58
5.22 Deney 2, $K_{pa} = 500$ için $E_x(t)$ grafiği.....	58
5.23 Deney 3, Araç pist sonuna yakınken pist alt sınırı tayini. ....	60
5.24 Deney 3, Araç pist ortasına yakınken pist alt sınırı tayini .....	60
5.25 Deney 3, Araç pist başına yakınken pist alt sınırı tayini .....	60
5.26 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $X_r$ , $X$ grafikleri ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 0$ ) .....	62
5.27 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 0$ ) . .....	63
5.28 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 400$ ) . .....	63
5.29 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği, ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 500$ ) . .....	63
5.30 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 600$ ) . .....	64
5.31 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 700$ ) . .....	64
5.32 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 620$ ) . .....	64
5.33 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa} = 200$ , $K_{da} = 460$ , $K_{ia} = 30$ ) . .....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.34 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200, K_{da}=360, K_{ia}=30$ ) .....	66
5.35 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200,$ $K_{da}=560, K_{ia}=30$ ).....	67
5.36 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200,$ $K_{da}=460, K_{ia}=25$ ). .....	67
5.37 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200,$ $K_{da}=460, K_{ia}=35$ ).	
5.38 Deney 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $X_r$ ve $X$ grafikleri ( $K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30$ ) .....	69
5.39 Deney 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30$ ). .....	69
5.40 Deney 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü tekrarı, $E_x(t)$ grafiği ( $K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30$ ) .....	69
5.41 Hatalı çubuk açısı ile başlangıç ve referansın başarı ile tesbiti .....	71
5.42 Doğru çubuk açısı ile başlanarak deneyin tekrarı .....	71
5.43 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=0, K_{pa}=50, K_{da}=750$ ).....	73
5.44 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=0, K_{pa}=250, K_{da}=750$ ).....	73
5.45 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=200, K_{pa}=50, K_{da}=750$ ).....	74
5.46 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=500, K_{pa}=50, K_{da}=750$ ).....	74
5.47 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=1000, K_{ds}=500, K_{pa}=50, K_{da}=750$ ).....	74
5.48 Deney 9, araç serbestken çubuk serbest düşme testi .....	76
5.49 Deney 9, araç elle sabitlenmiş durumdayken çubuk serbest düşme testi .....	76
5.50 Deney 9, araç kontroldeyken çubuk serbest düşme testi .....	76
5.51 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=1500, K_{ds}=6000, K_{pa}=0, K_{da}=0$ ).....	78



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.52 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=3000, K_{pa}=0, K_{da}=0$ ).....	78
5.53 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=6000, K_{pa}=0, K_{da}=0$ ).....	78
5.54 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=30, K_{da}=850$ ) .....	80
5.55 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500$ ) .....	80
5.56 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500, K_{ia}=2$ ).....	82
5.57 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500, K_{ia}=4$ ).....	82
5.58 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeleyen konum değiştirme ( $K_{ps}=3000,$ $K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=500$ ) .....	84
5.59 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeleyen konum değiştirme ( $K_{ps}=3000,$ $K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=600$ ) .....	84
5.60 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeleyen konum değiştirme ( $K_{ps}=3000,$ $K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=600$ ve $800$ ).....	84
5.61 Deney 14, sert geçişli dikme deneyi ( $K_{ps}=200, K_{ds}=50, K_{pa}=150, K_{da}=125$ )	86
5.62 Deney 14, yumuşak geçişli dikme deneyi ( $K_{ps}=200, K_{ds}=50, K_{pa}=150,$ $K_{da}=125$ ) .....	86
5.63 Deney 15, ilk deneme “dik, dengede tut, götür” $x(t)$ ve $x_r(t)$ grafikleri.....	82
5.64 Deney 15, ilk deneme “dik, dengede tut, götür” $E_x(t)$ ve $\theta(t)$ grafikleri.....	82
5.65 Deney 15, ikinci deneme “dik, dengede tut, götür” $E_x(t)$ ve $\theta(t)$ grafikleri ...	82
6.1 Çubuk dengedeleyen.....	91

## TABLOLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1 Hassas ray düzeneği parça listesi.....	13
2.2 Araba düzeneği parça listesi .....	17
2.3 Sarkaç düzeneği parça listesi .....	20
2.4 Tahrik motorlu kayış – kasnak düzeneği parça listesi .....	24
3.1 Giriş / Çıkış genişleme portu konnektörü sinyalleri .....	27
3.2 Seri haberleşme portu sinyalleri .....	28
3.3 Enkoder portu sinyalleri.....	29
3.4 Giriş / Çıkış portu sinyalleri.....	30
3.5 Tuş/gösterge kartı giriş / çıkış portları .....	31
3.6 Güç kontrol kartı giriş / çıkış portları .....	33
4.1 Yurt dışı üretiminde mühendislik AR-GE maliyet tahminleri.....	37
4.2 Yurt dışı üretiminde 2 yıllık dolaylı maliyet tahminleri.....	37
4.3 Yurt dışı üretiminde ortalama finansal maliyet tahminleri.....	37
4.4 Yurt dışı üretiminde malzeme maliyet tahminleri .....	37
4.5 Yurt dışı üretiminde ürün başına genel maliyet tahminleri .....	38
4.6 Yurt içi üretiminde mühendislik AR-GE maliyet tahminleri .....	39
4.7 Yurt içi üretiminde 2 yıllık dolaylı maliyet tahminleri.....	39
4.8 Yurt içi üretiminde ortalama finansal maliyet tahminleri.....	39
4.9 Yurt içi üretiminde malzeme maliyet tahminleri.....	39
4.10 Yurt içi üretiminde ürün başına genel maliyet tahminleri .....	40
4.11 Kendi imkanlarımızdaki üretimde malzeme maliyetleri .....	41
4.12 Üniversitenin üretmesi ile oluşacak maliyet tahminleri .....	41

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Acıklama</u></b>
$cm$	santimetre
$E_{\theta}(t)$	zamana bağlı çubuk açısı hatası fonksiyonu, radyan
$E'_{\theta}(t)$	zamana bağlı çubuk açısı hata değişimi (türevi) fonksiyonu, radyan/s
$E_x(t)$	zamana bağlı araç konum hatası fonksiyonu, cm
$E'_x(t)$	zamana bağlı araç konumu hatası fonksiyonu türevi, cm/s
$K_{da}$	araç oransal kontrol katsayısı
$K_{ds}$	çubuk türevsel kontrol katsayısı
$K_{ia}$	araç integral kontrol katsayısı
$K_{pa}$	araç oransal kontrol katsayısı
$K_{ps}$	çubuk oransal kontrol katsayısı
$s, sn$	saniye
$t$	zaman, saniye
$u(t)$	zamana bağlı motora uygulanacak güç çıktısı fonksiyonu
$\theta$	çubuk açısı, çubuk açı hatası, radyan
$\theta(t)$	zamana bağlı çubuk açısı fonksiyonu, radyan, radyan
$\theta'(t)$	zamana bağlı çubuk açısı fonksiyonu türevi, radyan/sn
$x$	araç konumu, cm
$x_r$	araç konumu referansı, cm

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Acıklama</u></b>
araç	sarkacın üzerine monte edilmiş olduğu araba
AR-GE	Araştırma Geliştirme
CD	Compact Disk
çubuk	ters sarkaç, ters sarkaç çubuğu
DAC	(Digital to Analog Converter), sayısalan analoğa dönüştürücü

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Acıklama</u></b>
DC	(Direct Current), Doğru akım
DSP	(Digital Signal Processor), sayısal sinyal işlemcisi
DSUB9	(D-type Sub-miniature 9 pin), 9 kontaklı standart bir konnektör tipi
index çıkışı	Enkoder bloğundan gelen referans açısı sinyali
LCD	(Liquid Crystal Display), sıvı kristal ekran
M3 vida	metrik standartlara göre 3mm çapında kılavuz çekilmiş vida
M4 vida	metrik standartlara göre 4mm çapında kılavuz çekilmiş vida
M5 vida	metrik standartlara göre 5mm çapında kılavuz çekilmiş vida
P	(Proportional), oransal
PC	(Personal Computer), kişisel bilgisayar
PD	(Proportional-Derivative), oransal ve türevsel
PID	(Proportional-Integral-Derivative), oransal, integral ve türevsel
PWM	(Pulse Width Modulator) , darbe genişliği modülasyonu
PVC	Polyvynil Chloride, sert bir plastik malzeme
rack and pinion	dogrusal ve dairesel dişli düzeneği
sarkaç	ters sarkaç
swing	sarkaç çubuğunun salınımı
USD	( United States Dollars), Amerika Birleşik Devletleri Doları

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Bu tezde bir ters sarkacın mekanik ve elektronik gerçekleştirilmesi; uygun yazılım üretilerek kontrolünün mümkün hale gelmesi sunulmaktadır. Elde edilen sistemin kalitesi, çalıştırılması sonucu elde edilen verilerle desteklenmektedir. Sistemin çalışması ile ilgili video kayıtları tez ekinde yer almaktadır.

Bu çalışmanın ana motivasyonu ticari olarak temin edilebilen ürünlerle prototip olarak üretilen ürünler arasındaki yüksek maliyet farkıdır. Bu bağlamda; kaliteli elektromekanik donanıma sahip sarkaç ürünleri 5000 Amerikan Doları civarında bir fiyattan başlamakta olup aksesuarlara göre fiyat 12000 lere yükselmektedir. Genelde, doğrusal hareket yapma yeteneği ile ilgili mekanik maliyetlerinden dolayı doğrusal sarkaçlar dairesel sarkaçlara göre biraz daha yüksek fiyattadırlar. Ayrıca eklem sayıları arttıkça mekanik ve elektronik maliyet arttığından her iki türün fiyatlarının yükselmesi de normal karşılanmalıdır. Aslında benzer kalitedeki ve kapasitedeki ürünler firmadan firmaya birkaç bin dolar farklılık gösterse de yazılım destekleri, yapılan çalışmaların kolaylıkları, eğitim destekleri gibi faktörler fiyatları birbirine yaklaştırmaktadır.

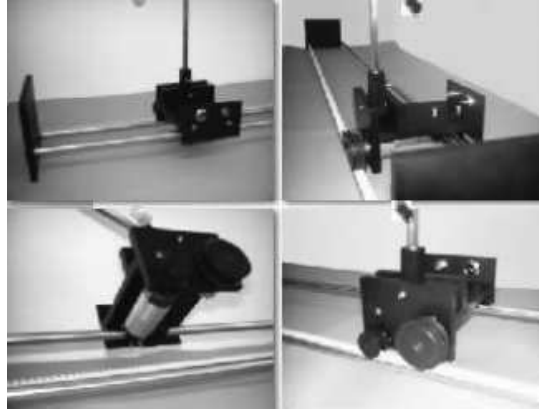
Araştırmalarımızda belirgin kalitede ters sarkacı (sarkaç) , ticari bir ürün olarak pazara sunan 5 firma tesbit edilmiştir. Aşağıda bu ürünler değerlendirilmektedir.

Quanser firmasının [17] hem doğrusal hem de dairesel sarkaç ürünleri mevcuttur [[www.quanser.com](http://www.quanser.com) ]. Bu firmanın Standart doğrusal sarkaçları 1.02m uzunluğunda olup 81 cm hareket edebileceği bir piste sahiptir. Potansiyometre ve encoder geri beslemesi kullanan modelleri mevcuttur. Doğrusal ve dairesel dişli (rack and pinion) düzeneği yoluyla hareket alarak doğrusal bir silindir boyunca hareket etmektedir (Şekil 1.1). Piyasadakilerin içinde fiyat performans bakımından en iyi bir örneklerden biri olarak kabul edilebilir. İlgili web sayfaları Ek 1 de verilmiştir.



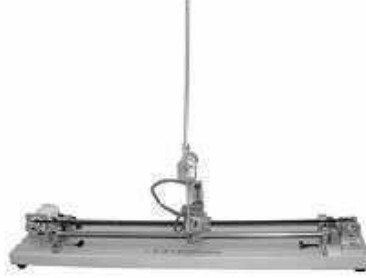
Şekil 1.1 Quanser firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç

EOS Mühendislik firmasının [8] ürünü olan EOSMEC ters sarkacı 1.30 m uzunluğunda olup 1.20 m hareket edebileceği bir piste sahiptir [[www.eosmuhendislik.com.tr](http://www.eosmuhendislik.com.tr)]. Araba pozisyonu ve sarkac açısı birer potansiyometre üzerinden ölçülmektedir. Motor kontrolü geri beslemesinde ayrıca bir enkoder kullanılmıştır (Şekil 1.2). Özellikleri incelendiğinde dikme (swing) kontrolü yapılamaması bir dezavantaj sayılabilir. Anahtar teslimi tek eklemlili bir paket 8000 doları bulmaktadır. İlgili web sayfaları Ek 1 de verilmiştir.



Şekil 1.2 EOS Mühendislik firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç

Googol Technology Ltd. [11] bir Honk Kong firması olup benzer bir doğrusal sarkaç ürününe sahiptir [[www.googoltech.com](http://www.googoltech.com)]. Bu sistem 1.00 m uzunluğunda olup 72 cm hareket edebileceği bir piste sahiptir (Şekil 1.3). Firmanın 4 eklemliliye kadar çalışmaları mevcuttur. Ayrıca düzlemsel sarkaç ürünleri de ilgi çekicidir. İlgili web sayfaları Ek 1 de verilmiştir.



Şekil 1.3 Googol firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç

Active Robots firması [2] dairesel bir ters sarkacı 5000 Amerikan Doları gibi uygun bir fiyatla pazarlamaktadır [[www.wwwactive-robots.com](http://www.wwwactive-robots.com)]. Masa üzerine monte edilebilen sistemde doğrusal sarkaçlarda kullanılanlara göre daha güçlü bir servo motor bulunmaktadır. Sarkaç çubuğu bir enkoder miline monte edilmiştir (Şekil 1.4). Bu örnek tezdeki çalışmamızdaki gibi doğrusal bir model olmasa da fiyatlar açısından fikir sahibi olmak açısından önem taşır. İlgili web sayfaları Ek 1 de verilmiştir.



Şekil 1.4 Active Robots firmasının ürettiği doğrusal ters sarkaç

Bu anahtar teslimi ürünler dışında profesyonel anlamda ters sarkaç yapabilmek için gerekebilecek aksesuarları satan firmalar da mevcuttur. Educational Control Products firması [7] bunlardan biridir [[www.ecpsystems.com](http://www.ecpsystems.com)]. Genel amaçlı bir ters sarkaç mekaniği (Şekil 1.5), kontrol kartı ve elektroniği, uygulama yazılımları vs ayrı ayrı satın alınarak extra basit birkaç ilaveyle doğrusal bir sarkaç biraraya getirilebilir. Bu durumda da maliyetlerin düşmediği gözlenecektir. İlgili web sayfaları Ek 1 de verilmiştir.



Şekil 1.5 Educational Control Products firmasından ters sarkaç aksesuarı

Bu 5 firmanın ters sarkaç ürünleri için talep ettikleri fiyat ortalama 6000 Amerikan Doları olarak tesbit edilmiştir. Bu rakam beklentilerimizi doğrulayıcı tarzda yüksek bir rakamdır.

Bu tezde ortaya çıkardığımız ürün doğrusal bir ters sarkaç sistemi olup, dayanıklı ve hassas bir mekaniğe sahiptir. 1 metre uzunluğa sahip olan mekanik kısım 76 cm'lik bir hareket serbestliği sağlar. Hareket, boşluğu olmayan doğrusal rulmanlı hassas bir ray üzerinde yapılmakta olup çubuğun monte edildiği eklem mili de yine rulman yataklarda dönmektedir. Araba (araç) ve sarkaç çubuğu (çubuk) pozisyonları yüksek hassasiyetli enkoderlerden okunmaktadır. Kontrol sisteminde kullanılan elektronik kartlar daha önce başka projelerimizde de kullanılmış düşük maliyetli ve tecrübe edinilmiş kartlardır. Dolayısıyla sistemi biraraya getirme mühendislik maliyeti en az düzeyde tutulmuştur. Toplamda ise sistemin maliyeti yurtdışından temin edilenlere göre % 70 daha düşük olmuştur. Elektronik kartlar hakkında detaylı bilgi Robotel firmasından [18] temin edilebilir. Sistemin maliyet analizi Bölüm 4 te ayrıntılı olarak verilmektedir.

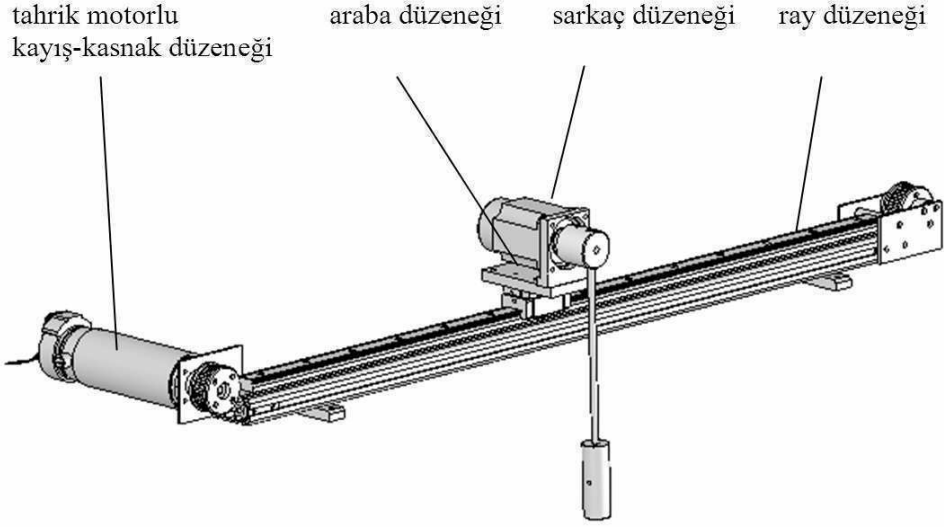
Bu tezin 2. bölümünde mekanik tasarım, 3. bölümünde elektronik tasarım, 4. bölümünde maliyet analizi ve 5. bölümde de çeşitli deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Sistemin çalışmasına ait video kayıtları tez ekinde yer almaktadır.



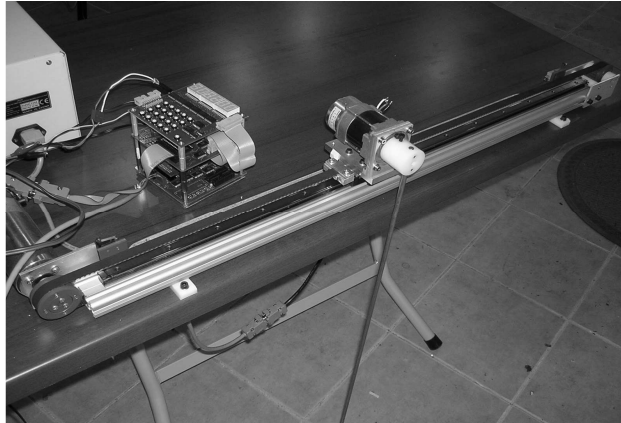
## BÖLÜM 2

### MEKANİK DONANIM

Mekanik donanım; hassas bir ray düzeneği, ray düzeneği üzerinde minimal sürtünme ile kayabilen bir araba düzeneği, araba düzeneğine monte edilmiş bir sarkaç düzeneği ve tahrik motorlu bir kayış-kasnak düzeneğinden oluşturulmuştur. Şekil 2.1 mekanik donanımı kasnaklara kayış takılmamış halde, Şekil 2.2 ise kayış takılmış halde çalışma esnasında göstermektedir. Takip eden alt bölümlerde hassas ray düzeneği, araba düzeneği sarkaç düzeneği ve kayış-kasnak düzeneği sunulmaktadır.



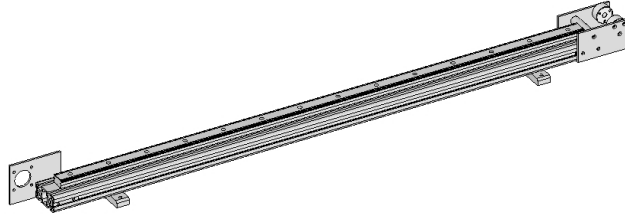
Şekil-2.1 Mekanik Donanım (kasnaklara kayış takılmamış hali)



Şekil-2.2 Mekanik Donanım (kayış bağlandıktan sonra deney esnasında)

## 2.1 Hassas Ray Düzeneği

Düzenek 82cm'lik hassas bir ray, alüminyum taban, motor montaj plakası, serbest kasnak sağ-sol plakaları, ray sonu destek parçası, serbest kasnak mili sağ-sol yatakları, montaj ayakları, kanal montaj parçaları ve diğer standart vida ve pullardan oluşmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil-2.3 Hassas ray düzeneği

### 2.1.1 Hassas ray

Araba ve sarkaç düzeneğinin düzgün ve minimal bir sürtünme ile hareketini sağlamak amacı ile THK firmasının 820mm'lik bir hassas rayı kullanılmıştır (Şekil 2.4). Ray üzerindeki kanallar devri-daim yapan bilyalar üzerinde hareket eden bir blok içindir (Şekil 2.5). Bu blok sarkaç düzeneği kısmında anlatılacaktır. Rayın alüminyum tabana montajı için 6cm aralıklarla sıralanmış 14 adet montaj deliği bulunmaktadır. Bu delikler M3-Allen vidalar içindir.



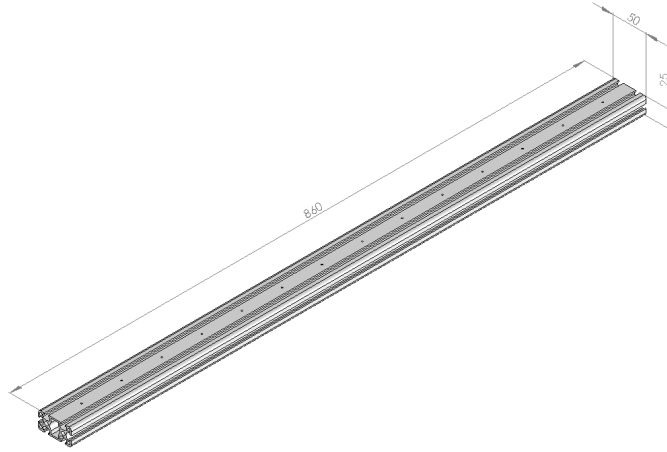
Şekil-2.4 Hassas ray



Şekil- 2.5 Hassas ray üzerindeki bilya kanalları

### 2.1.2 Alüminyum taban

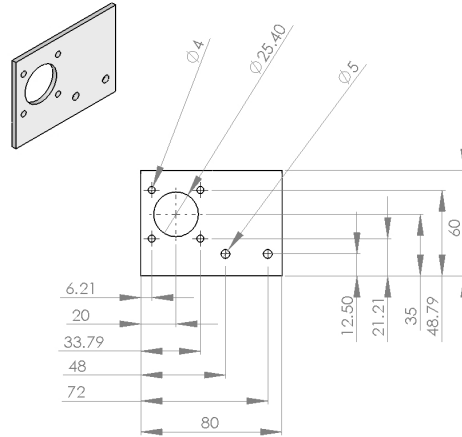
Tüm mekanik sistemi birarada tutan parçadır. 25 mm x 50mm extruded alüminyum profilden 860 mm kesilerek yapılmıştır (Şekil 2.6). Üst kısmına hassas rayın montajı için simetrik olarak, 60mm aralarla, 14 adet, 2.2mm çapında delik delinmiştir. Daha sonra deliklere M3 vida için kılavuz açılmıştır.



Şekil-2.6 Alüminyum taban

### 2.1.3 Motor montaj plakası

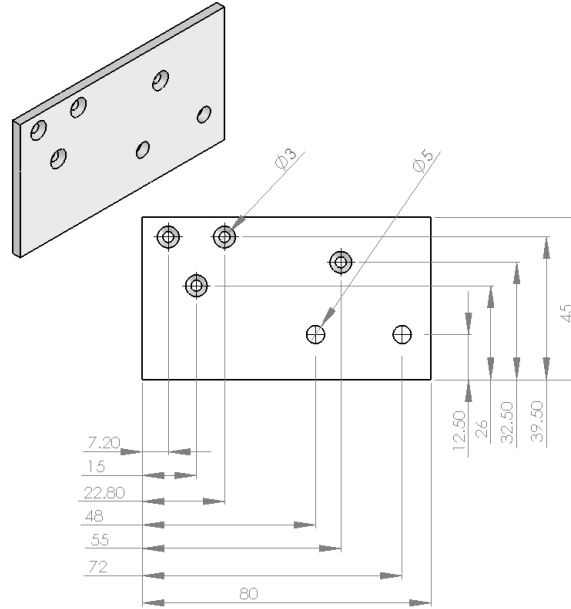
Motor montaj plakası, tahrik motorunu alüminyum tabana sabitler. Plaka 2 adet M5 vida ile alüminyum tabana sabitlenir. Motor ise 4 adet #6-32 Amerikan vida ile plakaya sabitlenir. Daha sonra motor kasnağı diğer parçalarla birlikte motor miline monte edilmiştir. Alüminyumdan yapılmıştır (Şekil 2.7).



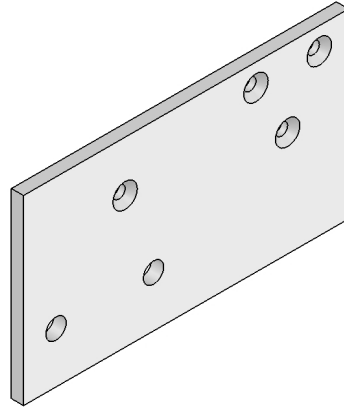
Şekil-2.7 Motor montaj plakası

### 2.1.4 Serbest kasnak sağ-sol plakaları

Serbest kasnak milini yataklayan burçları alüminyum tabana sabitlerler. İki plaka arasında ayrıca bir destek silindiri vardır. Bu silindir ray sonu destek parçası şeklinde de adlandırılabilir. Sağ plaka ve ölçükleri Şekil 2.8 de verilmiştir. Sol plaka ise sağ plakanın tamamen simetriği olup delik çapları ve diğerk tüm ölçükler aynıdır. Sadece M3 vida kafaları için açılan havşalar ters taraflardadır (Şekil 2.9). Her iki plaka alüminyumdan yapılmıştır.



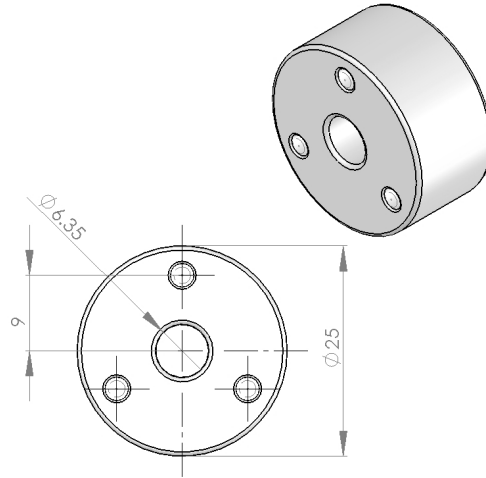
Şekil-2.8 Serbest kasnak sağ plaka



Şekil-2.9 Serbest kasnak sol plaka

### 2.1.5 Serbest kasnak mili burçları

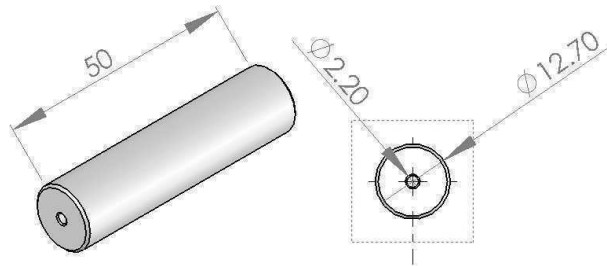
Serbest kasnak milini sağ ve sol plakalara sabitleyiciler. Üzerindeki 3 delik 2.2mm çaplı uç ile delinmiş daha sonra M3 vidası için kılavuzlanmıştır (Şekil 2.10). Sağ ve sol plaka üzerine monte edilmek için iki adet kullanılmaktadır. Serbest kasnak mili burçlarının hammaddesi delrindir.



Şekil-2.10 Serbest kasnak mili burcu

### 2.1.6 Ray sonu destek parçası

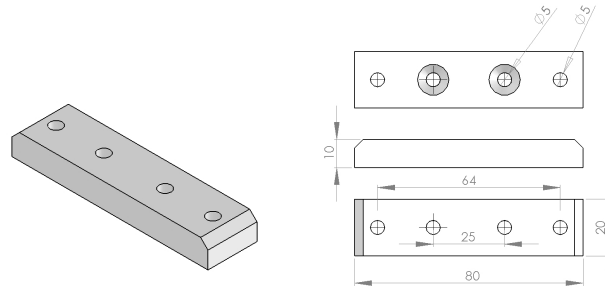
Bu parça araba düzeneği için mekanik bir limitleme yapmaktadır. Böylece araba hatalı tahriklemeler ile kasnağa çarpıp dişlileri zedeleyemez. Normalde sağ ve sol plakalar alüminyum tabana sabitlenmiş durumdadır. Ama destek parçası ile daha sağlam bir montaj sağlanır. Ray sonu destek parçası delrinden yapılmıştır (Şekil 2.11).



Şekil-2.11 Ray sonu destek parçası

### 2.1.7 Taban ayakları

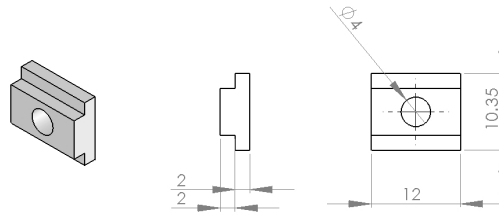
Sistemde iki adet taban ayağı kullanılmaktadır. Bu ayaklar alüminyum tabanı masa, deney platformu gibi zeminlere monte etmede kullanılırlar. Taban ayakları delrinden yapılmıştır (Şekil 2.12).



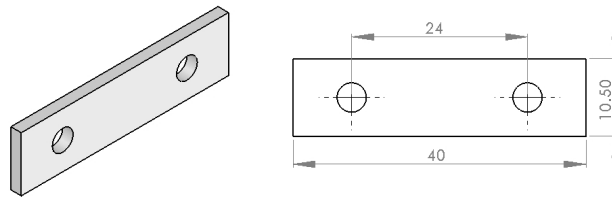
Şekil-2.12 Taban ayağı

### 2.1.8 Kanal montaj parçaları

Kanal montaj parçaları tek delikli ve çift delikli olmak üzere iki çeşittir (Şekil 2.13-2.14). Çift delikliler plakaları alüminyum tabana sabitlemede, tek delikliler alüminyum tabanı zemine sabitlemede kullanılır. Delikler 4mm uç ile delinmiş ve M5 vida için kılavuzu açılmıştır. Pirinçten yapılmışlardır. Bu parçalara alternatif olarak alüminyum tabana delik delinip kılavuz açılabilir.



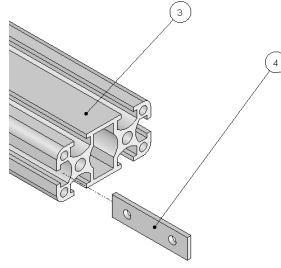
Şekil-2.13 Tekli kanal montaj parçası



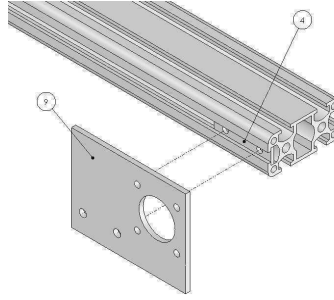
Şekil-2.14 Çiftli kanal montaj parçası

### 2.1.9 Hassas ray düzeneği montajı

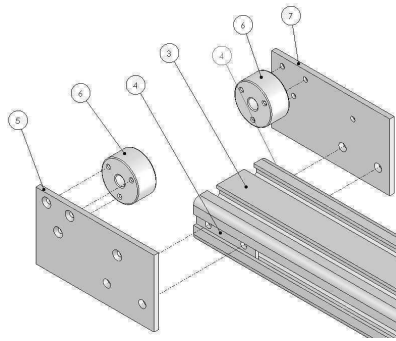
Hassas ray düzeneğinin montaj prosedürü sırası Şekil 2.15 - Şekil 2.20 de verilmektedir. Tablo 2.1 de vidalar haricinde kullanılacak parçaların listesi verilmiştir. Serbest kasnak sağ-sol plakaları havşa kafalı M3, burçların ise allen kafalı M5 vidalar kullanılarak monte edilmektedir. Hassas ray ayaklarının montajı yapılırken, havşa kafalı vidalar tekli montaj parçaları istenilen uzaklıklara ayarlandıktan sonra sıkılacaktır (Şekil 2.19 ).



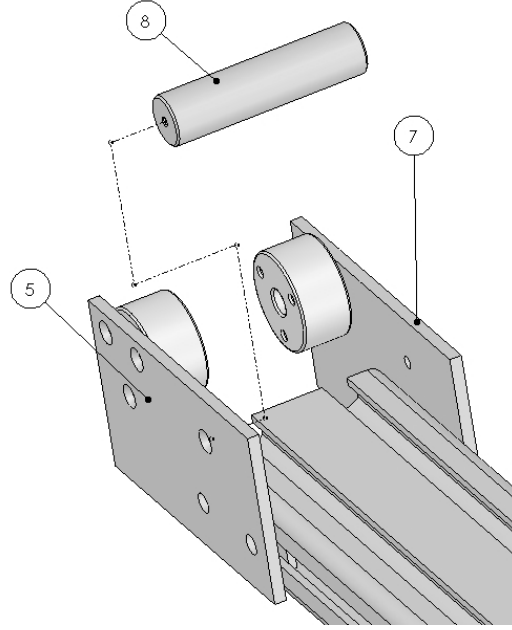
Şekil-2.15 Çiftli montaj parçası yerleşimi



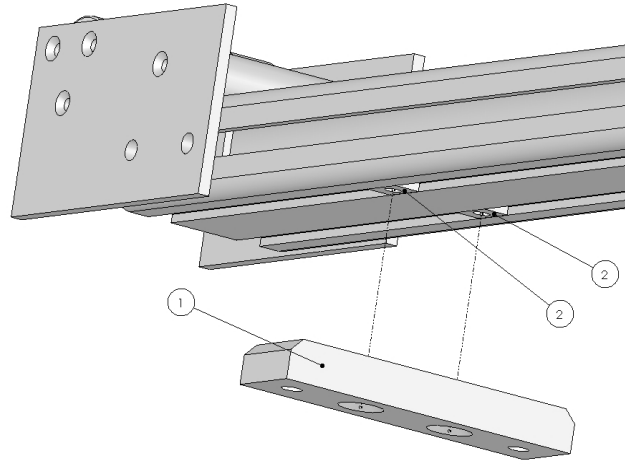
Şekil-2.16 Motor plakasının M5 vidalar ile sabitlenmesi



Şekil-2.17 Serbest kasnak sağ-sol plakalarının ve burçların uygun vidalar ile montajı

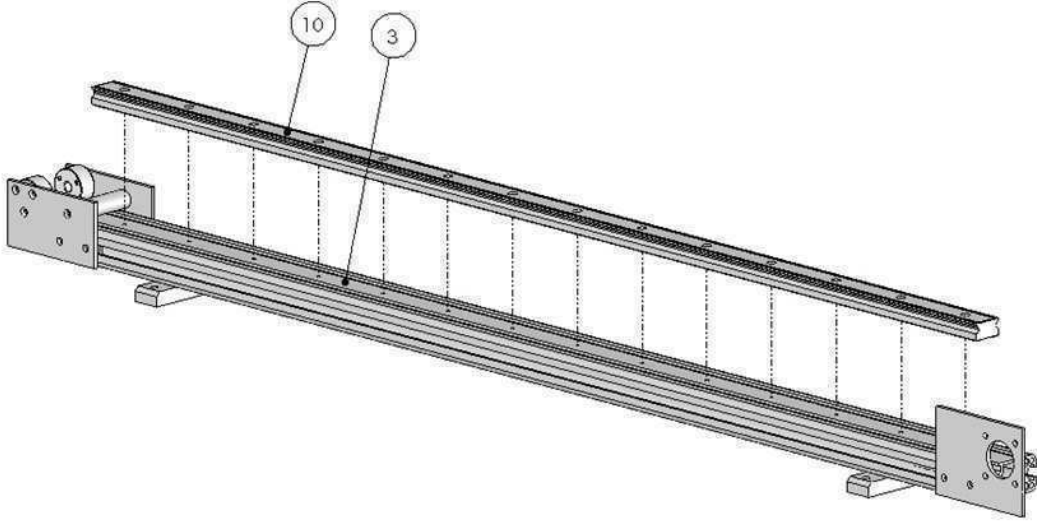


Şekil-2.18 Havşa kafalı M3 vidalar ile destek parçasının montajı



Şekil-2.19 Hassas ray ayaklarının havşa kafalı M5 vidalar ile montajı.





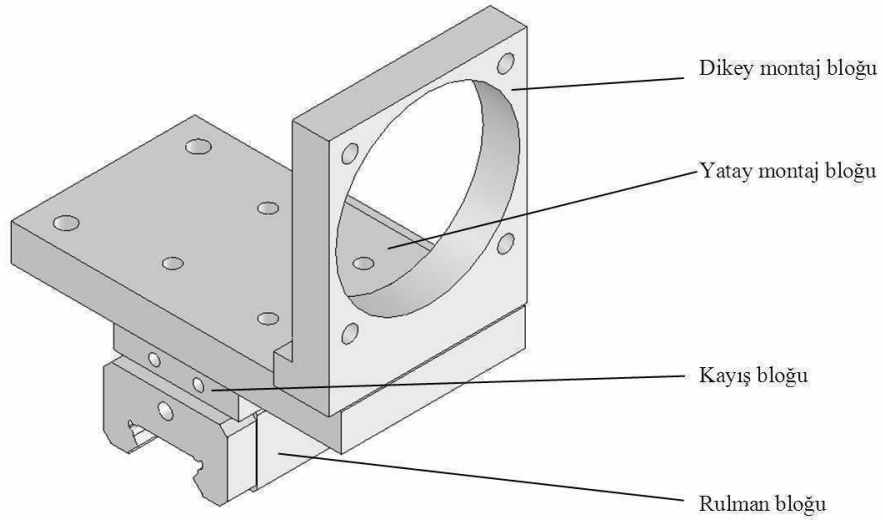
Şekil-2.20 Hassas rayın, alüminyum taban üzerine allien kafalı M3 vidalar ile sabitlenmesi

Tablo-2.1 Hassas ray düzeneği parça listesi

No	Parça no	Adet	Açıklama
1	prd01	2	Taban ayağı
2	prd02	4	Tekli kanal montaj parçası
3	prd03	1	Alüminyum taban
4	prd04	3	Çiftli kanal montaj parçası
5	prd05	1	Serbest kasnak sol plaka
6	prd06	2	Serbest kasnak mil burcu
7	prd07	1	Serbest kasnak sağ plaka
8	prd08	1	Ray sonu destek parçası
9	prd09	1	Motor montaj plakası
10	prd10	1	Hassas ray

## 2.2 Araba Düzeneği

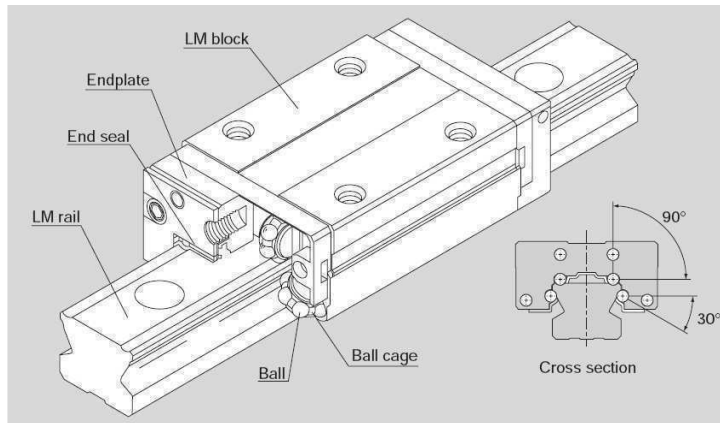
Düzenek devridaim yapan bilyalar üzerinde hareket eden bir rulman bloğu, bir kayış bloğu, bir yatay montaj bloğu ve bir dikey montaj bloğundan oluşur (şekil 2.21). Parçalar alt bölümlerde detaylandırılmıştır.



şekil-2.21 Araba düzeneği

### 2.2.1 Rulman bloğu

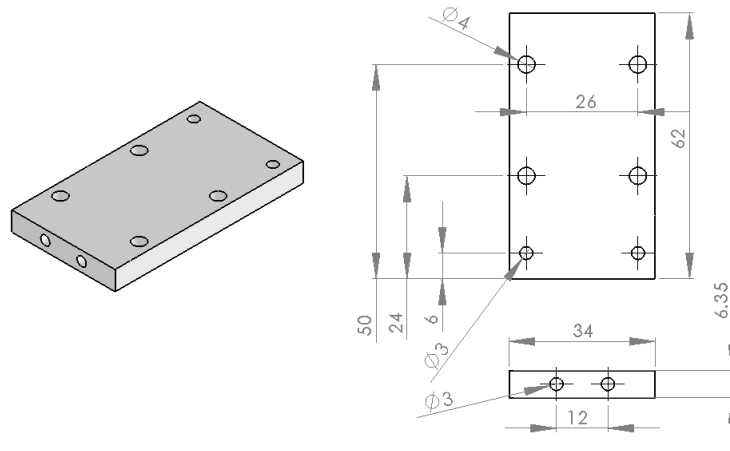
THK firmasının LM - SSR serisi bir doğrusal hareket bloğudur. İçinde ray ile arasında dönerek hareket eden bilyalar için devridaim sağlayan bir kafes bulundurur (şekil 2.22).



şekil-2.22 Rulman bloğu

### 2.2.2 Kayış bloğu

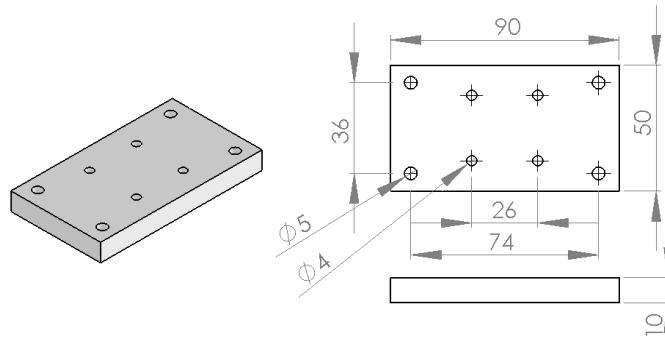
Kayış bloğu alüminyumdan yapılmıştır. 3mm çapındaki deliklere M4 kılavuz açılmış olup kayış uçlarındaki braketler kayış bloğuna sabitlenmektedir. Yatay montaj bloğu 4 adet M4 vidayla rulman bloğuna monte edildiğinde bu parça aralarında kalmalıdır (Şekil 2.23).



Şekil-2.23 Kayış bloğu

### 2.2.3 Yatay montaj bloğu

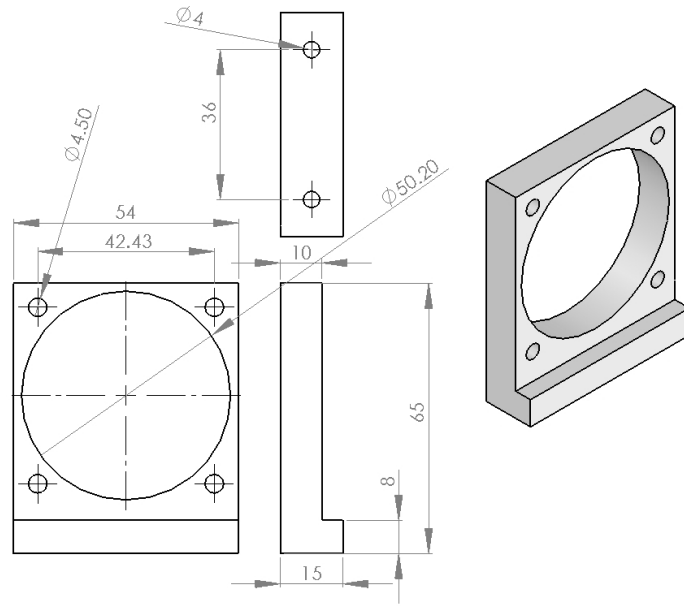
Yatay montaj bloğu alüminyumdan yapılmıştır. Bu blok rulman bloğunu, dikey montaj bloğuna sabitlemektedir (Şekil 2.24). Yatay montaj bloğu rulman bloğuna, kayış bloğu iki bloğun arasında kalacak şekilde monte edilmelidir.



Şekil-2.24 Yatay montaj bloğu

#### 2.2.4 Dikey montaj bloğu

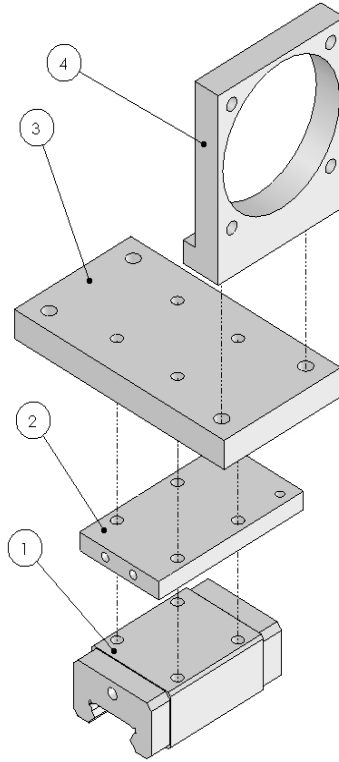
Dikey montaj bloğu sarkaç düzeneğini araba düzeneğine sabitleyen parçadır. Enkoder bloğunun montajı için 4 yatay delik bulundurur. Düşey iki delik 4mm çapında uçla delinmiş ve M5 kılavuz çekilmiş olup yatay montaj bloğuna sabitlenmek içindir (Şekil 2.25).



Şekil-2.25 Dikey montaj bloğu

### 2.2.5 Araba düzeneği montajı

Araba düzeneğinin montajı Şekil 2.26 daki gibidir. Yatay montaj bloğu kayış bloğu arada kalacak şekilde rulman bloğuna M4 vidalarla sabitlenir. Daha sonra iki adet allien kafalı M5 vida ile dikey montaj bloğuna alt taraftan monte edilir. Montaj için gerekli parça listesi Tablo 2.2 de verilmiştir.



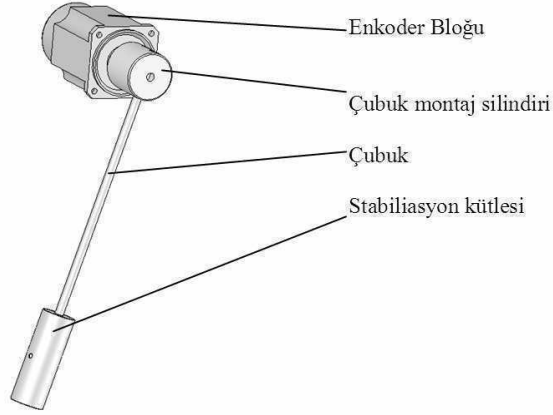
Şekil-2.26 Araba düzeneği montajı

Tablo-2.2 Araba düzeneği parça listesi

No	Parça no	Adet	Açıklama
1	pad01	1	Rulman bloğu
2	pad02	1	Kayış bloğu
3	pad03	1	Yatay montaj bloğu
4	pad04	1	Dikey montaj bloğu

### 2.3 Sarkaç Düzeneği

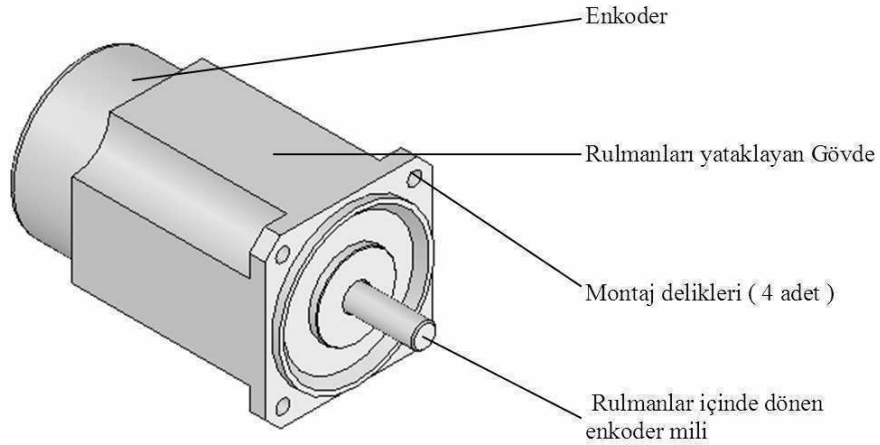
Sarkaç düzeneği; bir enkoder bloğu, bir çubuk montaj silindiri, bir (sarkaç) çubuğu ve çubuk ucuna konulmuş bir stabilizasyon kütlesinden oluşmuştur (Şekil 2.27). Parçalar alt bölümlerde detaylandırılmıştır.



Şekil-2.27 Sarkaç düzeneği

#### 2.3.1 Enkoder bloğu

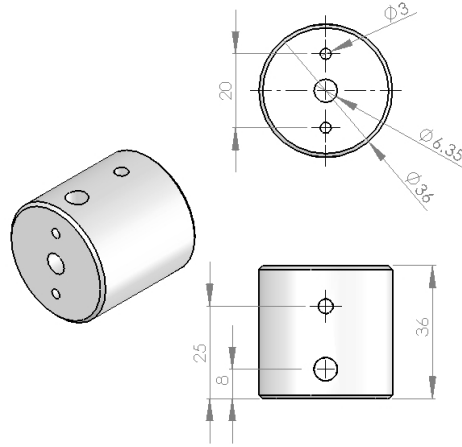
Milinin rulmanlı yatakta dönmesi, sarkaç pozisyonunu ölçmeye yarayan hassas bir enkoderinin bulunması, montaj kolaylıkları gibi özellikleri, küçük bir fırçasız motor gövdesini sarkaç düzeneği için mükemmel bir seçenek yapar. Motor kısmı iptal edilerek bu düzeneğe uyarlanmıştır (Şekil 2.28).



Şekil-2.28 Enkoder bloğu

### 2.3.2 Çubuk montaj silindiri

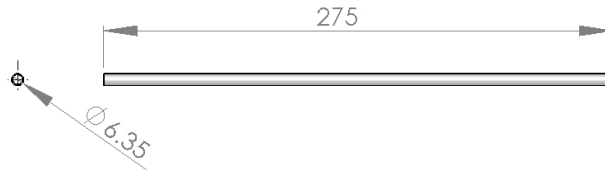
Çubuk montaj silindiri, sarkaç çubuğunu enkoder blok miline sabitler. Sarkaç çubuğu için iki M4 sabitleme vidası ( set screw) , enkoder bloğu mili için bir M5 sabitleme vidası kullanılır. Sabitleme vidalarının monte edileceği deliklere vidalara uygun kılavuz çekilmiştir. Delrinden yapılmıştır (Şekil 2.29).



Şekil-2.29 Çubuk montaj silindiri

### 2.3.3 Sarkaç çubuğu

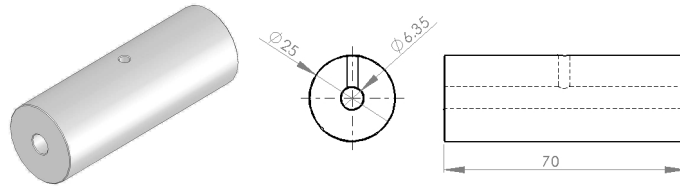
Tüm sarkaç düzeneğinin bu çubuğun pozisyon kontrolü üzerine yapıldığını düşünürsek kuşkusuz sistemin en önemli parçasıdır. 30 cm uzunluğunda, 6.35mm çapında bir pirinç malzemeden yapılmıştır (Şekil 2.30).



Şekil-2.30 Sarkaç çubuğu

### 2.3.4 Stabilizasyon kütlesi

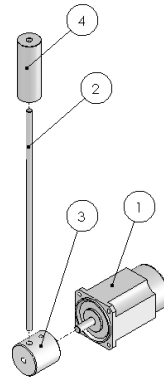
Stabilizasyon kütlesi çubuğun stabilizasyonunu artırmada, vibrasyonun azaltılmasında faydalı olmaktadır. Ayrıca araba kütlesinin çubuk kütlesine oranının az olması gereken deneylerde kullanılır (Şekil 2.31).



Şekil-2.31 Stabilizasyon kütlesi

### 2.3.5 Sarkaç düzeneği montajı

Sarkaç düzeneğinin montajı Şekil 2.32 de verilmektedir. Kullanılan parçaların listesi Tablo 2.3 te verilmiştir. Sarkaç düzeneği montajı bitirildikten sonra yapılacak önemli bir detay söz konusudur. 2, 3, 4 nolu parçalar birbirinden ayrılmaksızın, 3 nolu parçayı enkoder bloğuna sabitleyen vidalar gevşetilmekte ve 3 nolu parça milden çıkarılmaktadır. Enkoder bloğu mili döndürülerek index çıkışının aktif hale getirilmesi ve bu durumdayken sarkacın aşağı doğru dikey konumda tekrar mile takılarak sabitlenmesi gerekmektedir.



Şekil-2.32 Sarkaç düzeneği montajı

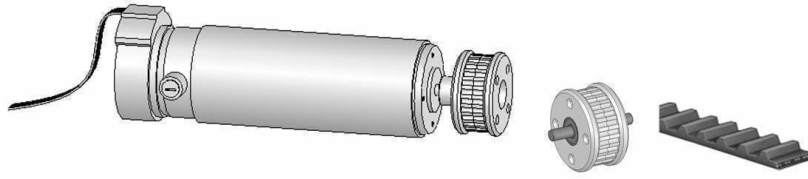
Tablo-2.3 Sarkaç düzeneği parça listesi

No	Parça no	Adet	Açıklama
1	Psd01	1	Enkoder Bloğu
2	Psd02	1	Sarkaç çubuğu
3	Psd03	1	Çubuk montaj silindiri
4	Psd04	1	Stabilizasyon kütlesi



## 2.4 Tahrik Motorlu Kayış – Kasnak Düzeneği

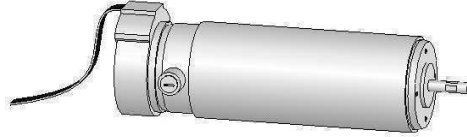
Düzenek miline kasnak monte edilmiş bir tahrik motoru (DC servo motor) , bir zaman kayışı ve milindeki rulmanlar üzerinde serbest dönebilen ikinci bir kasnaktan oluşur (Şekil 2.33).



Şekil-2.33 Tahrik motorlu mayış – masnak düzeneği

### 2.4.1 Tahrik motoru

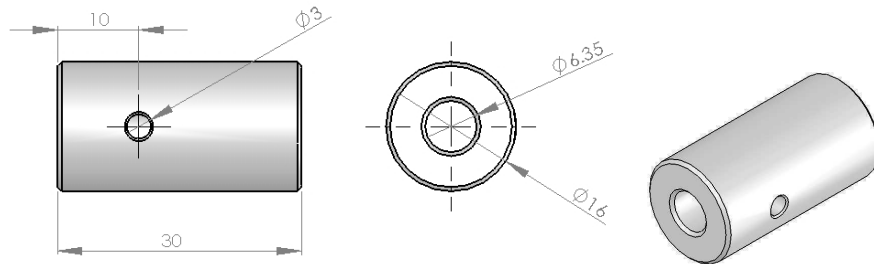
Pitmann firmasının 30V'lık bir DC-servo motoru kullanılmıştır (Şekil 2.34). Enkoder kablosu konnektörü bağlantıları elektronik donanım kısmında anlatılmıştır.



Şekil-2.34 Tahrik motoru olarak kullanılan fırçalı DC servo motor

### 2.4.2 Motor mil silindiri

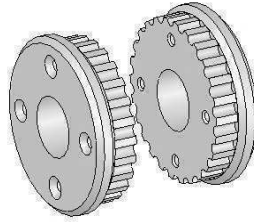
Motor mil silindiri kasnak parçalarını motor miline sabitlemede kullanılır. Pirinçten yapılmıştır. Mile sabitleme için 3mm delik delinerek M4 sabitleme vidası için kılavuz çekilmiştir (Şekil 2.35).



Şekil-2.35 Motor mil silindiri

### 2.4.3 Motor kasnak parçaları ( Sağ-Sol)

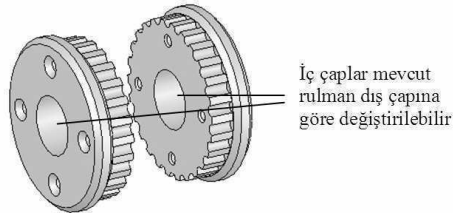
Kasnak-Sol ve Kasnak-Sağ olmak üzere iki parçadan oluşur (Şekil 2.36). Her iki parçada da 4 adet M3 vida montaj deliği bulunur. Kasnak-Soldaki delikler 3mm çapında olup havşa açılmıştır. Kasnak-Sağdaki delikler ise 2.2mm çapında delinip M3 vida için kılavuz çekilidir. PVC veya delrinden yapılmışlardır. Motor mil silindirine geçen delik ise 15.9 mm çapındadır. Mil silindirine presle monte edilirler.



Şekil-2.36 Motor kasnak sağ-sol parçaları

### 2.4.4 Serbest kasnak parçaları ( A-B )

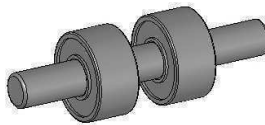
Motor kasnak parçalarının aynısıdır. Kullanılan rulmanların çapına göre ortadaki montaj deliği çapı genişletilebilir (Şekil 2.37).



Şekil-2.37 Serbest kasnak sağ sol parçaları

### 2.4.5 Serbest kasnak rulmanları

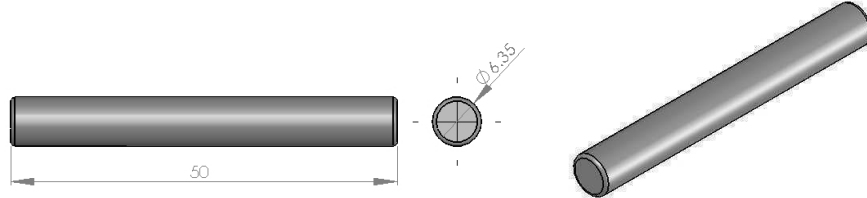
16 mm dış , 6.3 mm iç çapına sahip iki rulman kullanılmıştır Serbest kasnak miline Şekil 2.38 te görüldüğü gibi monte edilmişlerdir.



Şekil-2.38 Serbest kasnak rulmanları

#### 2.4.6 Serbest kasnak mili

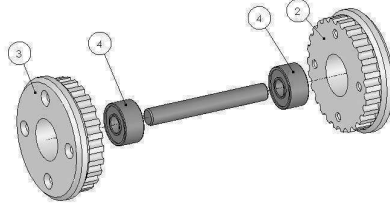
Serbest kasnak mili 6.3 mm  $\varnothing$ nda paslanmaz  $\text{çelikten}$  yapılmıştır (Şekil 2.39). Milin her iki ucundaki keskin kenarlar hafifçe yuvarlatılmıştır.



Şekil-2.39 Serbest kasnak mili

#### 2.4.7 Serbest kasnak montajı

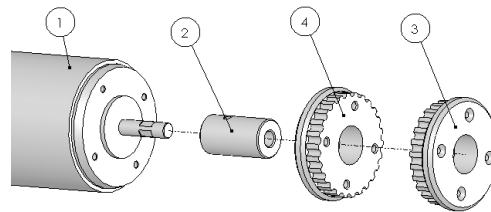
Önce kasnaklar M3 vidalar ile birbirine monte edilmektedir. Daha sonra rulmanlar presle kasnakların dış kısımlarıyla sıfır gelecek şekilde yerleştirilmektedir. Son olarak mil yine presle ortalanarak yerleştirilmelidir (Şekil 2.40).



Şekil-2.40 Serbest kasnak montajı

#### 2.4.8 Motor - kasnak montajı

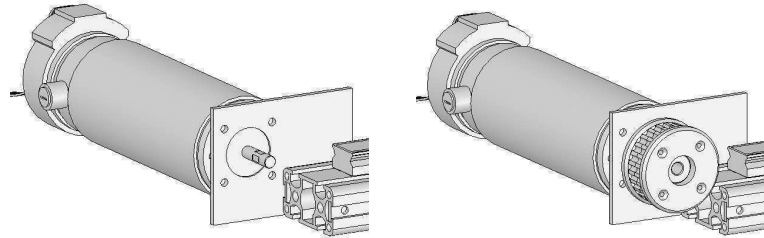
Kasnaklar Havşa kafalı M3 vidalar ile birbirine monte edildikten sonra, presle motor mil silindrine geçirilmektedir . Bu basamaktan motor mil silindiri geçici olarak tahrik motoru miline sabitlenmektedir (Şekil 2.41).



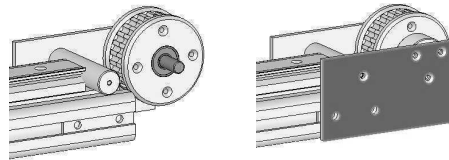
Şekil-2.41 Motor - kasnak montajı

### 2.4.9 Motor kayış düzeneği montajı

Tahrik motoru motor kasnak düzeneğinden ayrılarak, motor montaj plakasına monte edilmektedir. Daha sonra da motor kasnak düzeneği yeniden motor miline sabitleme vidası ile sabitlenmelidir (Şekil 2.42). Benzer şekilde hassas ray düzeneğindeki sağ veya sol plaka sökülerek serbest kasnak düzeneği araya yerleştirildikten sonra, sökülen plaka tekrar monte edilmelidir (Şekil 2.43). Tahrik kayışının yerleştirilmesi ve gerginliğinin ayarlanması ile mekanik montaj sona ermektedir. Montaj için gerekli parça listesi tablo 2.4 te gösterilmiştir.



Şekil-2.42 Tahrik motor-kasnak düzeneği montajı



Şekil-2.43 Serbest kasnak montajı

Tablo-2.4 Tahrik motorlu kayış – kasnak düzeneği parça listesi

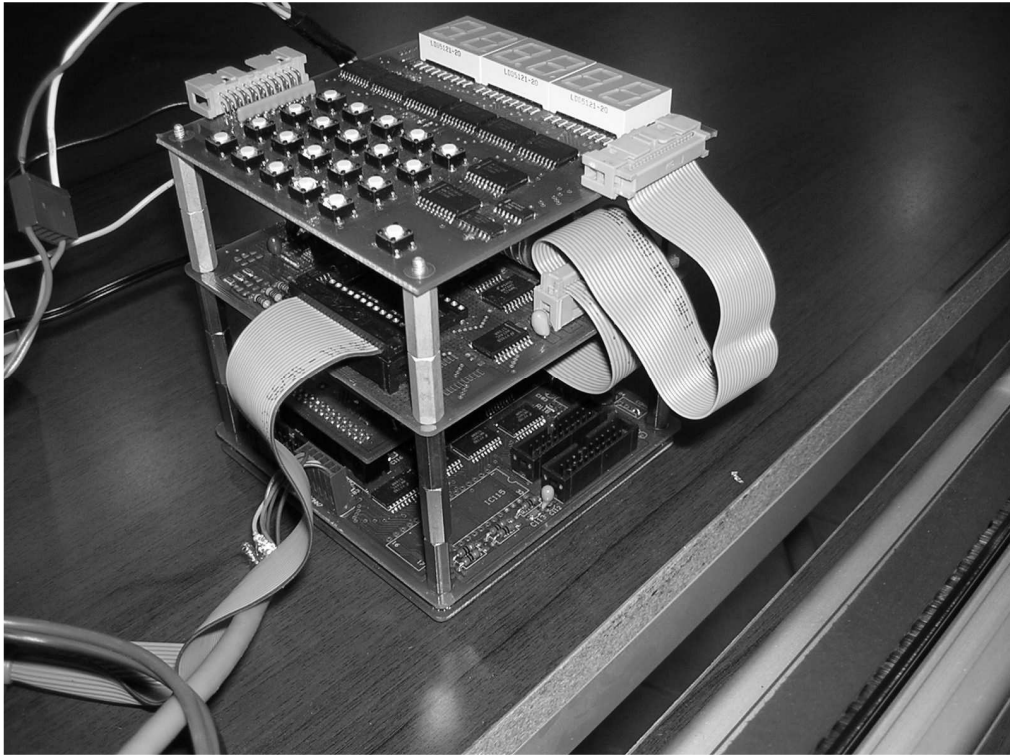
No	Parça no	Adet	Açıklama
1	Kkd01	2	Serbest kasnak rulmanı
2	Kkd02	1	Serbest kasnak sağ
3	Kkd03	1	Serbest kasnak sol
4	Kkd04	1	Serbest kasnak mili
5	Kkd05	1	Motor kasnak sağ
6	Kkd06	1	Motor kasnak sol
7	Kkd07	1	Motor mil silindiri
8	Kkd08	1	Tahrik kayışı

### BÖLÜM 3

#### ELEKTRONİK DONANIM

Elektronik donanım; Güç Kaynağı, Sayısal Sinyal İşlemcisi (DSP) kartı, DC Servo-Motor Sürücü kartı, Tuş ve Gösterge kartı ve gerekli kablolardan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Hazırlanan donanımın sistemde kullanılan özellikleri şu şekilde listelenebilir:

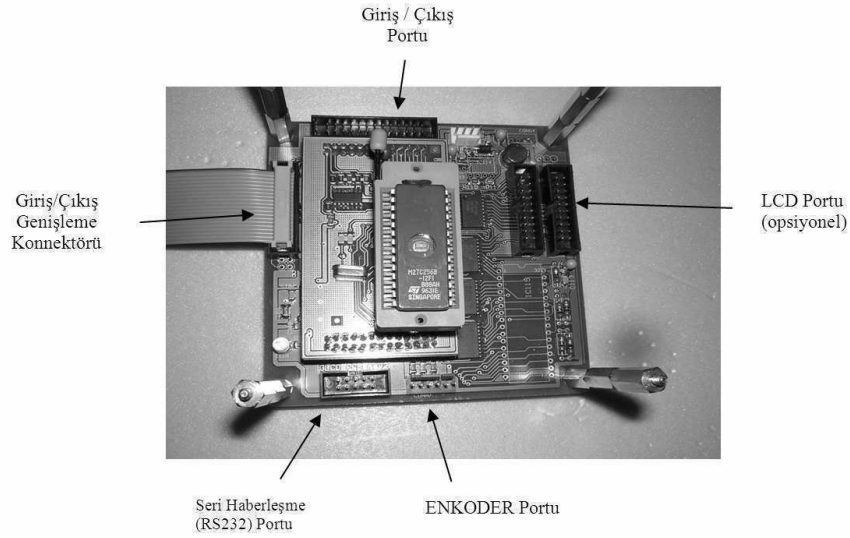
- ADSP2181 32MHz Sayısal Sinyal işlemcisi
- 2 adet doğrudan enkoder giriş portu
- 1 adet 19200baud RS232 portu
- 12 çıkış, 5 giriş portu
- 1 adet 3 Amperlik DC motor sürücüsü
- 6 dijitalik 7-parçalı gösterge
- 20 tuşluk tuş-paneli
- 24V, 2A Güç kaynağı ile sürülen PWM kontrollü Motor sürücü çıkışı



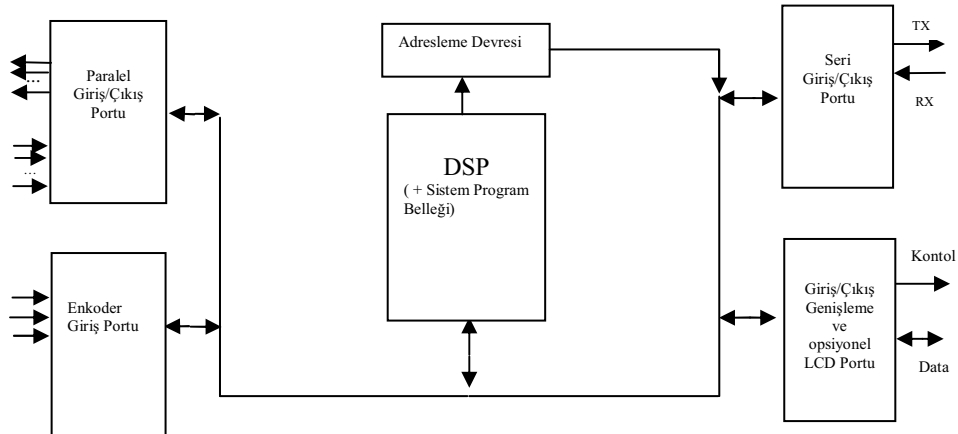
Şekil-3.1 Elektronik kartlar kutulanmadan önce

### 3.1 Sayısal Sinyal İşlemcisi (DSP) Kartı

Bu kart üzerinde bir ADSP2181 DSP modülü, bir giriş/çıkış genişleme konnektörü, bir seri haberleşme (RS232) portu, muhtemel ihtiyaçlara karşı kullanılabilen 12 çıkış ve 5 girişe sahip bir paralel giriş/çıkış portu, bir enkoder giriş portu, bir 5 voltluk besleme girişi konnektörü ve genel amaçlı bir karakter LCD portu bulunmaktadır (Şekil 3.2). Kartın blok diagramı Şekil 3.3 te verilmiştir.



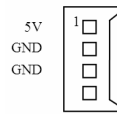
Şekil-3.2 DSP kartı ve bağlantıları



Şekil-3.3 DSP kartı blok şeması

### 3.1.1 5V Besleme girişi

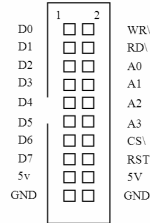
Sistemdeki tüm kartların lojik devreleri bu konnektörden verilen 5V gerilim ile beslenmektedir (Şekil 3.4). Ayrıca enkoderlerin beslenmeleri de dolaylı olarak bu besleme ile yapıldığından güç kaynağından gelen 5V'un yeteri kadar gürültüsüz olmasına dikkat edilmelidir. Sistemde bu şartlara uygun bir regüleli güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil-3.4 5V Besleme girişi konnektörü

### 3.1.2 Giriş / Çıkış genişleme konnektörü

Bu konnektör gerekli giriş/çıkış portlarının bulunduğu diğer kartların DSP kartına uygun adreslerle bağlandığı konnektördür. Konnektördeki sinyaller Şekil-3.5 ve tanımları Tablo-3.1'de verilmiştir.



Şekil-3.5 Giriş / Çıkış genişleme portu konnektör bağlantıları

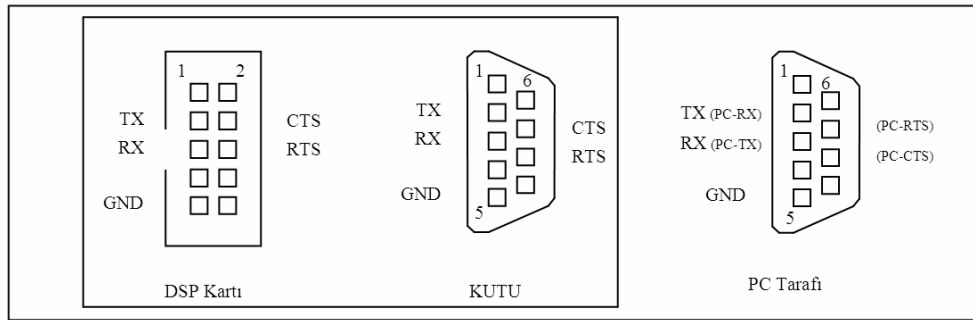
Tablo-3.1 Giriş / Çıkış genişleme konnektörü sinyalleri

Sinyal	Açıklama
D0-D7	Data0, giriş / çıkış, ( DSP I/O BUS )
WR\	Yaz "write", giriş / çıkış, ( DSP Control BUS ), negatif lojik
RD\	Oku "read", giriş / çıkış, ( DSP Control BUS ), negatif lojik
A0	Adres0, çıkış, ( DSP ADDRESS BUS )
A1	Adres1, çıkış, ( DSP ADDRESS BUS )
A2	Adres2, çıkış, ( DSP ADDRESS BUS )
A3	Adres3, çıkış, ( DSP ADDRESS BUS )
CS\	DSP kartı dışındaki tüm çiplerin seçimi için, ( adresleme devresinden), negatif lojik
RST\	Reset sinyali, Tuş panelindeki RESET tuşundan
+5V	Tüm lojik çiplerin beslemesi için
GND	Sistem lojik sinyalleri için ortak toprak referansı

### 3.1.3 Seri haberleşme portu

Seri haberleşme portu PC ile haberleşmeyi sağlayan porttur. Seri haberleşme sayesinde PC'deki Sarkaç arayüzü programları ile sistem kontrol edilir ve gerektiğinde sistemde ölçülen konum, hız gibi bilgiler PC'ye aktarılarak sistemdeki tepkiler incelenebilir.

Konnektördeki sinyaller standart RS232 Null Modem sinyalleridir (Şekil 3.6). Sinyallerin açıklamaları Tablo 3.2 de verilmiştir.



Şekil-3.6 Seri haberleşme konnektörleri

Tablo-3.2 Seri haberleşme portu sinyalleri

Sinyal	Açıklama
TX	Seri Data Çıkışı, PC tarafında ise Seri Data Girişi olarak çalışır
RX	Seri Data Girişi, PC tarafında ise Seri Data Çıkışı olarak çalışır
RTS	Göndermek için istek, PC tarafında CTS olur
CTS	Karşı taraf müsait, PC tarafında RTS olur
GND	Sistem lojik sinyalleri için ortak toprak referansı

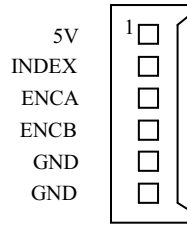
### 3.1.4 Enkoder portu

Bu port, sayısal herhangi bir enkoderde bulunan iki faz ve bir index sinyalini okuma amaçlı hazırlanmıştır (Şekil 3.7). DSP kartında otomatik enkoder okuma devresi olmadığından bu port yazılım tarafından sürekli olarak gözlenmektedir.

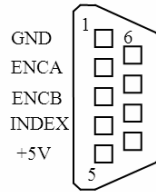
Bu porta sarkaç çubuğunun eklem yerindeki enkoder ile sarkaç açısız pozisyonunu okumada kullanılmıştır.



Enkoder portu sinyalleri bir yassı kablo ile kutu üzerindeki konnektöre bağlıdır. Kutu üzerinde DSUB9 tipi dişi konnektör kullanılmıştır (Şekil 3.8). Enkoderden gelen kablo ucundaki konnektördeki sinyaller, kutu üzerindeki konnektördeki gibi aynı sırada olmalıdır. Dolayısıyla enkoderden gelen kablo ucundaki konnektör DSUB9 tipi erkek konnektör olmak zorundadır. Enkoder portu sinyalleri Tablo 3.3 te açıklanmıştır.



Şekil-3.7 Enkoder bağlantısı



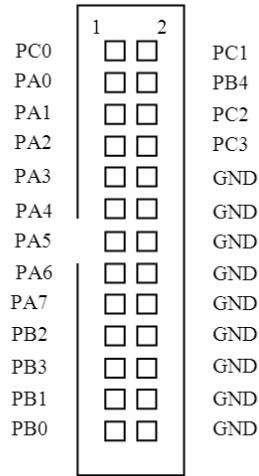
Şekil-3.8 Enkoder portunun kutu üzerindeki konnektöre bağlantısı

Tablo-3.3 Enkoder portu sinyalleri

Sinyal	Açıklama
5V	Enkoder devresini besler
INDEX	Encoder açısal referans optik okuyucu çıkışı
ENCA	Encoder ardışıl pozisyon optik okuyucu çıkışı A
ENCB	Encoder ardışıl pozisyon optik okuyucu çıkışı B
GND	Ortak toprak referansı

### 3.1.5 Giriş / Çıkış portu

Bu port gerektiğinde bazı kontrol giriş ve çıkışlarında kullanılabilir (Şekil 3.9). Paralel printer çıkışı olarak kullanılmaya da uygundur. Opsiyonel olarak bulunmaktadır. Sinyal açıklamaları Tablo 3.4 teki gibidir.



Şekil-3.9 Giriş / Çıkış portu konnektör bağlantıları

Tablo-3.4 Giriş / Çıkış portu sinyalleri

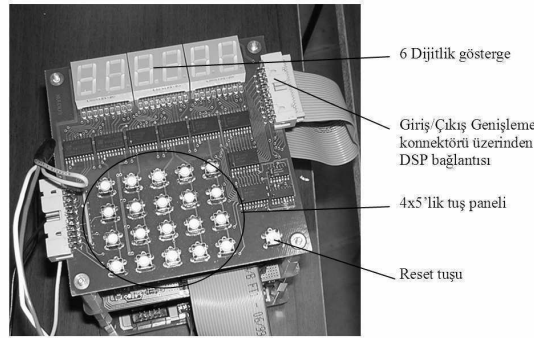
Sinyal	Açıklama
PA0-PA7	Paralel data çıkışı
PB0-PB4	Paralel data girişi
PC0-PC3	Paralel data çıkışı
GND	Sistem lojik sinyalleri için ortak toprak referansı

### 3.1.6 LCD portu ( opsiyonel )

LCD portu karakter ve bazı siyah/beyaz grafik LCD modulleri bağlantısı için opsiyonel olarak bulunmaktadır. PC tabanlı olarak çalışıldığından bu portun kullanımına ihtiyaç görülmemektedir.

### 3.2 Tuş / Gösterge Kartı

Kuşkusuz program ara basamaklarını test için olsun, parametre girişi için olsun bir tuş / gösterge kartının kullanışlılığı tartışılmaz. Özellikle PC ortamının bulunmadığı zamanlarda da bazı demoların yapılabilmesine izin verir. Bu gösterge zaman zaman çubuk açısı, açı değişimi, arabanın referansa uzaklığı gibi parametrelerin gözlemlenmesinde kullanılır (Şekil 3.10).



Şekil-3.10 Tuş/Gösterge kartı ve bağlantısı

#### 3.2.1 Tuş/Gösterge kartı - DSP kartı bağlantısı

Tuş/Gösterge kartı DSP kartına Giriş/Çıkış genişleme konnektörü üzerinden bir yassı kablo ile bağlanır. Bu konnektördeki sinyaller ve tanımları bölüm 3.1.2 de verilmiştir. Tuş/Gösterge kartı üzerindeki lojik devreler beslemelerini bu konnektördeki 5V bacağı üzerinden alırlar.

#### 3.2.2 Tuş/Gösterge kartı - DSP kartı adresleri

Tuş/Gösterge kartı üzerindeki adresler ve hangi bilgiler için kullanıldığı Tablo-3.5 de verildiği gibidir.

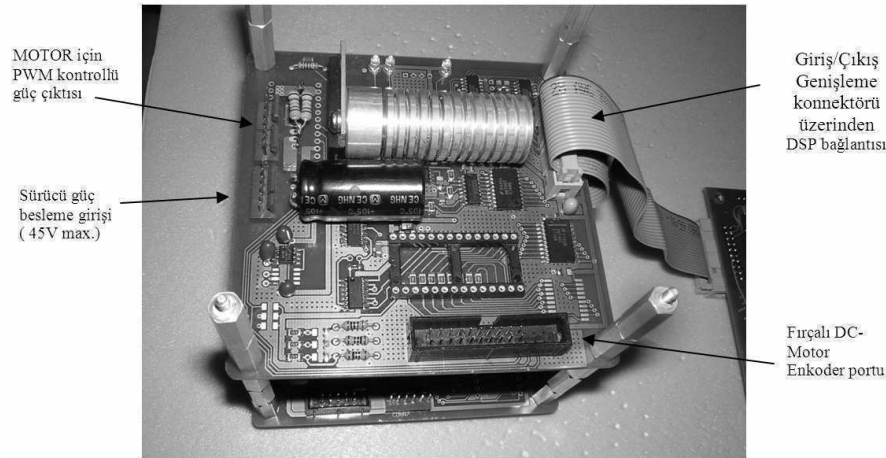
Tablo-3.5 Tuş/gösterge kartı giriş / çıkış portları

I/O Adresi:	Okununca	Yazılınca	Açıklama
80H		x	Segment bilgisi / Tuş sütun bilgisi
80H	x		Tuş satır bilgisi
81H		x	Segmentin yazılacağı dijit bilgisi 0 en soldaki, 5 en sağdaki dijit

### 3.3 DC-Servo Motor Sürücü Kartı

Bu kart üzerinde A3952SW PWM DC-Motor sürücü entegre devresi ve bu sürücüye gerekli sinyallerin verilebilmesi için gerekli destek devreleri bulunmaktadır (Şekil 3.11). Ayrıca enkoder sinyallerini okuyabilmek için de bir sayısal mantık devresi içermektedir.

Motor akımının kontrol girişi için 8 bitlik bir DAC kullanılmıştır. DAC çıkışı, sürücünün REF girişine bağlıdır. Dolayısıyla DAC bilgisi ile motor akımı doğrusal orantıyla kontrol edilmektedir. Sürücü REF girişindeki gerilimle doğru orantılı bir ortalama akım verebilmek için geri beslemeli bir kontrolle, girişe uygun darbe oranı modülasyonu (PWM) çıktısı üretmektedir. Geri besleme akımı bir akım-algılayıcı direnci (sense resistor) üzerinden okunmaktadır. Sürücü aynı zamanda bir sıcaklık koruma devresi ile akım sınırlaması da yapmaktadır.



Şekil-3.11 Güç kontrol kartı ve bağlantıları

#### 3.3.1 DSP bağlantısı

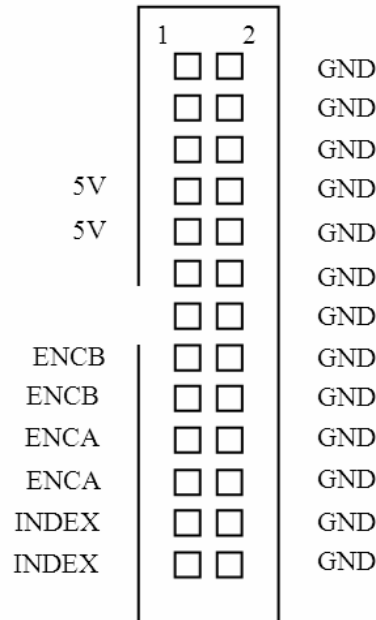
Sürücü kartı DSP kartına Giriş/Çıkış genişleme konektörü üzerinden bir yassı kablo ile bağlıdır. Bu konektördeki sinyaller ve tanımları Bölüm 2.2.2’de verilmiştir. Sürücü kartı üzerindeki lojik devreler beslemelerini bu konektördeki 5V bacağı üzerinden alırlar. Kart üzerinde bir adres konfigürasyon devresi olup bir jumper teli lehimlenerek kart üzerindeki port adresleri Tablo-3.6 daki gibi sabitlenmiştir.

Tablo-3.6 Güç kontrol kartı giriş / çıkış portları

I/O Adresi:	Okunur	Yazılır	Açıklama
88H		x	d3:mod, d2:enable\, d1:yön, d0:fren\
89H	x		d2:index, d1:ENCB, d0:ENCA
89H		x	Motor akımı bilgisi ( 0 - 255)

### 3.3.2 Motor enkoder bağlantısı

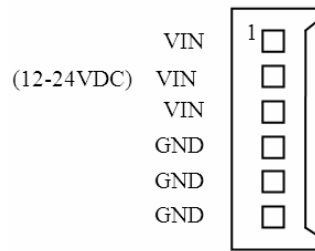
Motor enkoder konnektörü DSP kartı üzerindeki konnektörden farklı görünse de aynı enkoder sinyallerini taşımaktadır (Şekil 3.12). Kutu üzerindeki konnektör ve bağlantıları ise tamamen aynı düzendedir. Bu yüzden motordan gelen enkoder kablosu da diğer enkoder kablosu ile aynı şekilde olmalıdır. Sinyallerin açıklamaları DSP enkoder portunda olduğu gibidir.



Şekil-3.12 Motor enkoder konnektör bağlantıları

### 3.3.3 Sürücü güç besleme girişi

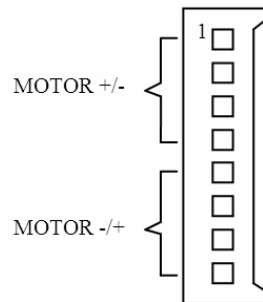
Sürücüyü besleyen güç kaynağının bağlandığı konnektördür (Şekil 3.13). Maksimum gerilim 45V'ü geçmemelidir. Motordan gelen endüktif parazitlere (spike) ve motor aşırı akımlarına karşı korunumlu olmalıdır. Bu şartlara uygun bir regüleli güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil-3.13 Sürücü güç besleme girişi konnektörü

### 3.3.4 Motor PWM kontrollü güç çıkışı

Sürücü çıkışı bu konnektör üzerinden empedansı düşük bir kablo ile motor fırçalarına verilmektedir. Endüktansın düşük olması spike'ların genliğini düşük tutmada etken olacaktır. Konnektör soket direncini düşük tutmak amacıyla her iki kutup için de birden fazla konnektör bacağı kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil-3.14 Motor PWM kontrollü güç konnektörü

## BÖLÜM 4

### MALİYET ANALİZLERİ

Ters sarkaç sistemlerinin fiyatları, kullanılan malzemelerin fiyatlarıyla karşılaştırılarak incelendiği zaman oldukça yüksek bulunabilir. Bunda en büyük etken kuşkusuz mühendislik faktörüdür [6]. Bu faktörün getirdiği maliyetin satılan sistemler üzerindeki yükü satılan sistem sayısı ile ters orantılıdır. Örneğin 30 bin dolarlık bir mühendislik yükünün 2 yılda amorti edilmesi bekleniyor ve yılda ortalama 10 sistem satılacağı hesaplanıyorsa;

$$\text{sistem başına mühendislik yükü} = \text{toplam mühendislik maliyeti/amortisman süresinde satılan sistem}$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Yani;

$$\text{sistem başına mühendislik yükü} = 30000 \text{ dolar} / (2 \text{ yıl} * 10 \text{ adet}) = 1500 \text{ dolar/adet}$$

olacaktır. Bu mühendislik yükü maliyetlere eklenmelidir. Mühendislik fiyatının çok yüksek rakamlara çıktığı durumlarda unutulmaması gereken en önemli nokta, mühendisliğe göre market fiyatını belirlemek değil, rekabet edebilecek fiyatta mühendisliğin karşılığının alıp alınamayacağıdır. Bu yüzden bir ürünün üretimi öncesi fizibilite çalışmalarının, bu anlamda iyi yapılması gereklidir [6].

Bu bölümde maliyet analizleri yapılırken maliyet tabloları üç ayrı başlıkta araştırılmaya çalışılmıştır. Bölüm 4.1de Avrupa veya A.B.D. de ki özel bir firmada böyle bir ürün üretilmeye kalkılırsa maliyetlerin nasıl olacağı incelenmiştir. Bölüm 4.2 de “aynı ürün Türkiye’de bir özel firmada üretilmeye kalkılırdı maliyetler ne olurdu” konusu benzer şekilde incelenmeye alınmıştır. Son olarak Bölüm 4.3 kendi maliyetlerimizi göstermektedir. Maliyetler karşılaştırıldığında bazı parçaların fiyatlarını daima koruduğu, bazı parçaların işçiliğinin düşük oluşundan dolayı Türkiyede daha uygun fiyatlara maledilebildiği ve bazı parçaların da zaten alt yapılarımız mevcut olduğundan kendi bünyemizde çok daha ucuza maledilebildiği görülmektedir.

#### 4.1 Yurt Dışı Üretiminde Maliyet Analizleri

Bu başlıkta maliyetler hesaplanırken Amerika Birleşik Devletleri veya Avrupa ülkeleri baz alınmıştır. Çin, Taiwan gibi sanayinin geliştiği ama işçilik maliyetlerinin aşırı düşük olduğu, ülke politikalarının üretimi aşırı desteklediği ülkelerde maliyetin tahmini zor olacaktır. Bu tür ülkelerde fiyatların haliyle düşük olabileceği tahmin edilmektedir. Bu konuyu doğrudan rekabet açısından örnek almak doğru olmasa da gözardı etmemekte fayda vardır.

A.B.D. de veya Avrupa'da bu işe yeni giren bir firma tarafından üretilse maliyet tahminleri Tablo 4.1 - 4.5 deki gibi hazırlanabilir. Bu tablolar hazırlanırken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Yaklaşık 3-4 kişilik küçük ölçekli bir firmadır veya firma alt gurubudur,
- Ters sarkaç sistemini projelendirip üretim planına almıştır,
- Ters sarkaç sistemiyle birlikte benzer seviyede ortalama 10 ürünü vardır,
- 2 yıl içinde toplam 20 kadar ters sarkaç satılacak ve piyasaya doycaktır.

Tablo 4.5 incelendiğinde en büyük maliyet unsurunun kuşkusuz araştırma-geliştirme (AR-GE) maliyeti olduğu açıkça görülebilir. Yüzde onluk bir kar payı büyüme için, yüzde onluk bir kar payı da risk faktörü olarak eklenirse satış fiyatının 7705 dolar civarına çıktığı hesaplanmaktadır. Bu avrupa veya A.B.D. üniversiteleri için yüksek bir fiyat görünmese de Türkiye gibi ekonomisi zayıf ülkeler için iki defa düşünülmesi gereken bir rakamdır. Hatta, bu yurt dışı ülkeler için dikkate alındığında, kendi yerli pazarları daha büyük olduğundan satış adetleri de yüksek olacaktır. Satış adeti arttıkça AR-GE amortisman maliyetleri, seri imalat maliyetleri ve dolaylı maliyetler düşecektir. Yani bu ülkelerde böyle bir satış fiyatı üretici firma için fizibl görülebilir.

Maliyet tablolarında biraz açıklamak yapmak gerekebilir. Tablo 4.1 de mühendislik maliyetleri tahmini yapılmıştır. Projede bir makine mühendisinin 2 ay, bir elektronik mühendisinin 2 ay ve bir yazılım mühendisinin 4 ay çalıştığı varsayılmıştır. Bu çalışma tamamen firma bünyesinde çalışan bir mekatronik mühendisi tarafından yapılabileceği gibi, kısmen veya tamamen projelendirilerek dışarıya da verilebilir. Tablo



4.2 de firma genel giderleri 24 ay için hesaplanmış, giderlerin onda birlik kısmı bu ürün maliyetine bindirilmiştir. Tablo 4.3 projenin finansman maliyetlerini göstermektedir. Finansmanın dolar bazında yüzde 10 ile sağlandığı varsayılmıştır. AR-GE giderlerinin bir kısmı zamanla geri ödeneceğinden maliyete oluşturacağı faizin %66 lık bir kısmı eklenmiştir. Dolaylı maliyetlerin ortalama altı ayda bir geri döneceği düşünülerek 6 aylık (=2yıl/4) kısmı hesaba alınmıştır. Her partide toplam 5 sistemin üretileceği dikkate alınmış, bu yüzden üretim finans faiz giderleri bu bazda hesaplanmıştır.

Tablo 4.1 Yurt dışı üretiminde mühendislik AR-GE maliyet tahminleri

Açıklama	Saat	Saat maliyeti (USD)	Toplam (USD)
Mekanik donanım tasarımı	320	40	12800
Elektronik donanım tasarımı	320	40	12800
Yazılım çalışmaları	640	40	25600
		Toplam	51200

Tablo 4.2 Yurt dışı üretiminde 2 yıllık dolaylı maliyet tahminleri

Parça	Ay	Aylık maliyet (USD)	Toplam (USD)
Yönetim	24	5000	120000
Pazarlama	24	5000	120000
Aylık sabit giderler ( Kira, elekt vs )	24	1000	24000
		Toplam	264000
1/10 luk katkı payı		Toplam/10	26400

Tablo 4.3 Yurt dışı üretiminde ortalama finansal maliyet tahminleri

Parça	Yıllık %10, ( 2 yıl )	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
AR-GE MALİYETLERİ FAİZ GİDERLERİ	20%	0.66*51200	6758
DOLAYLI MALİYETLER FAİZ GİDERLERİ	¼* 20%	26400	1320
ÜRETİM FİNANS FAİZ GİDERLERİ	20%	10175	2035
		Toplam	10113

Tablo 4.4 Yurt dışı üretiminde malzeme maliyet tahminleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Hassas ray	1	280	280
Hassas ray düzeneği mekanik parça kiti	1	115	115

Tablo 4.4 Yurt dışı üretiminde malzeme maliyet tahminleri (devam)

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Rulman bloğu	1	100	100
Araba düzeneği mekanik parça kiti	1	75	75
Enkoder bloğu	1	250	250
Sarkaç düzeneği mekanik parça kiti	1	30	30
Servo motor	1	250	250
Motor kayış düzeneği mekanik parça kiti	1	135	135
KBD display kartı	1	100	100
DSP veya controller kartı	1	200	200
Motor sürücü kartı	1	200	200
Güç kaynağı	1	100	100
Kutulama	1	200	200
		Toplam	2035

Tablo 4.5 Yurt dışı üretiminde ürün başına genel maliyet tahminleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Sistem başına parça maliyetleri toplamı	1	2035	2035
Sistem başına düşen AR-GE maliyeti (toplam 20 sistem üzerinden)	1/20	51200	2560
Dolaylı maliyetler katkı payı	1/20	26400	1320
Finans maliyeti katkı payı	1/20	10113	506
		Toplam	6421

## 4.2 Yurt İçi Üretiminde Maliyet Analizleri

Bu bölümde maliyetler hesaplanırken Türkiye’de işe yeni giren yerli bir firma gözönünde tutulmuştur. Bölüm 4.1 deki varsayımlarla yola çıkılmıştır. Ancak tahminler yapılırken Türkiye koşullarındaki işçilik ve mühendislik maliyetleri ve imkanları da ön plana alınmıştır (Tablo 4.6 – 4.10) . Türkiyede finans faiz oranlarının yüksek oluşu ayrıca ürün başına maliyetlere birkaç yüz dolar etki yapmıştır. Türkiye için risk payının %20, büyüme payının da %10 şeklinde ürün bedeline eklenmesiyle ürünün satış fiyatının 5500 dolarları bulacağı hesaplanabilir. Türkiye’de bu fiyat çok ucuz görünmese de kalite ve satış sonrası desteklerle makul karşılanabilir. Maliyetler AR-GE giderleriyle doğru, satılan toplam ürün sayısı ile ters orantılıdır. Bu yüzden satış adeti sınırlıysa ar-ge giderlerine azami itina gösterilmelidir. Malzeme maliyetlerinin yüksek finansman faizlerini az etkilemesi için üretilen parti adeti optimize edilmelidir.

Bu ürünü genelde üniversite gibi eğitim kurumları alacağından ve Türkiye’de sayıları belli olduğundan komşu ülkelere ihracat yolları da araştırılmalıdır. Ürünün baştan ne kadar satılabileceği hesabının iyi yapılabilmesi de maliyetteki risk faktörünü azaltacaktır.

Tablo 4.6 Yurt içi üretiminde mühendislik AR-GE maliyet tahminleri

Açıklama	Saat	Saat maliyeti (USD)	Toplam (USD)
Mekanik donanım tasarımı	320	20	6400
Elektronik donanım tasarımı	320	20	6400
Yazılım çalışmaları	640	20	12800
		Toplam	25600

Tablo 4.7 Yurt içi üretiminde 2 yıllık dolaylı maliyet tahminleri

Parça	Ay	Aylık maliyet (USD)	Toplam (USD)
Yönetim	24	3000	72000
Pazarlama	24	3000	72000
Aylık sabit giderler ( Kira, elekt vs )	24	800	19200
		Toplam	163200
1/10 luk katkı payı		Toplam/10	16320

Tablo 4.8 Yurt içi üretiminde ortalama finansal maliyet tahminleri

Parça	Yıllık %20, ( 2 yıl )	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
AR-GE MALİYETLERİ FAİZ GİDERLERİ	40%	0.66*25600	6758
DOLAYLI MALİYETLER FAİZ GİDERLERİ	¼*40%	16320	1632
ÜRETİM FİNANS FAİZ GİDERLERİ	40%	7930	3172
		Toplam	11562

Tablo 4.9 Yurt içi üretiminde malzeme maliyet tahminleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Hassas ray	1	280	280
Hassas ray düzeneği mekanik parça kiti	1	115	92
Rulman bloğu	1	100	100
Araba düzeneği mekanik parça kiti	1	75	60
Enkoder bloğu	1	250	250
Sarkaç düzeneği mekanik parça kiti	1	30	24

Tablo 4.9 Yurt içi üretiminde malzeme maliyet tahminleri (devam)

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Servo motor	1	250	250
Motor kayış düzeneği mekanik parça kiti	1	135	80
KBD display kartı	1	100	50
DSP veya controller kartı	1	200	200
Motor sürücü kartı	1	200	50
Güç kaynağı	1	100	50
Kutulama	1	200	100
		Toplam	1586

Tablo 4.10 Yurt içi üretiminde ürün başına genel maliyet tahminleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Sistem başına parça maliyetleri toplamı	1	1586	1586
Sistem başına düşen AR-GE maliyeti (toplam 20 sistem üzerinden)	1/20	25600	1280
Dolaylı maliyetler katkı payı	1/20	16320	816
Finans maliyeti katkı payı	1/20	5681	578
		Toplam	4260

### 4.3 Üniversite İmkanları ile Maliyetler

Bu bölümde maliyetler hesaplanırken kendi imkanlarımızla elde ettiğimiz gerçek maliyetler sunulmuştur. Enkoder bloğu olarak ihtiyaç fazlası bir servo motor modifiye edilerek kullanılmış ve malzeme maliyetini bir miktar azaltmıştır.

Mühendislik, akademik bir çalışmanın parçası olarak yapıldığından ürünün üniversite tarafından piyasaya sunulması oldukça uygun olacaktır. Kar oranı AR-GE maliyeti yokmuş gibi düşünülmesinden dolayı yüksek çıkacaktır. Kar oranı makul düzeye çekilerek satış kolaylığı sağlanabilir. Üniversite döner sermayesi ile malzemeler temin edilip, montajı ve satışı üniversite tarafından yapılabilir. Konuyla ilgili bir asistan, vaktinin yüzde yirmisi için bu işle görevlendirilebilir. Bu ilgili kişi için eğitici ve öğretici bir çalışma da olacaktır.

Başka bir açıdan bakıldığında; bölümün eğitimde kullanılmak üzere böyle bir kontrol sistemine ihtiyacı bulunmaktadır. Yani sadece bir adetinin yapılıp bölüme kazandırılması dahi kayda değecek bir tecrübe sayılabilir.

Tablo 4.11 Kendi imkanlarımızdaki üretimde malzeme maliyetleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Hassas ray	1	280	280
Hassas ray düzeneği mekanik parça kiti	1	92	92
Rulman bloğu	1	100	100
Araba düzeneği mekanik parça kiti	1	60	60
Enkoder bloğu	1	50	50
Sarkaç düzeneği mekanik parça kiti	1	24	24
Servo motor	1	250	250
Motor kayış düzeneği mekanik parça kiti	1	80	80
KBD display kartı	1	50	50
DSP veya denetleyici kartı	1	200	200
Motor sürücü kartı	1	50	50
Güç kaynağı	1	50	50
Kutulama	1	100	100
		Toplam	1386

Tablo 4.12 Üniversitenin üretmesi ile oluşacak maliyet tahminleri

Parça	Adet	Adet Fiyatı (USD)	Toplam (USD)
Sistem başına parça maliyetleri toplamı	1	1386	1386
Dolaylı maliyetler katkı payı ( ilgili bir şahsın vaktinin bir kısmı ile görevlendirilmesi )	0.2	1000	200
		Toplam	1586

## **BÖLÜM 5**

### **TERS SARKAÇ SİSTEMLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Ters sarkac sistemleri otomatik kontrol tekniklerini masa üstünde gayet güzel bir şekilde sergileyebilirler. Bu sistemler modern kontrol metodlarını heyecanla izlenebilir şekilde sunmaya elverişlidirler.

Bir kalemin veya çubuğun, işaret parmağımızın ucunda dik bir şekilde dengede tutulmaya çalışılması, bir ters sarkacın çalışmasını sınıfta tarif edebilmek için uygun bir yöntemdir. Bu kontrol işlemini fiziksel bir sistemde gerçekleştirerek öğrencilere sunabilmek, onların da kontrol metodlarını test edebilmelerini sağlayabilmek kuşkusuz çok faydalı bir eğitim şekli olacaktır. Algoritmalarını test ederken sarkaç çubuğuna parmakları ile dokunarak sisteme dışarıdan etki verebilmeleri ve sistemin tepkilerini gözlemleyebilmeleri eğitim açısından oldukça etkili olacaktır. Bu şekildeki uygulamalar problemlerin ve çözümlerin kalıcı bir şekilde kafalara yerleşmesinde önemlidir.

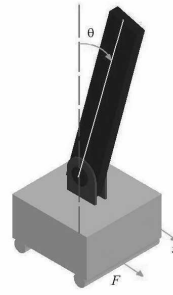
Ters sarkaç sistemleri karşımıza farklı konfigürasyonlarda çıkabilmektedir. Bunlardan en klasığı parmak-çubuk örneğine benzeyen bir düzenektir. Yani motorla tahrik edilerek hareket ettirilebilen bir araç (parmak) ve bu araç üzerinde serbestçe hareket edebilen bir kol (çubuk) bulunmaktadır. Bu konfigürasyondaki düzenekler iki serbestlik derecesi olan sistemler olarak isimlendirilirler. Bu bölümdeki deneysel çalışmaların tümü bu konfigürasyonda yapılmıştır.

#### **5.1 Ters Sarkaç Konfigürasyonları**

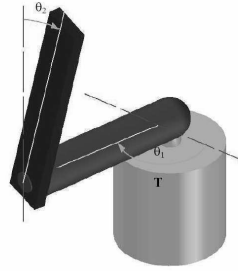
Ters sarkaçlar doğrusal, dairesel veya bunların farklı şekillerde biraraya gelmeleriyle oluşan kompleks düzenekler şeklinde olabilir. Doğal olarak eklem sayısı arttıkça veya fiziksel hareket konfigürasyonları değiştikçe denge problemini ifade eden denklemler de değişecektir. Diğer bir deyişle, farklı kontrol problemleri üzerine çalışmak amacıyla farklı konfigürasyonlar da kurulabilir. Şekil 5.1- Şekil 5.5 te kullanılan grafikler kaynak [6] dan alıntıdır.

### 5.1.1 İki serbestlik dereceli konfigürasyon

Doğrusal veya dairesel hareket eden bir taban üzerine bir eklemlerle bağlanmış ikinci bir hareketli parçaya sahip düzenekler iki serbestlik derecesine sahip düzenekler olarak adlandırılmaktadır [6]. Şekil 5.1 ile temsil edilen örnekte doğrusal hareket eden bir araç ve bu araca bağlı oynak bir çubuk bulunmaktadır. Şekil 5.2 ile temsil edilen sistemde ise taban, sabit bir merkez etrafında dönen bir platformdur. Harekete etki eden faktörler modellendiğinde farklılıklar göstermesi normaldir.



Şekil 5.1 Doğrusal hareketli ve iki serbestlik dereceli (tek eklemler) konfigürasyon

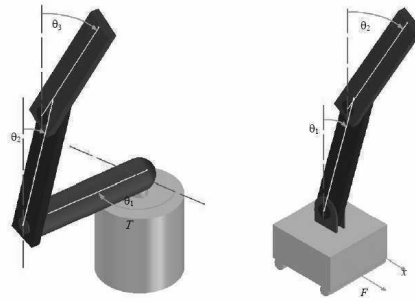


Şekil 5.2 Dairesel hareketli ve iki serbestlik dereceli (tek eklemler) konfigürasyon

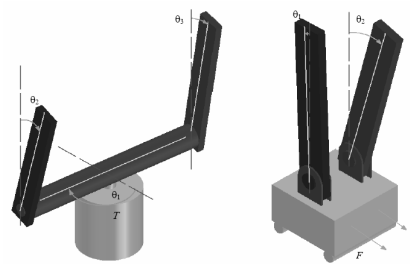
### 5.1.2 İki den fazla serbestlik dereceli konfigürasyonlar

İki den fazla serbestlik derecesine sahip farklı sarkaç konfigürasyonları Şekil 5.3 – Şekil 5.5 te verilmektedir [6] . Bunların dışında üç hatta dört eklemler modeller piyasada mevcuttur ve pratikte kontrolleri de yapılabilmektedir. Ayrıca eklem yerleri silindirik yerine küresel yapıldığında farklı konfigürasyonlar karşımıza çıkacaktır. Küresel eklemler ve pratikte kontrol edilebilmiş farklı örnekler mevcuttur.

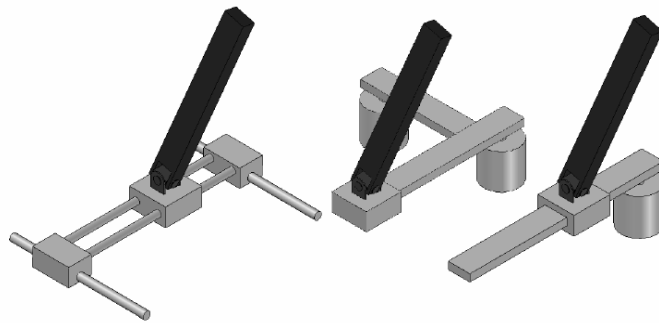
Eklemler arttıkça ve konfigürasyonlar değiştikçe sistemlerin dinamikleri değişecek dolayısıyla kontrol sistemlerindeki matematiksel modellemeler de zorlaşacaktır.



Şekil 5.3 Dairesel çift eklemlili ve doğrusal çift eklemlili sarkaç konfigürasyonları



Şekil 5.4 Dairesel paralel çift eklemlili ve doğrusal paralel çift eklemlili sarkaç konfigürasyonları



Şekil 5.5 Düzlemsel tek eklemlili sarkaç konfigürasyonları ( doğrusal-doğrusal, dairesel-dairesel ve dairesel doğrusal )



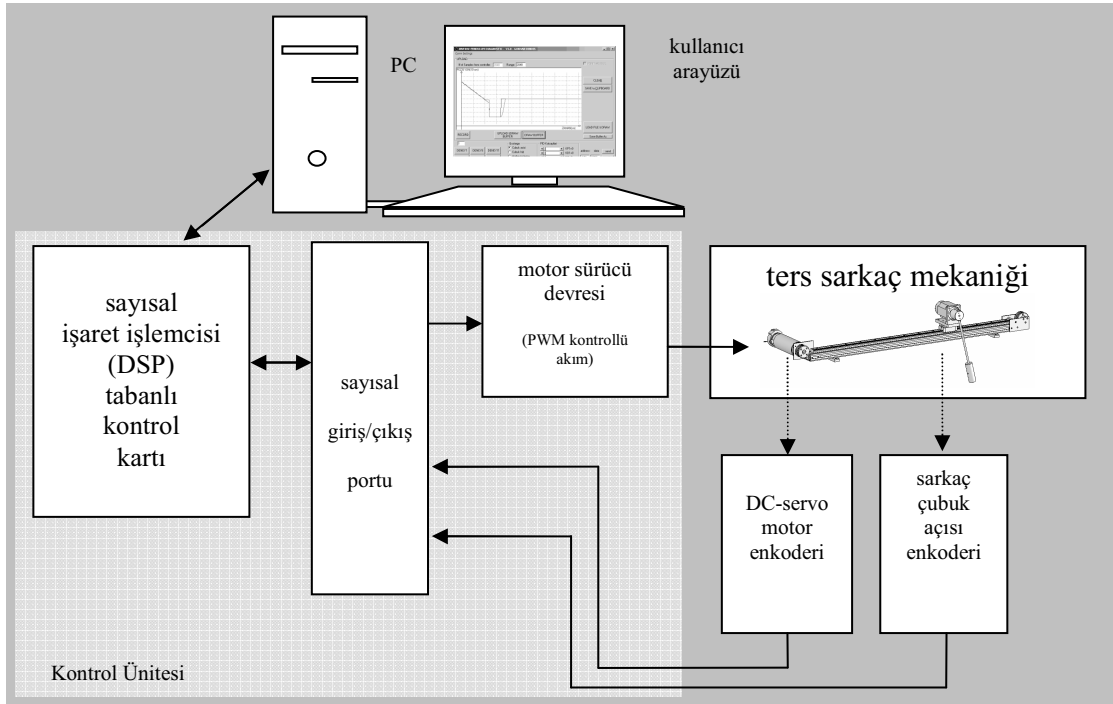
## 5.2 Sarkaç Kontrol Sistemi

Kontrol sistemi iki parçadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki algoritmaları hızlı bir şekilde gerçek zamanlı olarak uygulayan Sayısal Sinyal İşlemci (DSP) tabanlı kontrol ünitesidir. İkinci parça ise kontrol ünitesinde çalışacak algoritmaların hazırlandığı ve kontrol ünitesi ile bilgi alışverişinin yapıldığı bir kişisel bilgisayardır (PC) .

PC de kontrol algoritmalarının hazırlandığı bir geliştirme ortamı mevcuttur. Burada hazırlanan algoritmalar, algoritmaların çalışabileceği kütüphanelerle birleştirilmiş ve kontrol programı oluşturulmuştur. Bu kontrol programı kontrol ünitesine kalıcı olarak kaydedilmiştir. Sonraki geliştirme çalışmaları aynı şekilde yapılabileceği gibi, her kullanım öncesinde seri haberleşme kablosu üzerinden kontrol ünitesine aktarılabilir.

PC de ayrıca hazırlanmış bir kullanıcı arayüzü mevcuttur. Bu arayüzü ile kontrol ünitesine kontrol parametreleri gönderilebildiği gibi kontrol ünitesinden kayıt edilmiş grafik verileri de okunabilmekte ve grafikleri incelenebilmektedir.

Gerçeklenen sarkaç kontrol sisteminin blok diagramı Şekil 5.6 da verilmiştir. Kontrol ünitesine arabaya (araç) tahrik veren DC-motor enkoderinden ve sarkaç eklemine bağlı çubuk açısı enkoderinden ardışıl darbe girişleri gelmektedir. Bu darbeler sistemde sayısal olarak araç konumu ve sarkaç açısı bilgilerine dönüştürülmektedir. Yine ardışıl olarak örnekleme zamanları da hesaba katılarak önceki verilere göre değişim hızları çıktıları oluşturulmakta, belirlenmiş referanslara göre hata ve hata değişimleri bilgileri sayısal olarak elde edilmektedir. Motor sürücü devresi motoru kontrol kartından sayısal olarak gelen akım bilgisiyle orantılı bir akımla beslemektedir.



Şekil 5.6 Kontrol sistemi blok diagramı

### 5.3 PC Geliştirme Ortamı

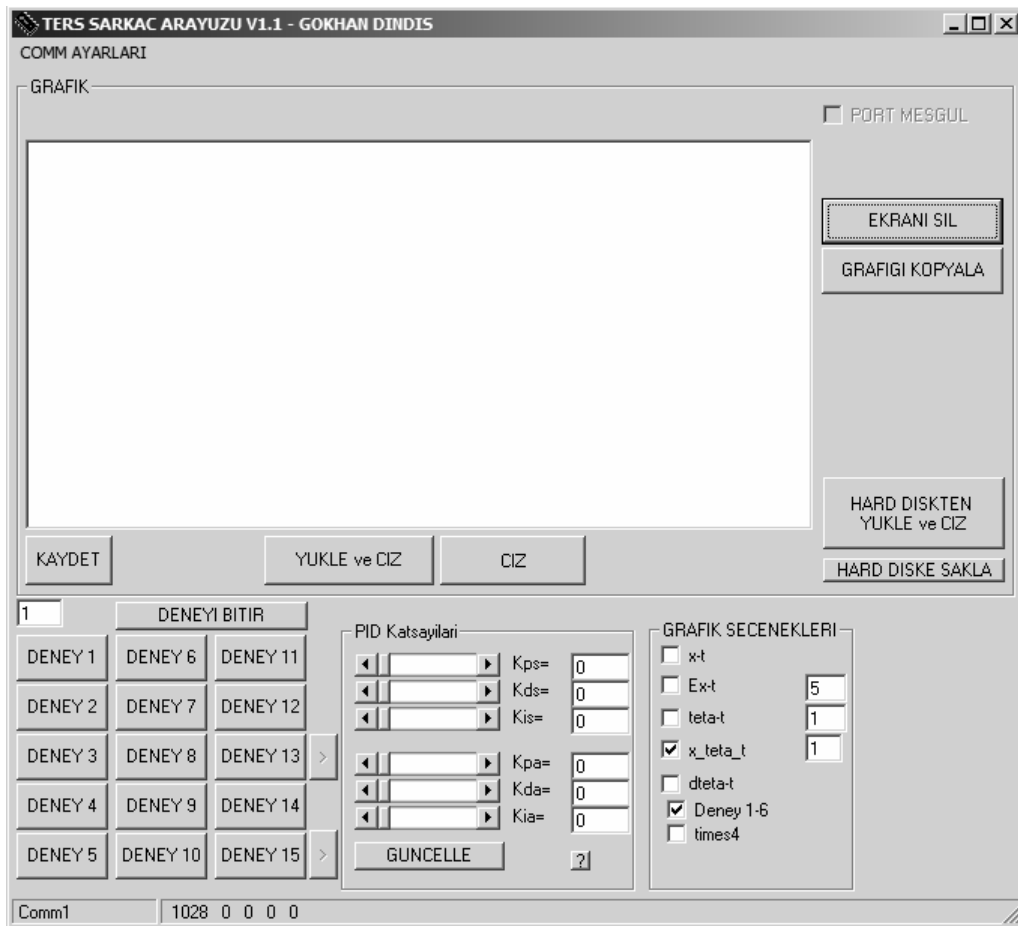
PC geliştirme ortamında DSP kodlarını derleyecek ve kontrol ünitesine aktarılmasını sağlayacak programlar, kontrol algoritmaları örnekleri ve bunların birleştirilerek kullanılabilmesi için alt yapıyı oluşturan kütüphaneler mevcuttur. DSP kodları WordPad, NotePad gibi standart Windows programlarıyla yazılabilir ve bu tamamen kullanıcıya bırakılmıştır.

Kullanıcının program veya algoritma yazabilmesi için Analog Device firmasının ADSP21xx serisi DSP ailesini biliyor olması gerekmektedir. Daha sonra yapılması gereken Pendulum.dsp dosyasındaki örnekler incelenerek benzer iskeletlerde yeni algoritmaların yazılması şeklinde olacaktır.

PC geliştirme ortamı DSP sistemleri konusunda uzmanlık gerektireceği için kontrol eğitimi alan öğrencilerin kendileri için tasarlanmış arayüzü kullanarak deneyleri yürütmeleri öngörülmüştür. Burada verilmekte olan tasarımcıya yönelik bilgiler kullanılarak ilave yazılımlar ile PC geliştirme ortamı daha geniş kullanıcı gurubuna hitap edebilir.

#### 5.4 Kullanıcı Arayüzü

Kullanıcı ara yüzü ile PC üzerinden kontrol ünitesine erişilebilmesi mümkündür. Bunun için PC-COM portu ile kontrol ünitesi arasına bir seri kablo bağlanması gerekmektedir. Seri portu olmayan dizüstü türündeki PC ler için USB den RS232 seri kablo çeviricileri piyasada mevcuttur. Program Windows 98, ME ve XP işletim sistemlerinde denenmiştir. Kullanıcı arayüzü ekranı Şekil 5.7 de görüldüğü gibidir. Deneyleri başlatmak, deneylerde gereken kontrol parametrelerini değiştirebilmek, herhangi bir anda kayıt başlatılabilmek, kaydı PC ye aktarabilmek, grafik çizilebilmek ve hard-diske arşivleme yapabilmek için gerekli kontroller görülmektedir. Kullanıcı arayüzü programı Visual Basic Sürüm.5 ile hazırlanmıştır.



Şekil 5.7 Kullanıcı arayüzü

Kayıt işlemi başlatıldığında yaklaşık 11 saniyelik bir veri kaydı yapılır. 5 ms de alınan araç hatası, sarkaç açısı hatası ve hızlarının örnekleri PC ye aktarılarak grafikleri incelenebilir. 11 saniye yapılan deneylerde sistemin davranışını gözlemlemek için yeterli olmuştur. Grafik opsiyonları alınan kayıt örneklerine değiştirilebilir. Örneğin Deney-1 Deney-6 arası genelde araç konum ve hata grafikleri, Deney-7 ve sonrasında ise araç hatası, çubuk açısı hatası ve çubuk açısal hızı grafikleri incelenmiştir. Uzun zaman gerektiren gösteri mahiyetindeki deneyler için kayıt süresi artırılabilir.

Arayüzü kullanımda bazı detaylar aşağıda listelenmiştir:

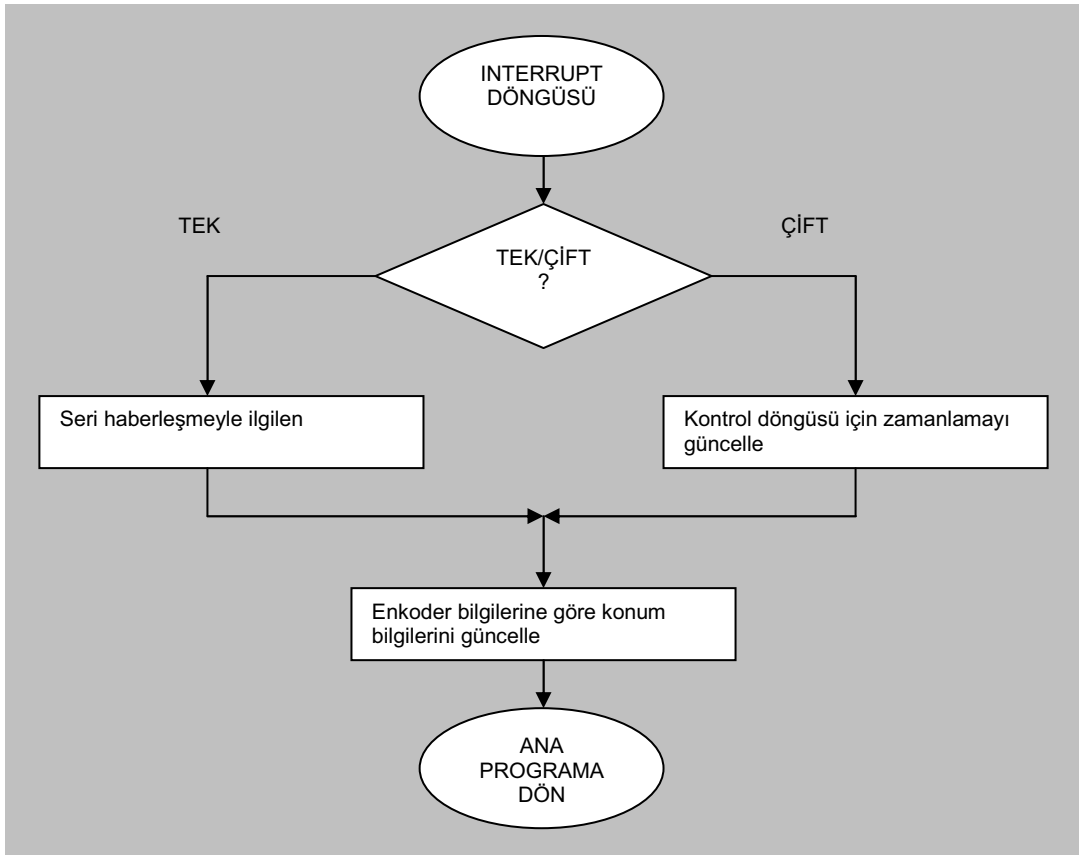
- DENEY 1- DENEY 15 butonları : ilgili deneyi başlatmak,
- PID Katsayıları Tabelasındaki Kontroller : katsayıları değiştirip GÜNCELLE butonu ile kontrol ünitesine aktarmak,
- KAYIT butonu : kontrol ünitesinde veri kaydını başlatmak,
- YUKLE ve CIZ butonu : kaydedilmiş verileri kontrol ünitesinden PC ye aktarmak,
- CIZ butonu : mevcut grafiği silmeden yeni grafik çizmek,
- HARD DISKTEN YUKLE ve CIZ butonu : verileri hard-diskteki dosyadan çekmek ve çizmek,
- HARD DISKE SAKLA butonu : Arayüzüne aktarılan verileri hard diske saklamak,
- EKRANI SIL butonu : grafik alanını silmek,
- GRAFİĞİ KOPYALA butonu : grafiği başka bir uygulamaya yapıştırılabilmek üzere Windows'a kopyalamak,
- GRAFIK SECENEKLERI paneli : yeni çizilecek grafikler için seçeneği belirlemek,
- COMM AYARLARI menüsü : PC de kontrol ünitesinin bağlı olduğu COM-PORT unu seçmek içindir.

## 5.5 Kontrol Ünitesi Yazılımı

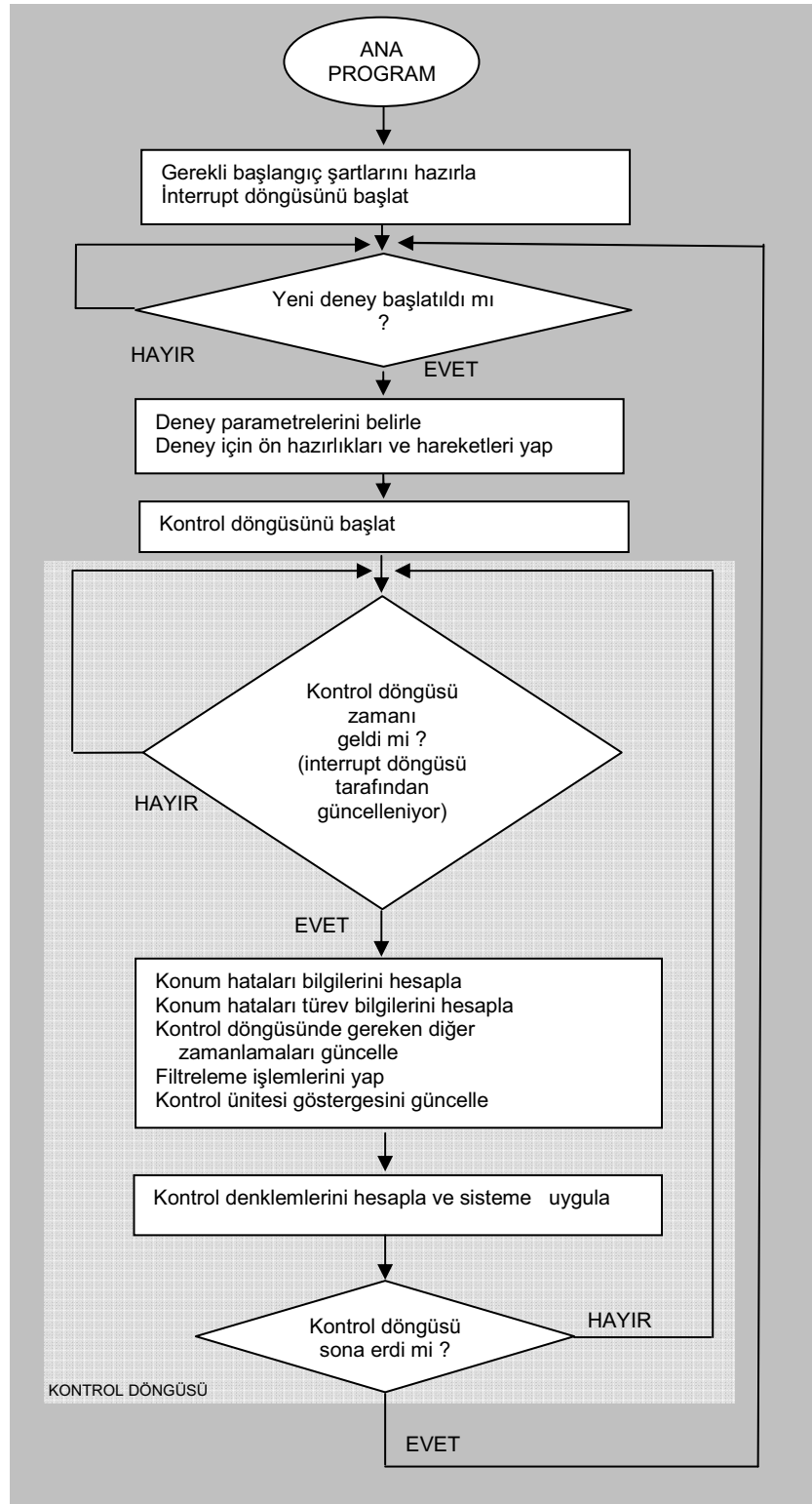
Kontrol ünitesindeki yazılım iki grupta incelenebilir. Bunlardan ilki hassas zamanlama ve örneklemelerin yapıldığı interrupt yazılımı, diğeri ise bu interrupt yapısıyla uyumlu bir şekilde çalışan kontrol yazılımıdır.

Interrupt yazılımı arka planda sürekli olarak çalışan bir döngüden ibarettir. Bu kısımda enkoder bilgilerinin eksiksiz gözlenerek sayısal konum bilgilerine dönüştürülmesi, seri haberleşmenin kesintisiz olarak sağlanması ve bazı zamanlama parametrelerinin güncellenmesi işleri yapılmaktadır. Interrupt yazılımı blok diagramı Şekil 5.8 de verilmiştir. Her 8.6875µs de bu döngü tekrarlanmaktadır.

Ana program yapısı interrupt yazılımını başlattıktan sonra PC den deney numarası bekleyen bir döngüye girmektedir. Deney numarası geldikten sonra ilgili deneye ait kontrol yazılımı başlatılmaktadır. Kontrol yazılımına ait ana döngü Şekil 5.9 da verilmiştir.



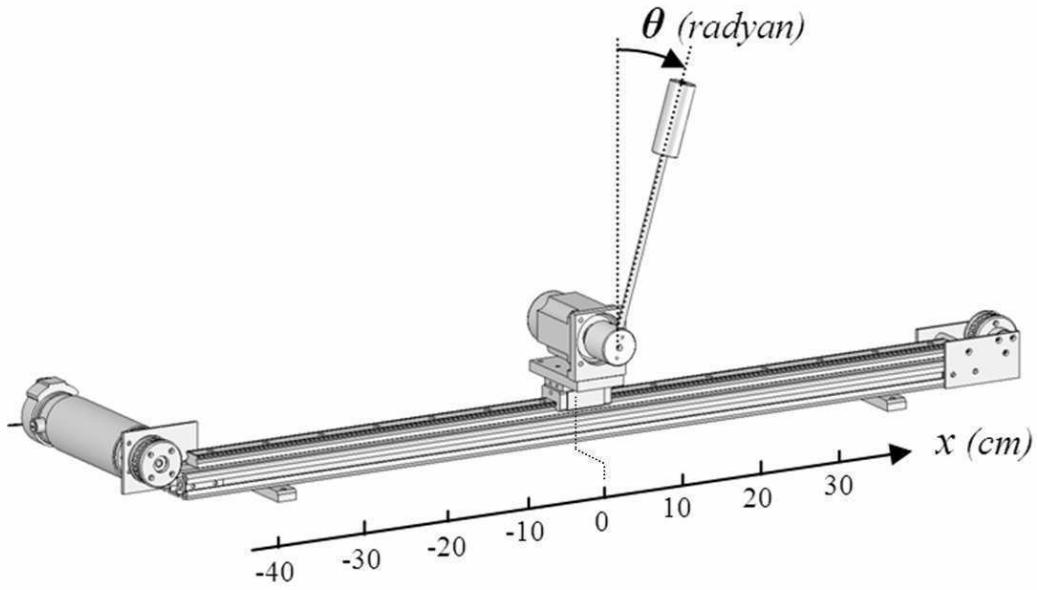
Şekil 5.8 İnterrupt döngüsü akış diyagramı



Şekil 5.9 Ana program akış diyagramı

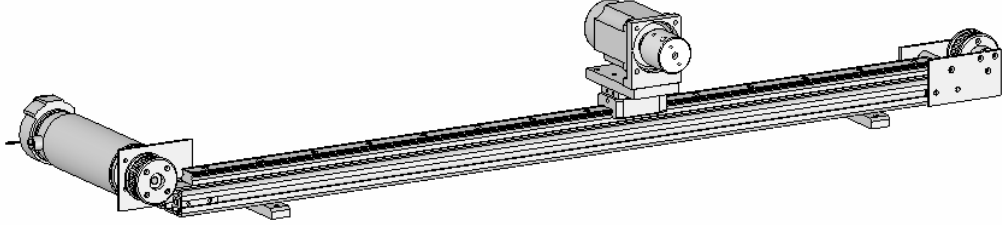
## 5.6 Kontrol Uygulamaları

Sistemin kontrol edilebilirliğini ve aynı zamanda eğitim amaçlı kullanılabilirliğini doğrulayıcı şekilde özen gösterilerek çeşitli uygulamala çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar “Deney” alt başlıkları altında toplanmıştır. Uygulamalarda elde edilen verilerin grafiklerinde  $x$  araç konumunu cm türünden,  $\theta$  ise çubuk açısını radyan türünden temsil etmektedir. Araç konum eksenini ve çubuk açı tanımları Şekil 5.10 da gösterilmektedir. Deneyler yapılmadan önce teorik literatür taranmak istenirse PID kontrol için [15], ters sarkaç denge problemleri için [4], [5], [6], [12], [13], [15], [16], [19], ters sarkaç dikme problemleri için [1] [3], [4], [6], [9], [10], [14], [16], [19] ve [21] - [26] incelenebilir.



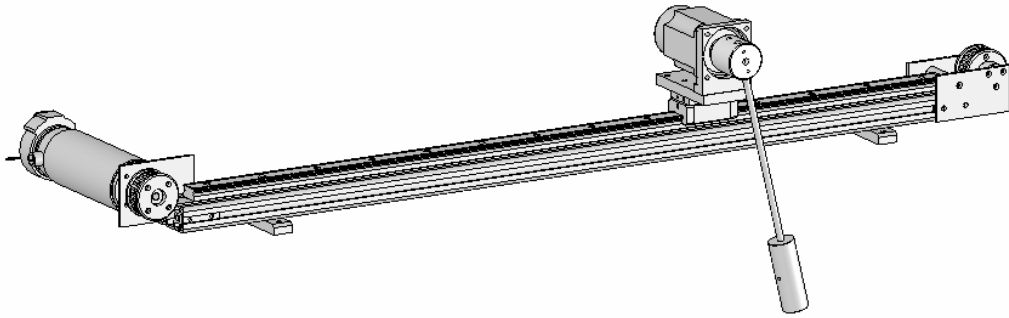
Şekil 5.10 Araç konumu ve çubuk açısı tanımları

Uygulama çalışmalarına donanımın isteklerimizi karşılayacak şekilde doğru çalıştığını gösterecek tür deneylerle başlanmıştır. Deney 1 geri beslemesiz bir deneydir. Deney 2’den Deney 6’ya kadar çalışmalar geri beslemeli; sarkaç çubuğu kullanılmadan yapılan oransal (P), oransal-türevsel (PD) ve oransal-türevsel-integral (PID) kontrol deneyleridir. Deney 1 - Deney 6 için Şekil 5.11 deki düzenek kullanılmaktadır.



Şekil 5.11 Deney 1 - Deney 6 için deney düzeneği

Sarkaç çubuğu Deney 7 ve sonrasındaki deneylerde kullanılmaktadır. Deney 7’de sarkaç açısının başlangıçta bilinmediği farzedilerek sarkaç açısını belirlemeye yarayan bir uygulama yapılmıştır. Daha sonra bu deneyde yapılan işlem diğer bazı deneylerde standart başlangıç işlevi olarak tekrarlanmıştır. Deney 8 çubuk aşağıdayken yapılan bir kontrol deneyidir. Deney 9 çubuk hareketi ile araç hareketi arasındaki bağımlılığı göstermek açısından uygun bir deneydir. Deney 10 sonrası çalışmalar sarkaç çubuğu ile yapılan ve sistemin performansını görmek üzere yapılan uygulamalardır. Deney 7 ve sonrası için Şekil 5.12 deki düzenek kullanılmaktadır.



Şekil 5.12 Deney 7 ve sonrası için deney düzeneği



### 5.6.1 Deney 1- Geri beslemesiz kontrol

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti tahrik motor akımını 1 saniye aralarla belirli yüzdelerle artırarak araç hareketini incelemektir. Hata 10cm'e ulaştığında deney kendiliğinden sona erdirilmektedir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sistem donanım ve yazılım entegrasyonunu test etmektir. Yazılımda belirlenen çıktıların oranlı bir şekilde motora gittiği, motor pozisyonunun okunabildiği, araç referans noktasından uzaklaştıkça hatanın istenilen yönde arttığı onaylanmış olacaktır. Ayrıca bu deneyde aracın hareket ettiği rayın (pist) üzerindeki sürtünmeler de gözlenmiş olacaktır.

#### Deneyin yapılış basamakları :

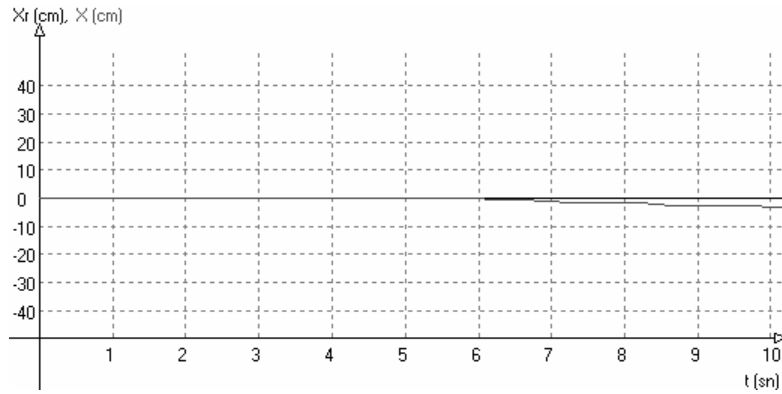
Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç elle pist sonuna 10 cm uzaklıkta bir konuma çekilir.
- 3- PC den "DENEY 1" butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 4- "YUKLE ve CIZ" butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 5- "HARD DISKE SAKLA" butonuna basılır ve dosya ismi verilerek hard-diske aktarılır.
- 6- Araç farklı konumlarda başlatılarak Basamak 2 den itibaren deney üç defa tekrarlanır.

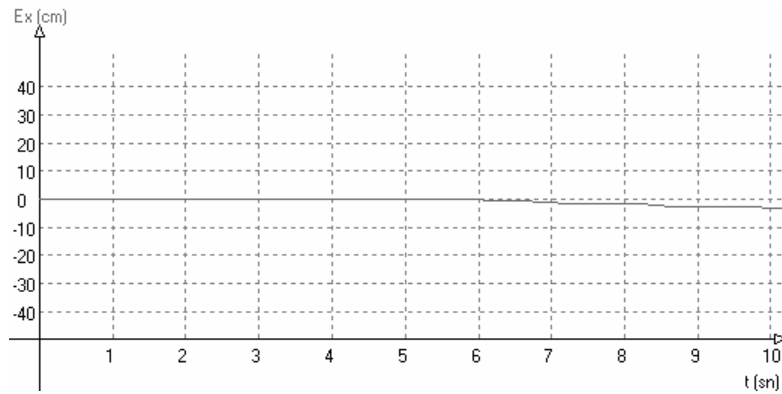
#### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Deney ilk defa yapıldığında sistemin istenilen şekilde çalıştığı gözlenmiş ve onaylanmıştır. Kontrol ünitesi ekranında görülen değer motora sürücü devresine gönderilen sayısal değerdir. Bu değer 20 den başlatılmış ve 75 te son bulmuştur. Motora

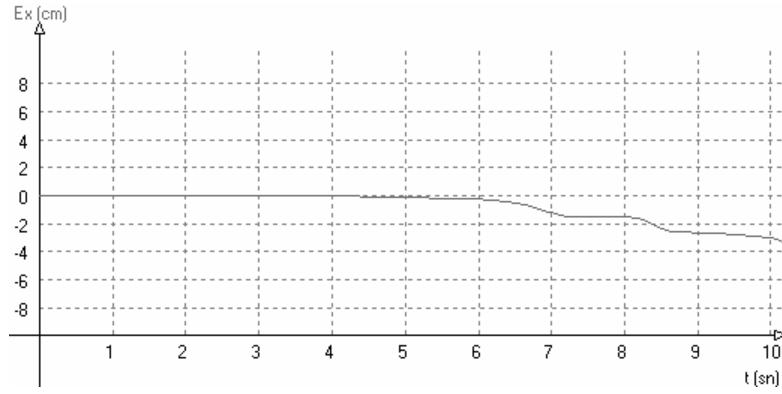
uygulanan akım bu sayıyla doğru orantılıdır. Şekil 5.13 deki grafikten görüleceği gibi motora gönderilen değer 40 civarındayken araç kımıldamaya başlamıştır. Burada  $x_r$  aracın referans konumunu,  $x$  ise aracın gerçek konumunu göstermektedir. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 de üzerine uygulanan kuvvetle konumu değişen aracın hata grafikleri ( $E_x(t)$ ) görülmektedir. Deney aynı konumdan başlatılarak 3 defa tekrarlanmış ve grafikler üstüste getirilerek karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16). Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi pistteki sürtünme kuvveti deneyden deneye küçük farklılıklar gösterebilmektedir. Deney toplamda üç değişik konumdan başlatılarak üçer defa tekrarlanmış ve sürtünme kuvvetlerinin pistin değişik yerlerinde de farklılıklar gösterebildiği sonucuna varılmıştır (Şekil 5.17).



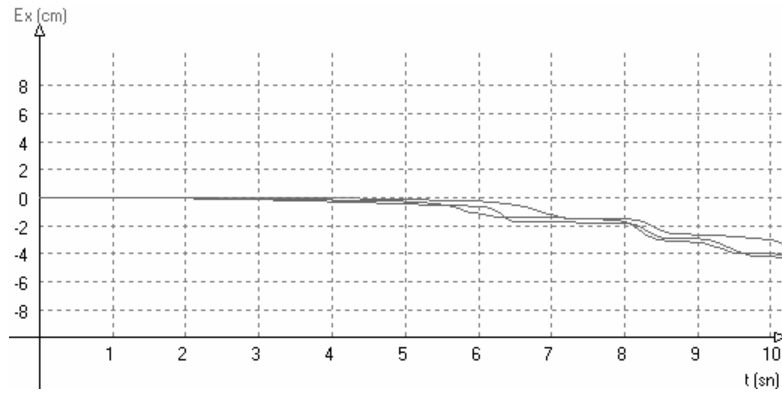
Şekil 5.13 Deney 1, referans ( $x_r$ ) ve konum( $x$ ) grafikleri



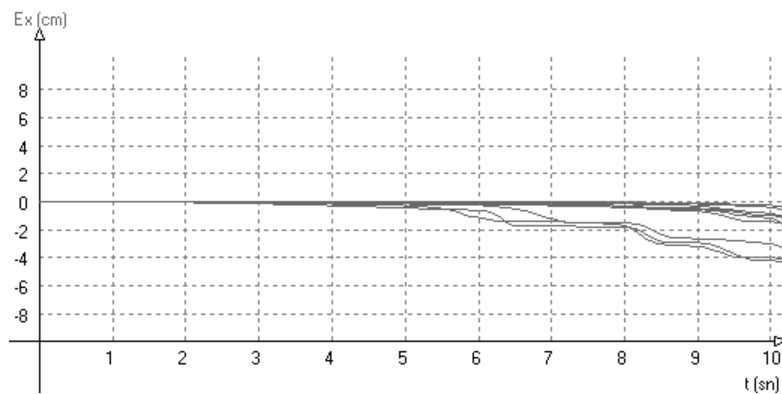
Şekil 5.14 Deney 1, konum hatası ( $E_x(t)$ ) grafiği



Şekil 5.15 Deney 1, uygun ölçekle  $E_x(t)$  grafiği



Şekil 5.16 Deney 1, aynı konumdan başlatılarak üç farklı testin  $E_x(t)$  grafikleri



Şekil 5.17 Deney 1, üç farklı konumdan başlatılarak üçer farklı testin  $E_x(t)$  grafikleri

### 5.6.2 Deney 2- Oransal (P) konum kontrolü

#### Deneyin özeti:

Deneyde araç pist ortasında bir konumdayken birim basamak girdisi verilerek aracın 10 cm geriye zıplatılmaktadır. Bu uygulamaya yapılırken farklı oransal kuvvetlendirme katsayılarının etkileri ayrı ayrı incelenmektedir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sistem donanım ve yazılım entegrasyonunun test edilmesinden sonra basit bir kontrol uygulaması üzerinde denenmesidir. Uygulamadan başarılı sonuç alınması diğer deneylere geçebilmek için yeşil ışık anlamına gelecektir. Tepkilere bakılarak denklem katsayısının doğru yönde uygulandığı ve katsayı değerlerinin doğru sınırlarda olduğu teyit edilmiş olacaktır. Oransal kontrolün seçimi bu aşamada uygulanabilecek en basit kontrol metodu oluşudur. Bilindiği gibi oransal kontrolün denklemi Denklem (5.1) şeklindedir.

$$u(t) = K_{pa} E_x(t) \quad (5.1)$$

Burada  $u(t)$  motora verilecek çıkış,  $K_{pa}$  araç için oransal kontrol katsayısını,  $E_x(t)$  ise araç hata miktarını göstermektedir [15].

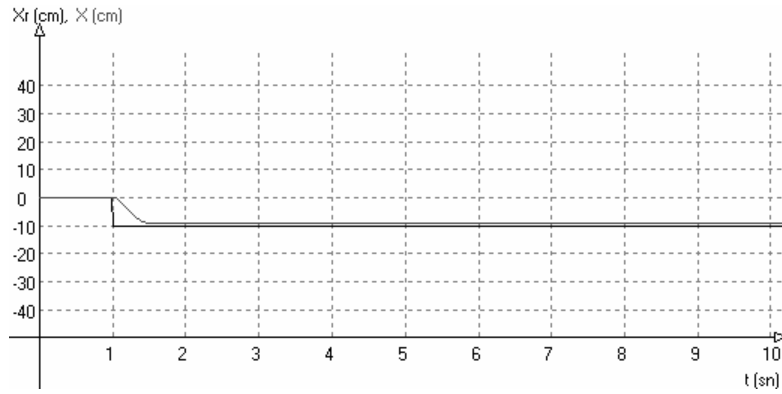
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

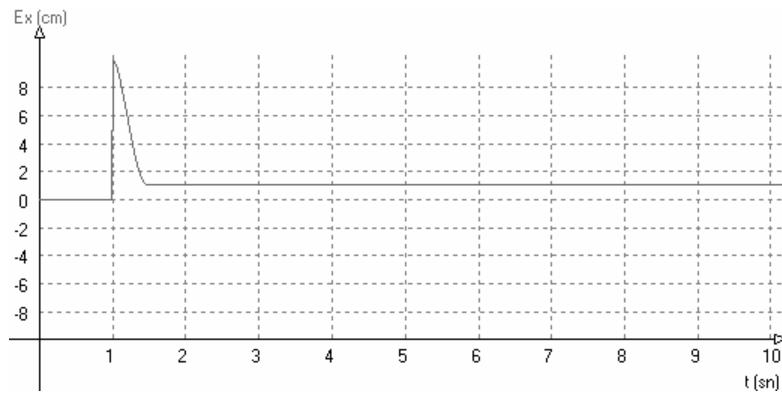
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2-  $K_{pa} = 15$  yapılır.
- 3- Araç elle pist ortasında bir konuma çekilir.
- 4- PC den “DENEY 2” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- Araç için  $K_{pa} = 30, 60, 90, 150, 250, 500$  gibi değerlerle Basamak 3 ten itibaren deney tekrarlanır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

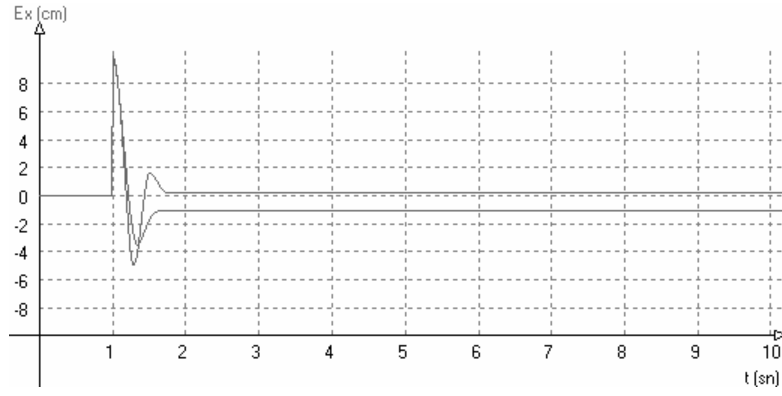
$K_{pa} = 15$  için yapılan deneyde araç yaklaşık yarım saniyede istenilen hedef değerine belirli bir hatayla oturmuştur (Şekil 5.18 - Şekil 5.19). Bu sonuç katsayıların doğru yönde çalıştığını gösterir.  $K_{pa} = 30, 60$  şeklinde artırıldıkça oturma süresinin ve hatanın azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.20) .  $K_{pa} = 250$  ve  $K_{pa} = 500$  gibi yüksek kazanç katsayılar için hatanın sıfıra çok yakın bir değer aldığı, ancak aracın hedef değerine otururken uzun bir süre salınım yaptığı açıkça görülmektedir (Şekil 5.21, Şekil 5.22) .



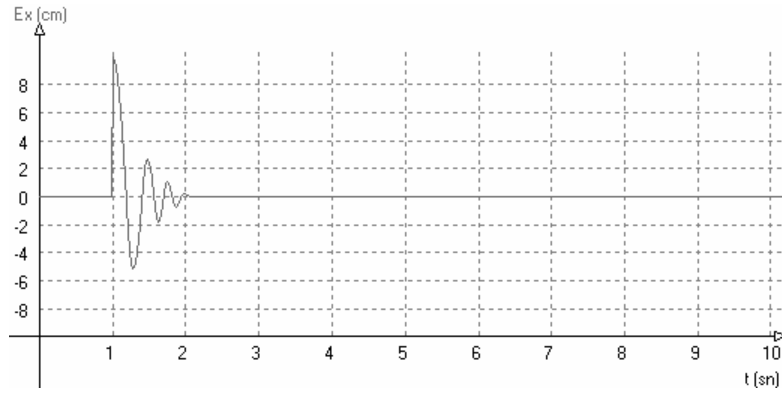
Şekil 5.18 Deney 2,  $K_{pa} = 15$  için referans ( $X_r$ ) ve konum( $x$ ) grafikleri



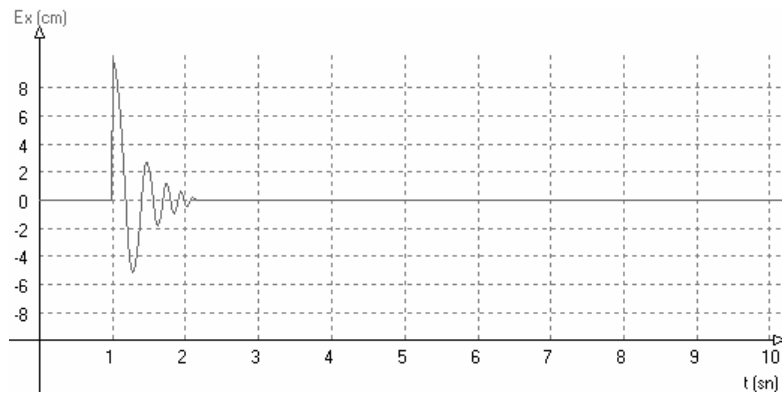
Şekil 5.19 Deney 2,  $K_{pa} = 15$  için  $E_x(t)$  grafiği



Şekil 5.20 Deneý 2,  $K_{pa} = 30$  ve  $K_{pa} = 60$  için  $E_x(t)$  grafikleri



Şekil 5.21 Deneý 2,  $K_{pa} = 250$  için  $E_x(t)$  grafiđi



Şekil 5.22 Deneý 2,  $K_{pa} = 500$  için  $E_x(t)$  grafiđi

### 5.6.3 Deney 3- Oransal (P) konum kontrolü ile pist sınırı tayini

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, araç oransal kontrol kullanılarak uzun bir rampa girdisi ile geri çekilirken, mekanik sınıra dayanıldırılması ve bu noktanın -40 cm olarak tayin edilmesidir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç pistin alt mekanik sınırının ek bir elektronik veya elektro-mekanik bir algılayıcı kullanılmadan mevcut düzenek üzerinden tayinidir. Sınıra dayanma noktasından sonra araç hareket edemeyeceğinden hata büyümeye başlayacak, belirli bir büyüklüğe eriştiğinde de sınır noktası olarak algılanabilecektir.

Pist sınırlarını bilmek bundan sonraki deneyler için önemlidir. Çünkü bundan sonraki deneylerde daima rahat çalışılabilecek konum bölgelerinde uygulamalar yapılmak istenecektir. Deney başlangıçlarında otomatik olarak çalışma bölgelerine gelebilmek için bu deneydeki alt yapı kullanılacaktır.

Pist üst sınırını belirlemeye gerek duyulmamıştır. Pist uzunluğu yaklaşık 76 cm olduğundan alt sınırının -40 cm olarak tayin edilmesi üst sınırı da otomatik olarak 36 cm olarak belirlemektedir.

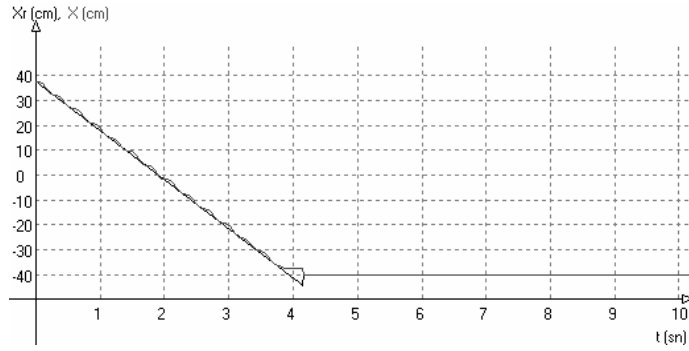
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

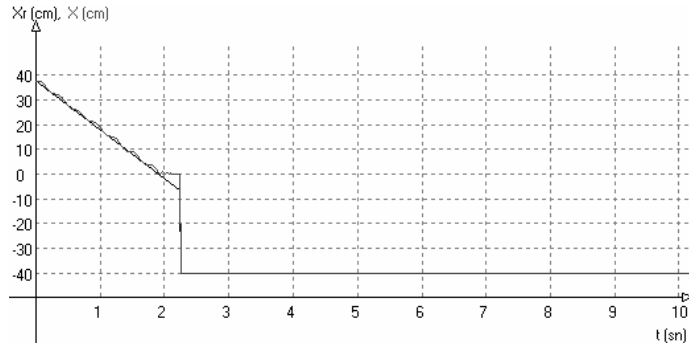
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç elle pist sonuna yakın bir konuma çekilir.
- 3- PC den “DENEY 3” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 4- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 5- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 6- Araç elle sırayla pist ortasına ve pist başına yakın bir noktaya getirilerek Basamak 3 ten itibaren deney iki defa daha tekrarlanır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

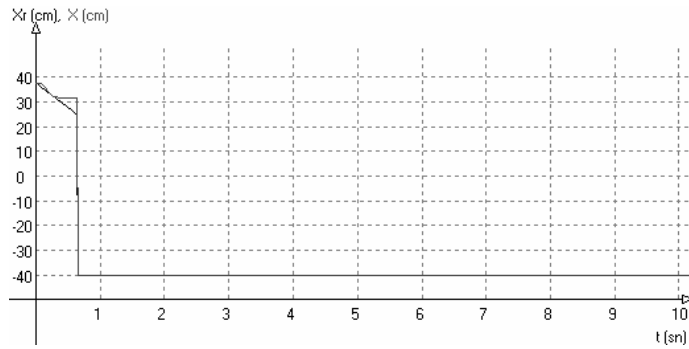
Her üç farklı başlangıç konumundan yapılan deneyde de pist alt limiti başarı ile tayin edilebilmiştir (Şekil 5.23 - Şekil 5.25). Araç pist sonunda başlatılan ilk deneyde pist sınırı tayini 4.2 saniye civarında vakit alırken, pist başına yakın noktada yapılan son deneyde 0.6 saniyeye düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 5.23 Deney 3, Araç pist sonuna yakınken pist alt sınırı tayini



Şekil 5.24 Deney 3, Araç pist ortasına yakınken pist alt sınırı tayini



Şekil 5.25 Deney 3, Araç pist başına yakınken pist alt sınırı tayini



#### 5.6.4 Deney 4- Oransal ve türevsel (PD) konum kontrolü

##### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, araç oransal ve türevsel (PD) kontrolü kullanılarak basamak fonksiyonu ile aracın pist başından pist orta ( 0 ) noktasına zıplatılmasıdır.

##### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç oransal-türevsel (PD) kontrolünün araca uygulanması ve bu katsayıların etkilerinin incelenmesidir. Deney üç kısımdan oluşturulmuştur. Birinci kısımda Deney 3 teki çalışma tekrarlanmış ve araç pist alt sınırına getirilerek referans tayini yapılmıştır. Bu noktada deneyin ikinci kısmı başlatılmıştır. Deneyin ikinci kısmında araç 1 saniye bu konumda bekletilmiştir. Buradaki amaç aracın başa getirilmesi ile üçüncü kısmı oluşturan uygulamak istediğimiz kontrol işlemini açık bir şekilde birbirinden ayırdetmektir. Deneyin son kısmında ise istediğimiz PD kontrolü yapılmaktadır. Oransal-türevsel kontrolün denklemleri Denklem (5.2) şeklindedir.

$$u(t) = K_{pa} \times E_x(t) + K_{da} \times E'_x(t) \quad (5.2)$$

Burada  $u(t)$  motor sürücü girişi,  $K_{pa}$  araç için oransal kontrol katsayısını,  $E_x(t)$  araç hata miktarını,  $K_{da}$  araç için türevsel kontrol katsayısını,  $E'_x(t)$  araç hata miktarının türevini göstermektedir .

##### Deneyin yapılış basamakları :

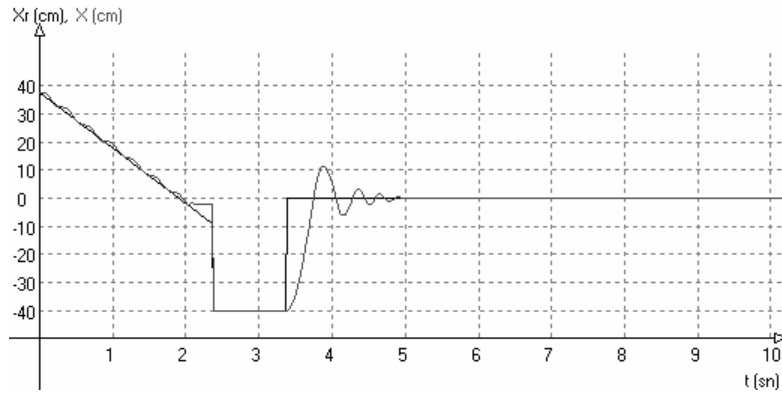
Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç elle pist ortasına yakın belirgin bir konuma çekilir .
- 3-  $K_{da} = 0$  iken hatayı sıfıra yaklaştıracak yaklaşık dört salınımlı bir  $K_{pa}$  katsayısı girilir. Burada Deney 2 sonuçlarına bakılarak  $K_{pa} = 200$  den başlanmıştır.
- 4- PC den “DENEY 4” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.

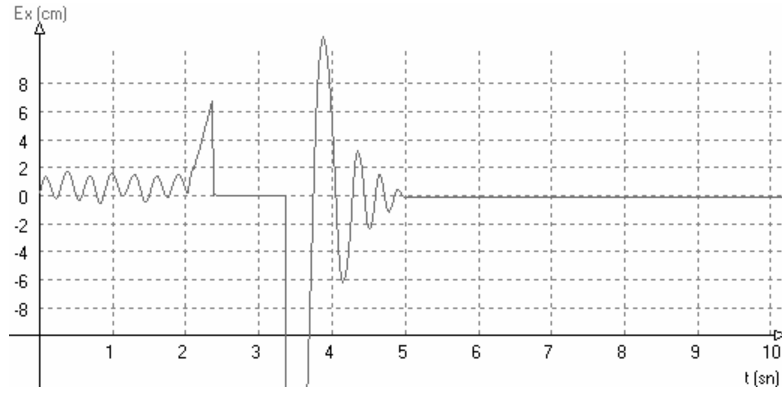
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- Araç Basamak 3 te belirlenen konuma getirilerek farklı 5  $K_{da}$  katsayısı ile Basamak 4 ten itibaren deney tekrarlanır. Aracı en hızlı ve en zıplamasız biçimde istenilen konuma oturtan  $K_{da}$  katsayısı bulunmaya çalışılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

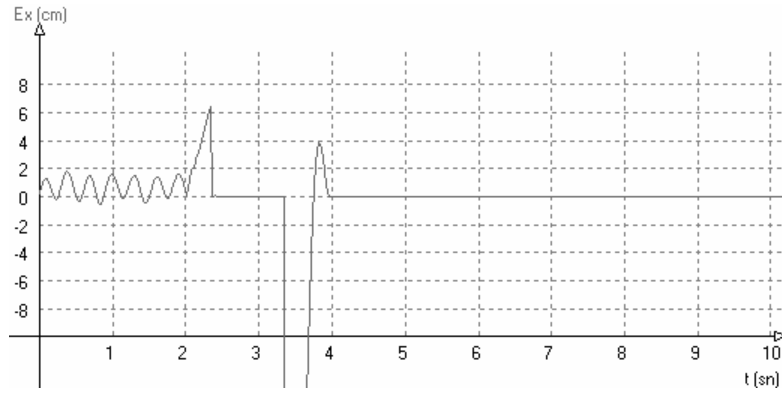
İlk deney  $K_{da} = 0$  ile yapılmış, daha sonra sırayla  $K_{da} = 400, 500, 600, 700$  ve 620 değerleriyle tekrarlanmıştır (Şekil 5.26 - Şekil 5.32).  $K_{da} = 400, 500, 600$  şeklinde arttıkça salınımın ve zıplamanın azaldığı,  $K_{da} = 700$  iken konuma oturmada geride kalındığı gözlenmiştir.  $K_{pa} = 200$  iken yapılan deneylerde en uygun sonuç  $K_{da} = 620$  iken alınmıştır ( Şekil 5.32 ). Bu sonuçlardan, türevsel kontrol bileşeninin artmasının hedefe otururken salınımı ve sıçramayı azaltma yönünde etki gösterdiği açıkça görülmektedir.



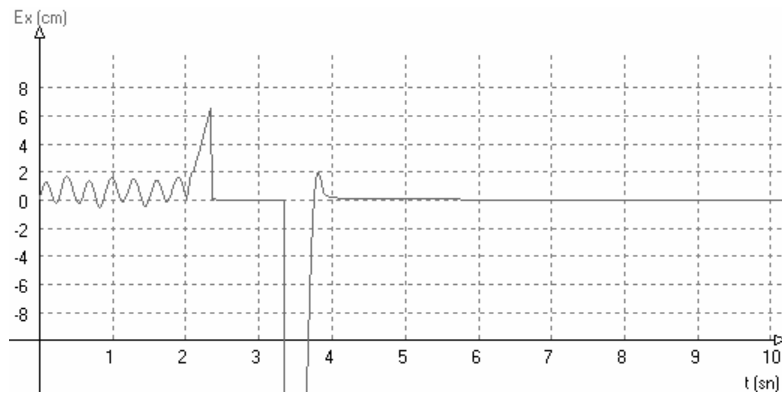
Şekil 5.26 Deney 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $X_r, X$  grafikleri ( $K_{pa} = 200, K_{da} = 0$ ).



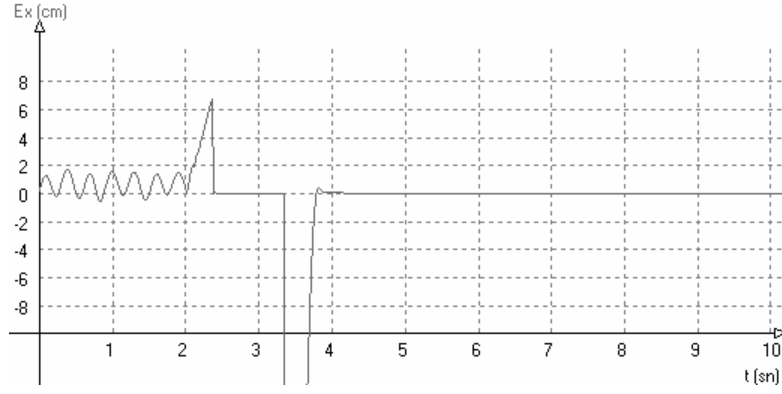
Şekil 5.27 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 0$ ).



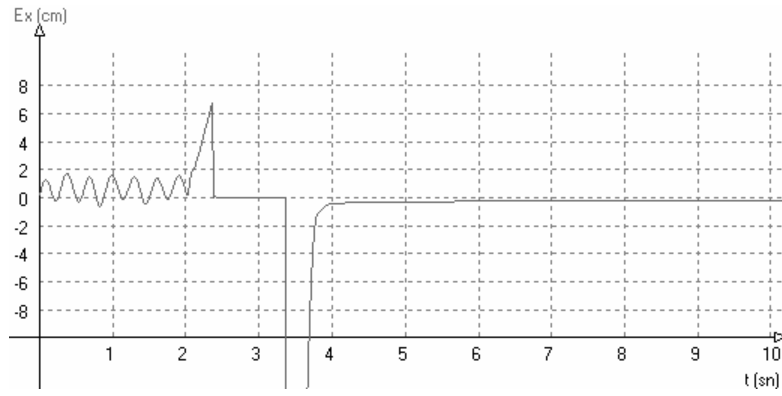
Şekil 5.28 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 400$ ).



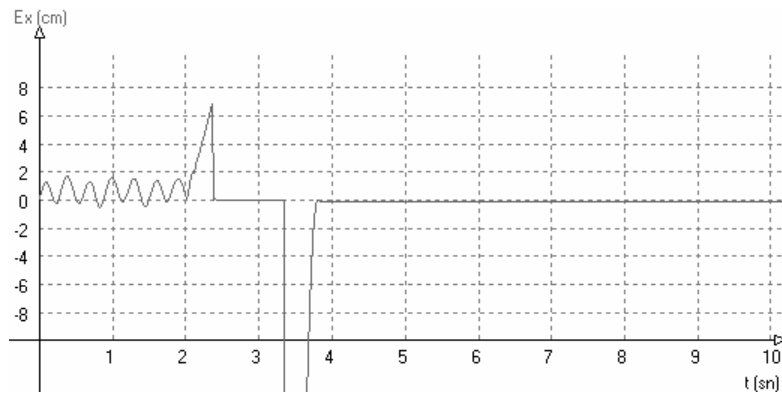
Şekil 5.29 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 500$ ).



Şekil 5.30 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 600$ ).



Şekil 5.31 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 700$ ).



Şekil 5.32 Deneý 4, basamak fonksiyonu girdisi ile PD kontrolü,  $E_x(t)$  grafiđi  
( $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 620$ ).

### 5.6.5 Deney 5- Oransal, integral ve türevsel (PID) konum kontrolü -1

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, araç oransal, integral ve türevsel (PID) kontrolü kullanılarak **basamak fonksiyonu** ile aracın pist başından pist orta ( 0 ) noktasına zıplatılmasıdır.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç oransal, integral ve türevsel (PID) kontrolünün araca uygulanması ve bu katsayıların etkilerinin incelenmesidir. Deney üç kısımdan oluşturulmuştur. Birinci kısımda Deney 3 te hazırlanan alt yapı kullanılmış ve araç pist alt sınırına getirilerek referans tayini yapılmıştır. Bu noktada deneyin ikinci kısmı başlatılmıştır. Deneyin ikinci kısmında araç 1 saniye bu konumda bekletilmiştir. Buradaki niyet aracın başa getirilmesi ile üçüncü kısmı oluşturan uygulamak istediğimiz kontrol işlemini bariz bir şekilde birbirinden ayırdetmektir. Deneyin son kısmında ise istediğimiz PID kontrolü yapılmaktadır. Oransal-integral-türevsel kontrolün denklemi Denklem (5.3) şeklindedir.

$$u(t) = K_{pa} E_x(t) + K_{ia} \int_0^t E_x(t) + K_{da} E'_x(t) \quad (5.3)$$

Burada  $u(t)$  motor sürücü girişi,  $K_{pa}$  araç için oransal kontrol katsayısını,  $E_x(t)$  araç hata miktarını,  $K_{ia}$  araç için integral kontrol katsayısını,  $K_{da}$  araç için türevsel kontrol katsayısını,  $E'_x(t)$  araç hata miktarının türevini göstermektedir .

#### Deneyin yapılış basamakları :

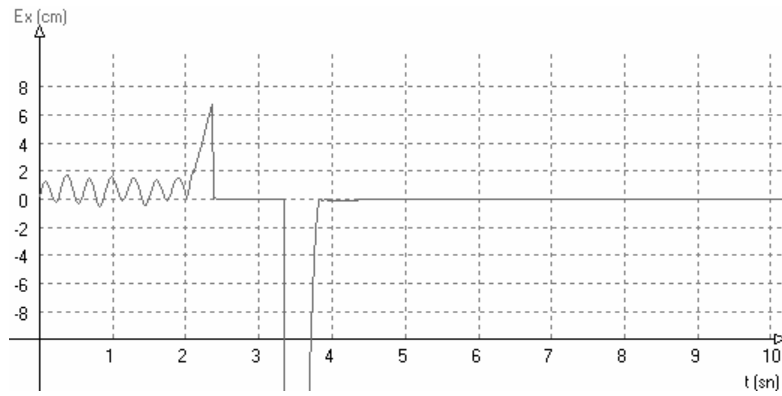
Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç elle pist ortasına yakın belirgin bir konuma çekilir .
- 3-  $K_{pa} = 200$ ,  $K_{da} = 0$  ve  $K_{ia} = 0$  değerleri ile deneye başlanır.
- 4- PC den “DENEY 5” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.

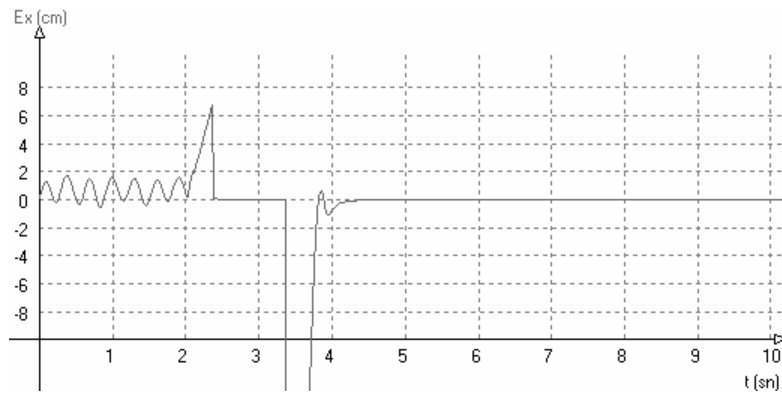
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- Araç elle ilk deney başındaki aynı belirgin noktaya getirilerek farklı  $K_{da}$  ve  $K_{ia}$  katsayılarıyla Basamak 4 ten itibaren deney tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

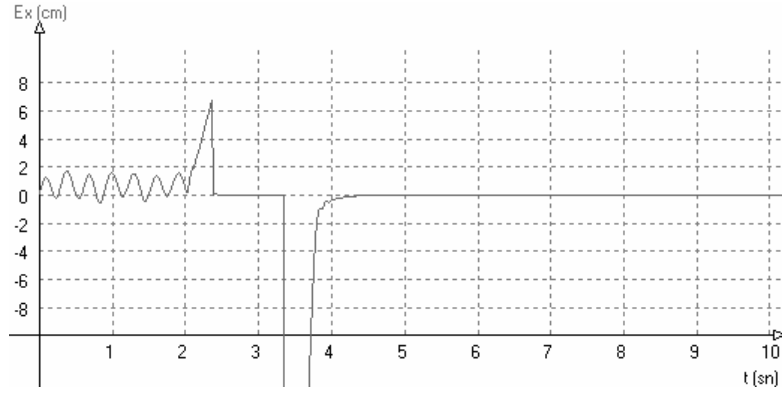
Deney defalarca tekrarlandıktan sonra optimal değerler bulunmuştur (Şekil 5.33).  $K_{da}$  katsayısının artmasının, salınımları PD kontrolünde olduğu gibi azalttığı ancak  $K_{ia}$  katsayısının artmasının ters yönde etki yaptığı gözlenmiştir (Şekil 5.33 – Şekil 5.37) . Hataların her durumda zamanla sifira oturduğu da aynı grafiklerden görülmektedir.



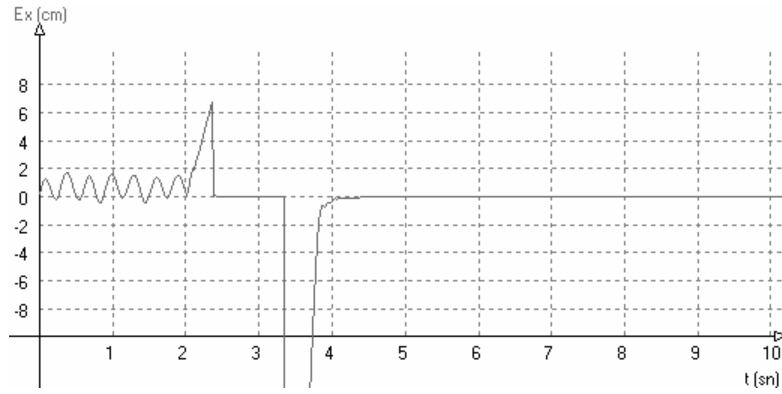
Şekil 5.33 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
( $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=460$ ,  $K_{ia}=30$ ).



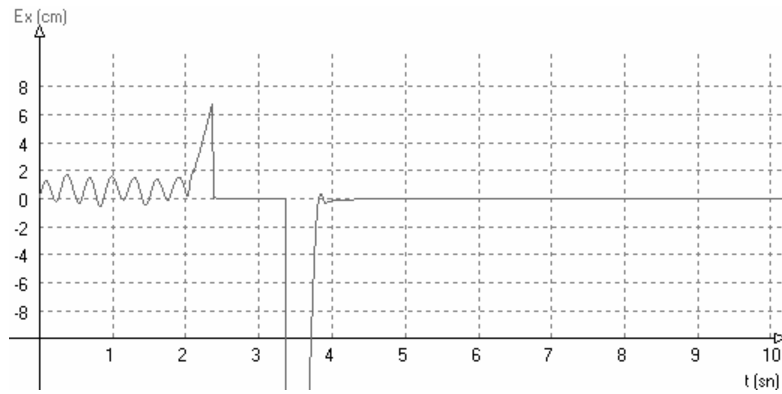
Şekil 5.34 Deney 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
( $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=360$ ,  $K_{ia}=30$ ).



Şekil 5.35 Deneş 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
( $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=560$ ,  $K_{ia}=30$ ).



Şekil 5.36 Deneş 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
( $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=460$ ,  $K_{ia}=25$ ).



Şekil 5.37 Deneş 5, basamak fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
( $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=460$ ,  $K_{ia}=35$ ).

### 5.6.6 Deney 6- Oransal, integral ve türevsel (PID) konum kontrolü -2

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, araç oransal, integral ve türevsel (PID) kontrolü kullanılarak **rampa fonksiyonu** ile aracın pist başından pist orta ( 0 ) noktasına zıplatılmasıdır.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç oransal, integral ve türevsel (PID) kontrolünün rampa girdisine göre uygulanmasıdır. Deney rampa girdisi haricinde tamamen Deney 5 teki gibi yapılmaktadır.

#### Deneyin yapılış basamakları :

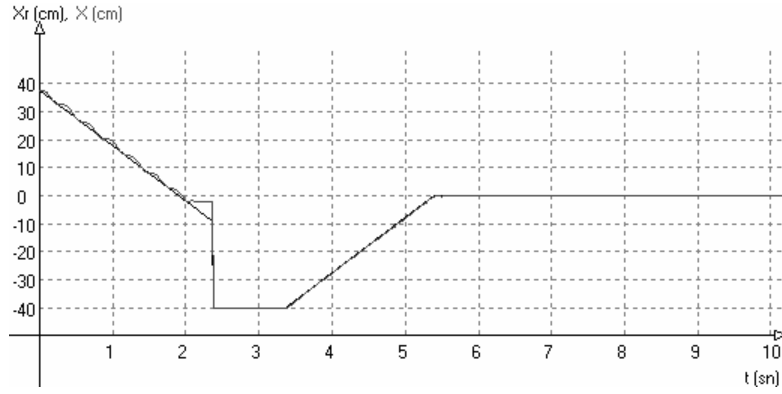
Deney için Şekil 5.11 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç elle pist ortasına yakın belirgin bir konuma çekilir .
- 3- Deney 5 te bulunan  $K_{pa}=200$ ,  $K_{da}=460$  ve  $K_{ia}=30$  değerleri girilir.
- 4- PC den “DENEY 6” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- Araç elle ilk deney başındaki aynı belirgin noktaya getirilerek farklı  $K_{da}$  ve  $K_{ia}$  katsayılarıyla Basamak 4 ten itibaren deney tekrarlanır.

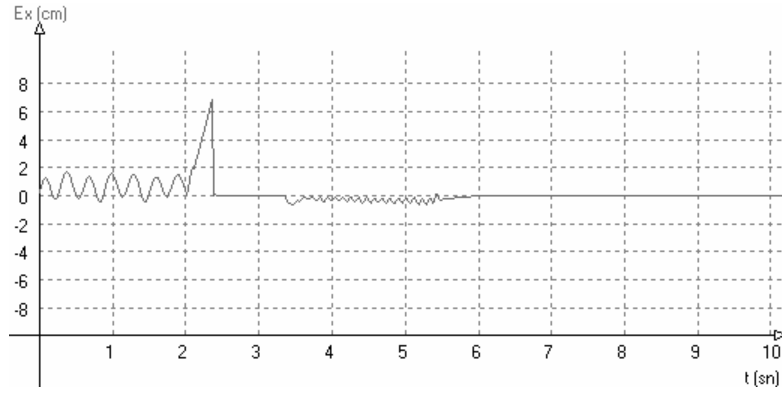
#### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Optimal değerlerde yapılan ilk deneydeki tepkiler incelenmiş ve sonuçların beklenen yönde olduğuna karar verilmiştir. Hareket sırasında hataların minimize olduğu hareket sonlandığında ise hatanın sifira oturduğu gözlenmiştir. Deney aynı değerlerle tekrarlanarak sonucun kararlılığı gözlenmiştir (Şekil 5.38 – Şekil 5.40) .

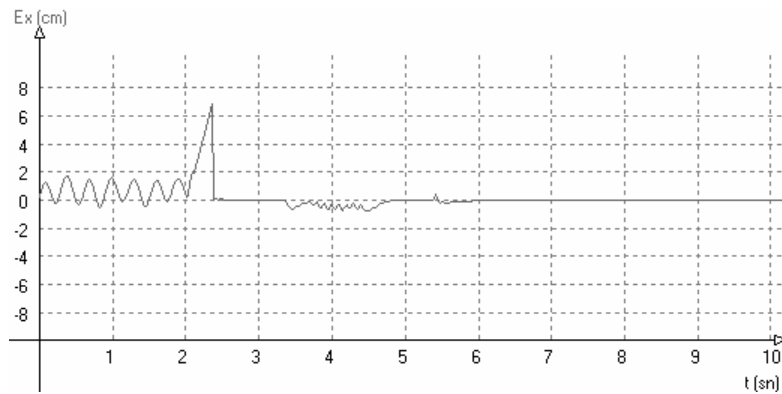




Şekil 5.38 Deneş 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $X_r$  ve  $X$  grafikleri  
 $(K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30)$ .



Şekil 5.39 Deneş 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü,  $E_x(t)$  grafiği  
 $(K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30)$ .



Şekil 5.40 Deneş 6, rampa fonksiyonu girdisi ile PID kontrolü tekrarı,  $E_x(t)$  grafiği  
 $(K_{pa}=200, K_{da}=460, K_{ia}=30)$ .

### 5.6.7 Deney 7- Sarkaç açısı için referans tesbiti

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, sarkaç açısı referansının belirlenmesidir. Bu deneyin yapılabilmesi için sarkacın önceden talimata uygun monte edilmiş olması gerekmektedir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sarkaç enkoder bloğundan gelen index sinyali yardımıyla çubuğun referans açısının tesbitidir. Enkoder mili 360 derece döndüğünde 90 derece faz farkıyla 500 darbe çifti (faz konum bilgisi) göndermekte ve bu bilgidan  $4 \times 500 = 2000$  konum bilgisi çıkarılmaktadır. Yapılan elektronik deneylerde enkoder bloğundan gelen referans (index) sinyalinin 6-7 konum boyunca aktif olabildiği gözlenmiştir. Bu durumda faz konum bilgileri de dikkate alınırsa bazen 1 bazen de 2 konumda referans belirlenebilmektedir. Bunun önüne geçilmek için referansın sadece deney başında ve kontrollü olarak hep aynı yöndeki hareketle belirlenmesi düşünülmüştür.

Referansı belirleyen yazılım interrupt döngüsünün içinde olup, her gerektiği durumda aktif edilmelidir. Araç-çubuk dinamiği incelenirse, aracın pist başından pist ortasına ivmelenmesi durumunda çubuk ağırlık merkezi izdüşümünün doğal olarak geriden takip edeceği bellidir. Araç pist ortasına yaklaşırken yavaşlayacak ve çubuk ağırlık merkezi izdüşümü araç hizasının önüne geçerken referansı belirleyecektir. Araç pist ortasına yaklaşırken referans belirleyen yazılım aktif edilirse amaca ulaşılmış olunacaktır.

Bu deneyle yapılan diğer bir işlem ise aracın otomatik olarak çalışma bölgesine getirilmiş olmasıdır. Bu deney ileride yapılacak deneylerde bir alt basamak olarak kullanılacaktır. Bu ve bundan sonraki deneylerde sarkacın pist başına getirilmesine kadarki verilerin incelenmesi artık önemsenmediğinden kayıt edilmeyecektir.

#### Deneyin yapılış basamakları :

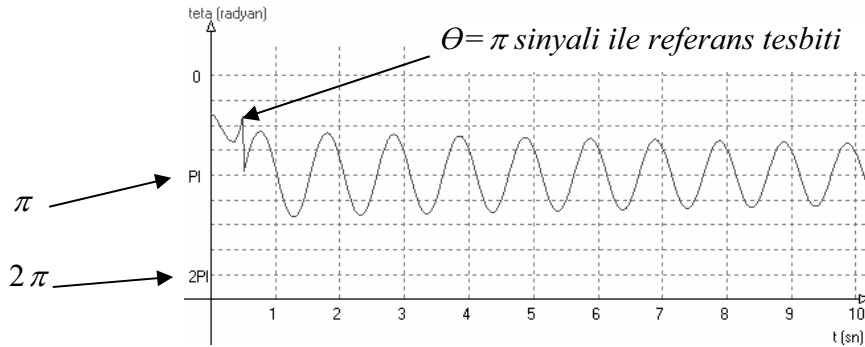
Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.

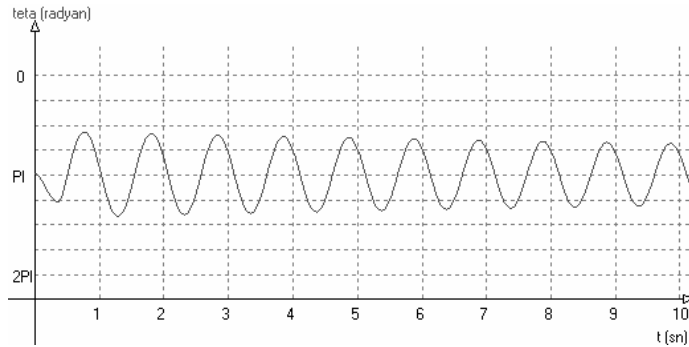
- 2- Çubuk yatay konumdayken yani referans bilerek bozulmuş durumdayken kontrol ünitesi yeniden başlatılır veya yüklenir.
- 3- PC den “DENEY 7” butonu tıklanır ve yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 4- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak  $\theta(t)$  grafiği çizdirilir.
- 5- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 6- Basamak 4 ten itibaren deney bir defa tekrarlanır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Çubuk yatay konumda sistem açılarak deney yapılmış ve verileri kaydedilmiştir (Şekil 5.41). Sarkaç referansı başarı ile belirlenmiştir. Yapılan ikinci deneyde doğru referansla başlayan çalışma baştan sona doğru referans açılarıyla sona ermiştir (Şekil 5.42 ). Şekillerde teta yani “ $\theta$ ” eksenini çubuk açısı hatasını göstermektedir.  $\theta = 0$  çubuk tepedeyken,  $\theta = \pi$  ise çubuk aşağıdayken sahip olduğu açılardır.



Şekil 5.41 Hatalı çubuk açısı ile başlangıç ve referansın başarı ile tesbiti



Şekil 5.42 Doğru çubuk açısı ile başlanarak deneyin tekrarı

### 5.6.8 Deney 8- Çubuk aşağıda, minimum çubuk salınımı ile PD konum kontrolü

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, oransal ve türevsel kontrol kullanılarak sarkaç aşağıdayken minimum salınım kontrolü yapmaktır. Bu deney sarkaç açısının da devreye girdiği ama kontrolün pek zor olmadığı bir deneydir .

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sarkaç açısı hatası ve türevinin devreye sokularak minimum salınımla konum kontrolü yapmaktır. Oransal-türevsel kontrolün denklemi çubuk açısı da devreye girdiğinde küçük  $\theta$  açıları için Denklem (5.4) şeklinde olacaktır.

$$u(t) = K_{pa}E_x(t) + K_{da}E'_x(t) + K_{ps}E_\theta(t) + K_{ds}E'_\theta(t) \quad (5.4)$$

Burada  $u(t)$  motor sürücü girişi,  $K_{pa}$  araç için oransal kontrol katsayısını,  $E_x(t)$  araç hata miktarını,  $K_{da}$  araç için türevsel kontrol katsayısını,  $E'_x(t)$  araç hata miktarının türevini,  $K_{ps}$  çubuk için oransal kontrol katsayısını,  $E_\theta(t)$  araç hata miktarını,  $K_{ds}$  araç için türevsel kontrol katsayısını,  $E'_\theta(t)$  araç hata miktarının türevini göstermektedir [15]. Çubuk açısı için referans  $\theta = 0$  olduğundan denklemde  $E_\theta$  yerine  $\theta$  ve  $E'_\theta$  yerine  $\theta'$  kullanılabilir.

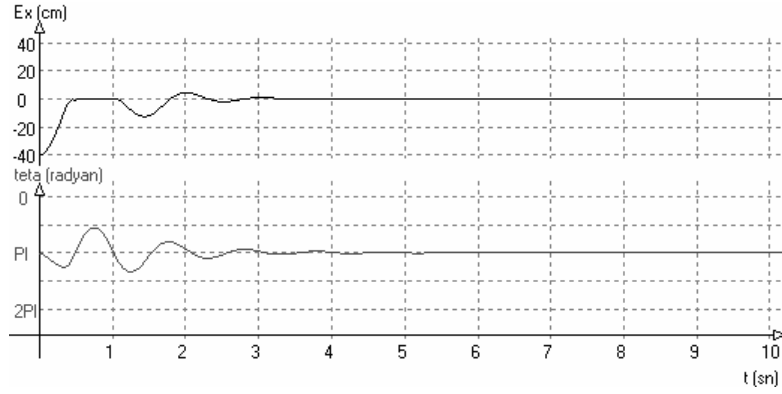
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

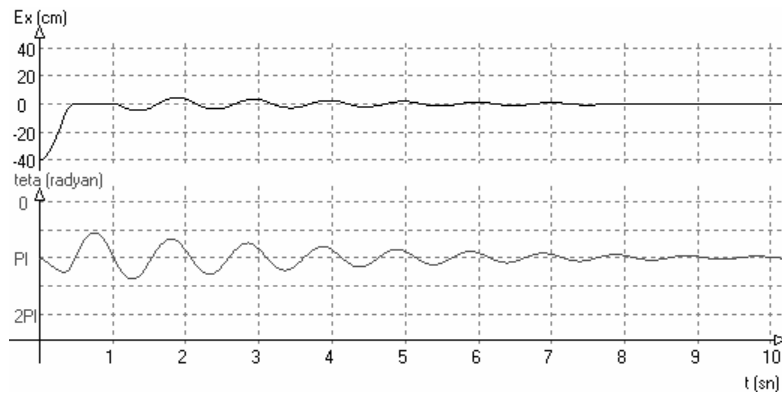
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Çubuk ve araç için denenmek istenen PD katsayıları girilir.
- 3- PC den “DENEY 8” butonu tıklanır ve 10 saniye gözlem yapılır.
- 4- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak  $E_x(t)$ ,  $\theta(t)$  grafikleri çizdirilir.
- 5- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 6- Basamak 2 ten itibaren farklı katsayılarla deney tekrarlanır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

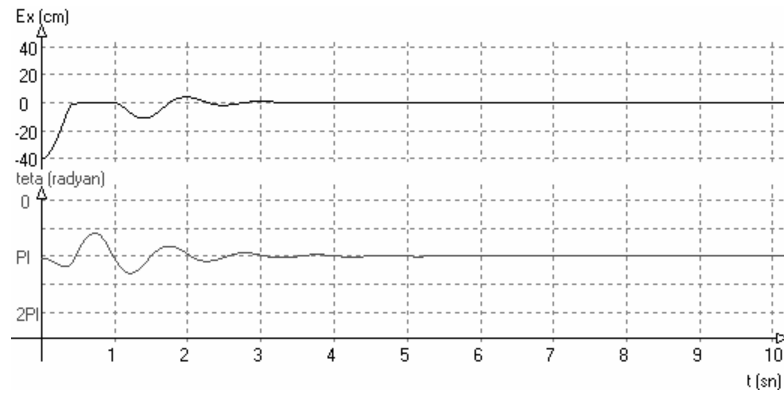
Toplam 5 deneyden elde edilen grafikler çizilmiştir (Şekil 5.43 – Şekil 5.47). Gerek araç için gerek çubuk için pozisyon ve türev katsayılarının önceki PD deneylerine benzer yönde etki yaptıkları gözlenmiştir. İnce katsayı ayarlarıyla sistem minimum salınım yapacak duruma getirilebilir. Bu tür bir problem karşımıza tavana asılı forklift kontrollerinde çıkacaktır. Minimum zamanda ve minimum salınımla yükü bir noktadan başka bir noktaya götürebilmek açısından önemlidir. Son deneydeki verilerin erken sönümlenme bakımından diğerlerine göre en uygun olduğu görülmektedir (Şekil 5.47).



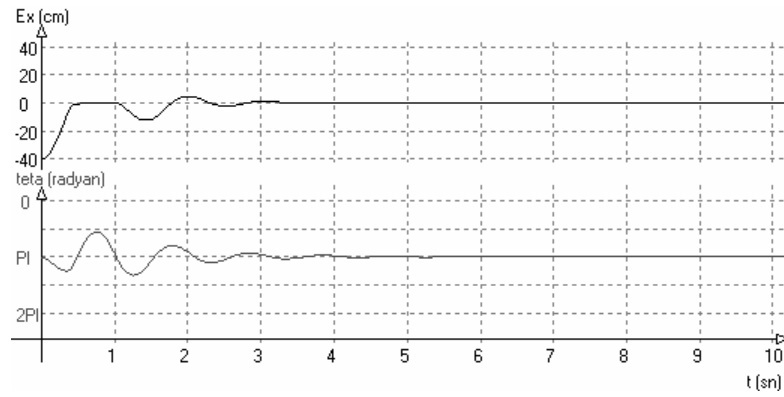
Şekil 5.43 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=0, K_{pa}=50, K_{da}=750$ )



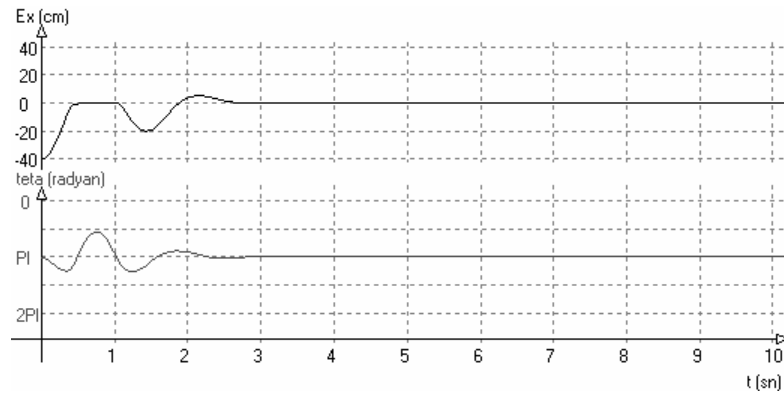
Şekil 5.44 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=0, K_{pa}=250, K_{da}=750$ )



Şekil 5.45 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=200, K_{pa}=50, K_{da}=750$ )



Şekil 5.46 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=500, K_{ds}=500, K_{pa}=50, K_{da}=750$ )



Şekil 5.47 Deney 8, aşağıda PD kontrol ( $K_{ps}=1000, K_{ds}=500, K_{pa}=50, K_{da}=750$ )

### 5.6.9 Deney 9- Serbest düşme

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, çubuk tepede bir konumdan serbest bırakılarak düşürülmesi ve verilerin incelenmesidir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sarkaç ve araç arasındaki dinamik ilişkilerin incelenmesidir. Çubuk ve araç arasındaki enerji ilişkilerinin incelenmesi bundan sonraki deneyleri doğru adımlarla yapabilmek açısından önemlidir. Deney üç ayrı şart altında yapılmaya çalışılacaktır. İlk deneyde araç serbest durumdayken, ikinci deneyde araç tahrik motoruyla sabit tutulmaya çalışılırken ve son deneyde ise araç elle sabitlenmişken çubuk serbest düşmeye bırakılacaktır.

#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Araç pist ortasına çekilir, çubuk ve araç için PD katsayıları sıfırlanır.
- 3- PC den “DENEY 9” butonu tıklanır ve 2 saniye sonra çubuk bırakılır.
- 4- Yaklaşık 10 saniye gözlem yapılır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak  $E_x(t)$ ,  $\theta(t)$  grafikleri çizdirilir.
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- İkinci defasında araç elle sabitlenerek ve üçüncü defasında  $K_{pa}=250$ ,  $K_{da}=700$  katsayılarıyla deney Basamak 3 ten itibaren tekrarlanır.

#### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Belirtilen üç durum için deneyler tekrarlanmış ve sistem tepkileri gözlenmiştir (Şekil 5.48 - Şekil 5.50). Araç serbestken yapılan deneye ait grafikte sarkaç ve araç





### 5.6.10 Deney 10- PD kontrol ile ters çubuk dengesi

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, oransal ve türevsel kontrol kullanılarak çubuğun ters durumda yani yukarıdayken dengede tutulmasıdır. Bu deneyde konum kontrolü yapılmamıştır.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç çubuk yukarıdayken konumdan bağımsız olarak dengeye tutmaya çalışmaktır. Araç kuvvet dengeleri doğrultusunda sağa ya da sola kayabilecektir. Sistemin davranışı incelenirken araç sınırlara yaklaştığında dışardan müdahale edilerek pist ortasına itilmelidir. Oransal-türevsel kontrolün denklemi çubuk açısı da devreye girdiğinde Denklem (5.4) olarak verilmiştir.

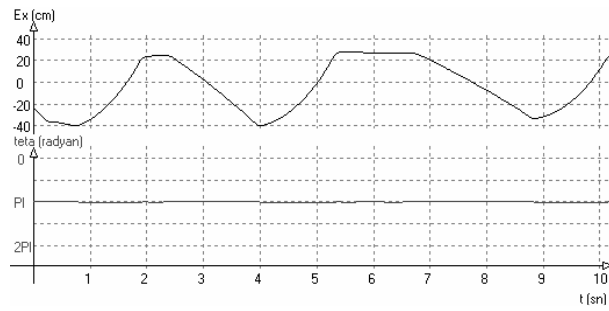
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

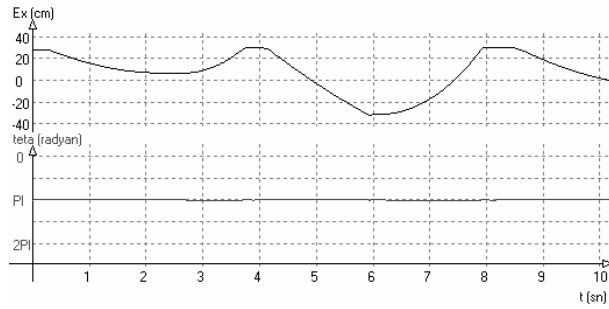
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir ve katsayılar sıfırlanır.
- 2- Çubuk için PD katsayıları girilir.
- 3- “DENEY 10” butonu tıklanır ve aracın pist ortasına gelmesi beklenir.
- 4- Çubuk elle yukarıya kaldırılır. Yukarı konuma getirilir getirilmez kontrol sisteme bırakılır.
- 5- “KAYIT” butonuna basılarak kayıt başlatılır. 10sn süresince pist sınırlarına geldikçe pist ortasına itilerek müdahale edilir.
- 6- 10 saniye dolduktan sonra müdahale kesilerek kendiliğinden pist sonuna gelerek düşmesine izin verilir
- 7- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgili grafikler çizdirilir.
- 8- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 9- Deney çubuk katsayıları  $K_{ps}$  ve  $K_{ds}$  değiştirilerek Basamak 4 ten itibaren tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

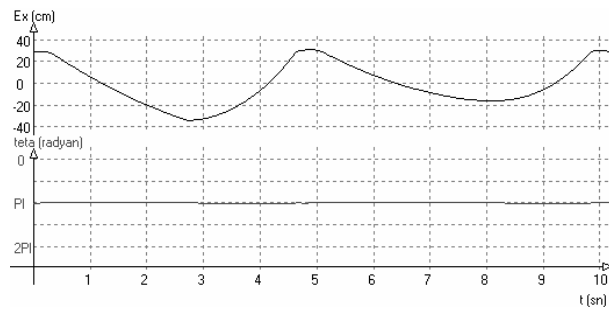
Küçük  $K_{ps}$  değerleri için sistemin tepkisinin zayıfladığı,  $K_{ps}$  ile uyumlu  $K_{ds}$  değerleri ile çubuğun optimal hatayla dengede tutulabildiği gözlenmiştir. Aracın pist sonuna meyili olduğu farkedilmiş bunun masa eğimi, sarkaç referans hatası, tahrik motorunun iki yönde de aynı oranlarla doğrusal değişmediği gibi sebeplerden oluştuğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.51 - Şekil 5.53).



Şekil 5.51 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=1500$ ,  $K_{ds}=6000$ ,  $K_{pa}=0$ ,  $K_{da}=0$ )



Şekil 5.52 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000$ ,  $K_{ds}=3000$ ,  $K_{pa}=0$ ,  $K_{da}=0$ )



Şekil 5.53 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000$ ,  $K_{ds}=6000$ ,  $K_{pa}=0$ ,  $K_{da}=0$ )

### 5.6.11 Deney 11- PD kontrol ile çubuk dengesi ve araç konum kontrolü -1

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, oransal ve türevsel kontrol kullanılarak sarkacın ters durumda yani yukarıdayken dengede tutulmasıdır. Bu deneyde ayrıca konum kontrolü yapılmıştır.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sarkaç çubuğunu yukarıdayken belli bir konumda dengede tutmaya çalışmaktır. Yanlış kontrol katsayıları verilerek sistemin davranışı incelenirken araç sınırlara yaklaştığında dışardan müdahale edilerek pist ortasına itilmelidir. Aksi takdirde araç yüksek hızlara ulaşıp şiddetli bir şekilde mekanik sınırlara çarpacaktır. Oransal-türevsel kontrolün denklemi sarkaç açısı da devreye girdiğinde Denklem (5.4) şeklindedir.

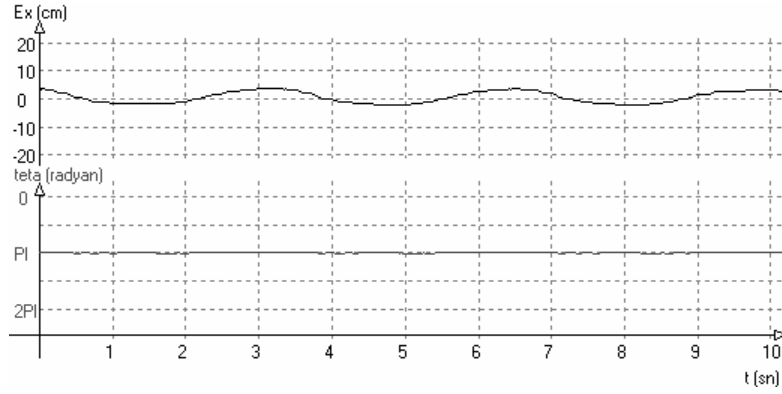
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

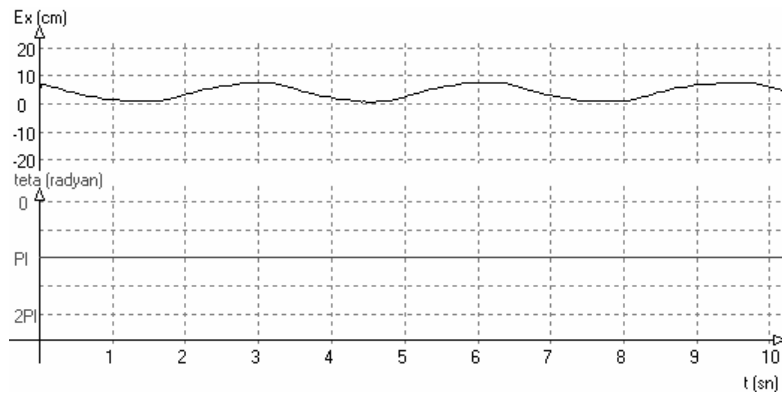
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Sarkaç ve araç için PD katsayıları  $K_{ps}$ ,  $K_{ds}$ ,  $K_{pa}$ ,  $K_{da}$  girilir.
- 3- “DENEY 11” butonu tıklanır ve aracın pist ortasına gelmesi beklenir.
- 4- Çubuk elle yukarıya kaldırılır. Yukarı konuma getirilir getirilmez kontrol sisteme bırakılır.
- 5- Kayıt butonuna basılarak kayıt başlatılır. 10sn süresince pist sınırlarına geldikçe pist ortasına itilerek müdahale edilir.
- 6- 10 saniye dolduktan sonra müdahale kesilerek kendiliğinden pist sonuna gelerek düşmesine izin verilir
- 7- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 8- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 9- Deney PD katsayıları değiştirilerek Basamak 4 ten itibaren tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Yapılan ilk deneylerde değişik katsayılarla defalarca deney yapılmış çubuk konumu stabilize edilememiştir. Daha sonra kontrol denklemindeki araç hatası türevi düşük frekans geçiren bir filtrelemeye tabi tutularak başarıya ulaşılmıştır.  $K_{ps}=3000$ ,  $K_{ds}=8000$ ,  $K_{pa}=30$ ,  $K_{da}=850$  değerleri ile sistem başarıyla stabilize edilmiştir.  $K_{da}$  küçüldüğünde sistemin konum değişikliklerine daha kolay adapte olduğu ama hedef değerine oturduğunda yaptığı salınımların büyüdüğü gözlenmiştir (Şekil 5.54, Şekil 5.55).



Şekil 5.54 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=30, K_{da}=850$ )



Şekil 5.55 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500$ )

### 5.6.12 Deney 12- PID kontrol ile çubuk dengesi ve araç konum kontrolü -2

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, oransal, integral ve türevsel kontrol kullanılarak sarkacın ters durumda yani yukarıdayken dengede tutulmasıdır. Bu deneyde konum kontrolü yapılmamıştır.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç sarkaç çubuğunu dengede integral kontrolünün etkisinin incelenmesidir. Yanlış kontrol katsayıları verilerek sistemin davranışı incelenirken araç sınırlara yaklaştığında dışardan müdahale edilerek pist ortasına itilmelidir. Aksi takdirde araç yüksek hızlara ulaşır şiddetli bir şekilde mekanik sınırlara çarpacaktır. Oransal-integral-türevsel kontrolün denklemi çubuk da devreye girdiğinde Denklem (5.5) şeklindedir.

$$u(t) = K_{ps} \theta(t) + K_{ds} \theta'(t) + K_{pa} E_x(t) + K_{ia} \int_0^t E_x(t) + K_{da} E'_x(t) \quad (5.5)$$

Çubuğa ait integral teriminin denklemde bulunmamasında fayda vardır. Çünkü çubuğa ait PD katsayıları oldukça büyük olduğundan düzlemdeki küçük bir eğim büyük araç hataları oluşturabilir.

#### Deneyin yapılış basamakları :

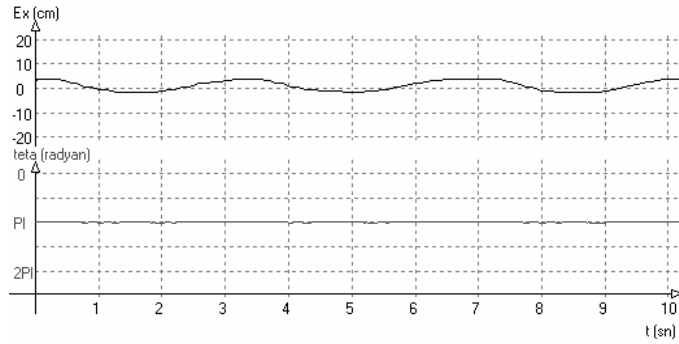
Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Çubuk ve araç için PID katsayıları  $K_{ps}$ ,  $K_{ds}$ ,  $K_{ds}$ ,  $K_{pa}$ ,  $K_{ia}$ ,  $K_{da}$  girilir.
- 3- “DENEY 12” butonu tıklanır ve aracın pist ortasına gelmesi beklenir.
- 4- Çubuk elle yukarıya kaldırılır ve kontrol sisteme bırakılır.
- 5- Kayıt butonuna basılarak kayıt başlatılır. 10 sn süresince pist sınırlarına geldikçe pist ortasına itilerek müdahale edilir.

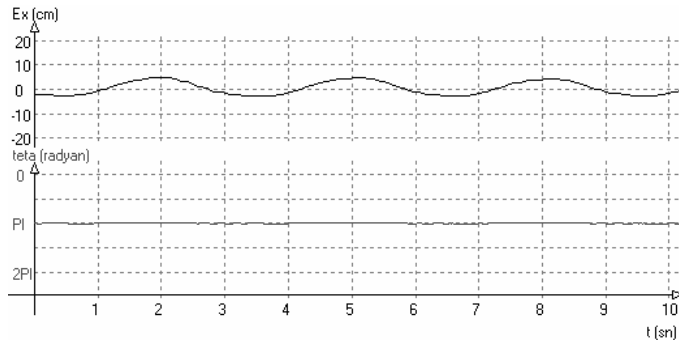
- 6- 10 saniye dolduktan sonra müdahale kesilerek kendiliğinden pist sonuna gelerek düşmesine izin verilir
- 7- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 8- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 9- Deney katsayılar değiştirilerek Basamak 4 ten itibaren tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Deney integral katsayısı iki farklı durumda tekrarlanmıştır (Şekil 5.56, Şekil 5.57). İntegral katsayısı sıfırken dışarıdan uygulanan kuvvetlere karşı denge konumuna rahatça dönebildiği ancak integral katsayısı arttığında dengenin korunamamaya başladığı gözlenmiştir. Buna karşılık uygun integral katsayısıyla konum hatası sıfıra yaklaştırılmıştır.



Şekil 5.56 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500, K_{ia}=2$ )



Şekil 5.57 Çubuk dengesi ( $K_{ps}=3000, K_{ds}=8000, K_{pa}=25, K_{da}=500, K_{ia}=4$ )

### 5.6.13 Deney 13- PD kontrol ile çubuk dengedeiken konum değiştirme

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, oransal ve türevsel kontrol kullanılarak çubuk dengedeiken konumunun değiştirilmesidir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç çubuk dengeden konumunun değiştirilerek dengenin korunup korunamadığının gözlemlenmesidir. Çubuk elle dengeye getirildikten sonra rampa girdisiyle konumu 20 cm geriye çekilerek davranışları incelenecektir.

#### Deneyin yapılış basamakları :

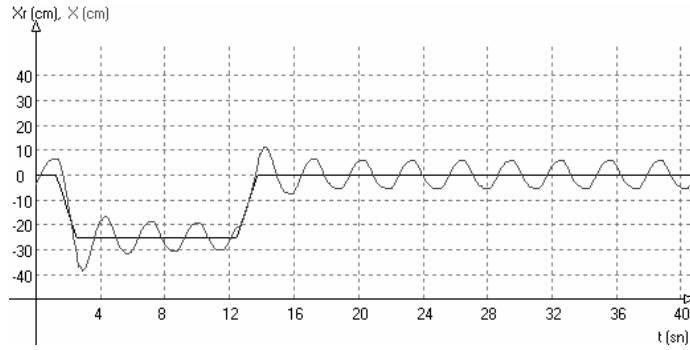
Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Çubuk ve araç için PD katsayıları girilir.
- 3- “DENEY 13” butonu tıklanır ve aracın pist ortasına gelmesi beklenir.
- 4- Çubuk elle yukarıya kaldırılır. Yukarı konuma getirilir getirilmez kontrol sisteme bırakılır.
- 5- 4 saniye beklenir. “>” butonuna basılarak senaryo başlatılır. 10 saniye gözlenir.
- 6- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 7- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 8- Deney PD katsayıları değiştirilerek Basamak 4 ten itibaren tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

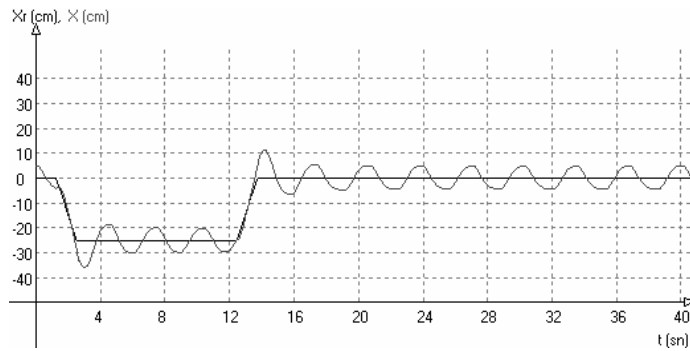
#### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Deneyler farklı katsayılarla üç defa tekrarlanmış ve sistem tepkileri gözlenmiştir (Şekil 5.58 - Şekil 5.60). Grafiklerden  $K_{da}$  nın konum sabit tutulurken yüksek, konum değiştirirken düşük tutulmasının daha faydalı olacağı gözlenmektedir. Nitekim son

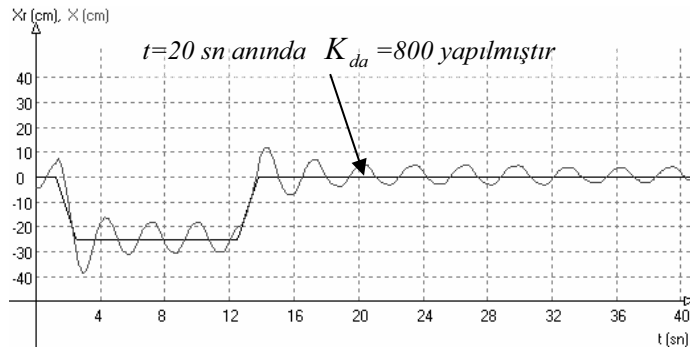
deneyde konum değiştirmelerde  $K_{da}=600$  kullanılmış ve  $t=20$  de  $K_{da}=800$  yapılarak salınım azaltılmıştır ( Şekil 5.59 ).



Şekil 5.58 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeiken konum değiştirme  
(  $K_{ps}=3000, K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=500$  )



Şekil 5.59 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeiken konum değiştirme  
(  $K_{ps}=3000, K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=600$  )



Şekil 5.60 Deney 13, PD kontrol ile çubuk dengedeiken konum değiştirme  
(  $K_{ps}=3000, K_{ds}=5000, K_{pa}=30, K_{da}=600$  ve  $800$  )



#### 5.6.14 Deney 14- PD kontrol ile çubuk dikme deneyi

##### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, çubuk aşağıdayken çubuğu salındırarak dikmeye çalışmaktır. Çubuk dikildikten sonra otomatik olarak dengede tutma stratejisine geçilmektedir.

##### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç çubuk aşağı konumdayken pozitif geri beslemeli kontrol uygulanarak çubuğa salınım yaptırılması ve dikilmeye çalışılmasıdır. Çubuk dikildikten sonra daha önce yapılan dengede tutma kontrolüne geçilmektedir. Burada dikme işleminde Deney 8 de verilen Denklem (5.4) kullanılmış fakat  $K_{ps}$  ve  $K_{ds}$  katsayıları ters işaretli olarak hesaba alınmıştır. Ayrıca dikme kontrolü [4] te belirtildiği gibi enerji transferinin maksimum olduğu  $\theta = \pi$  etrafında yani  $\theta = \frac{3}{4}\pi$ ,  $\theta = \frac{5}{4}\pi$  aralığında uygulanmıştır. Bu deneyde kayıt 40 saniye boyunca yapılmıştır.

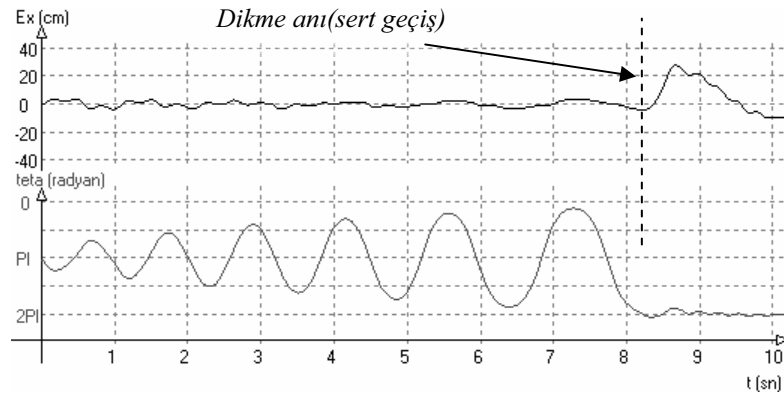
##### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Çubuk ve araç için PD katsayıları girilir.
- 3- “DENEY 14” butonu tıklanır ve geri çekilir.
- 4- 10 saniye beklenir. Çubuk dikilip dengeye oturmamışsa PD katsayıları değiştirilerek Basamak 3 den tekrar başlanır.
- 5- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak ilgilenilen grafikler çizdirilir.
- 6- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 7- Deney aynı katsayılarla Basamak 3 ten itibaren tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

### Deney sonucu değerlendirmeleri:

Deney  $K_{ps}$  ve  $K_{ds}$  küçük bir değerle başlatılarak defalarca tekrarlanmıştır. Çubuğu dikebilecek katsayı bulunduğunda uygun  $K_{pa}$  bulunarak konumun fazla değişmeden dikme yapılabilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.61, Şekil 5.62). Konumun dikme anında referans noktası civarında olması önemlidir çünkü bu, akabinde başlatılacak “dengede tutma” kontrolüne yumuşak bir geçiş sağlamaktadır. Araç sürtünmesi dikkate alındığında yumuşak geçişi garantileyebilmek için tüm  $0 < \theta < 2\pi$  aralığında kontrol yapmanın daha uygun olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.61 Deney 14, sert geçişli dikme deneyi  
( $K_{ps}=200, K_{ds}=50, K_{pa}=150, K_{da}=125$ )



Şekil 5.62 Deney 14, yumuşak geçişli dikme deneyi  
( $K_{ps}=200, K_{ds}=50, K_{pa}=150, K_{da}=125$ )

### 5.6.15 Deney 15- Belirli bir senaryo ile kontrol – “dik, dengede tut, götür”

#### Deneyin özeti:

Deneyin özeti, daha önce yapılan deneylerin uygun olanlarının biraraya getirilerek çubuğun dikilmesi, dikili durumda denge sağlanmışken aracın konum değiştirilmesidir.

#### Deneyin amacı:

Deneydeki amaç daha önceki deneylerin alt yapılarını kullanarak bir gösteri yapabilmektir. Deney 3 teki pist sınırının belirlenmesi, Deney 7 deki çubuk açısı referansı tesbiti, Deney 14 teki çubuk dikme, Deney 11 deki çubuk dengesi, Deney 13 teki konum değiştirme uygulamaları burada bir senaryonun parçaları olarak tekrarlanacaktır.

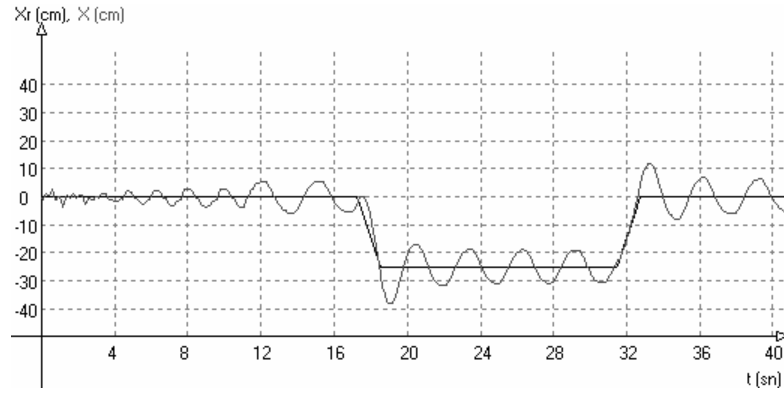
#### Deneyin yapılış basamakları :

Deney için Şekil 5.12 deki düzenek kurulmalıdır. Deneyin yapılış basamakları aşağıda sıralanmıştır;

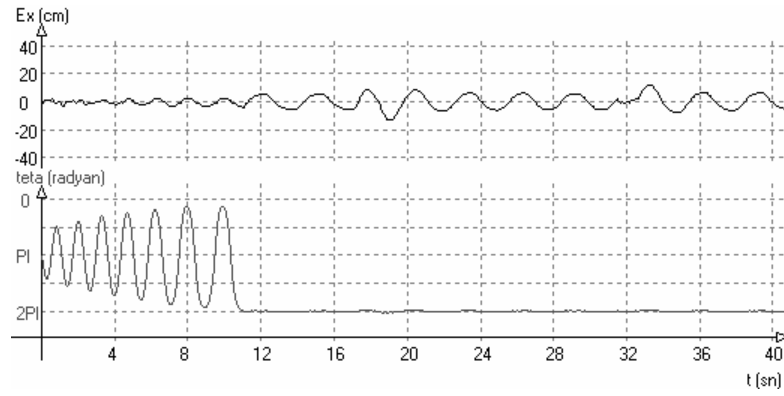
- 1- PC ve kontrol ünitesi deneye hazır duruma getirilir.
- 2- Pendulum.cfg dosyasında sarkaç ve araç için PD katsayıları girilir.
- 3- PC den “DENEY 15” butonu tıklanır ve geri çekilir.
- 4- “YUKLE ve CIZ” butonuna basılarak sarkaç-zaman grafiği çizdirilir.
- 5- “HARD DISKE SAKLA” butonuna basılır ve dosya ismi verilerek veri hard-diske aktarılır.
- 6- Deney başarı ile sonuçlanmazsa daha önceki deneylere dönülerek başarısız bulunan kısımlar üzerine yeniden çalışılır.

#### Deney sonucu değerlendirmeleri:

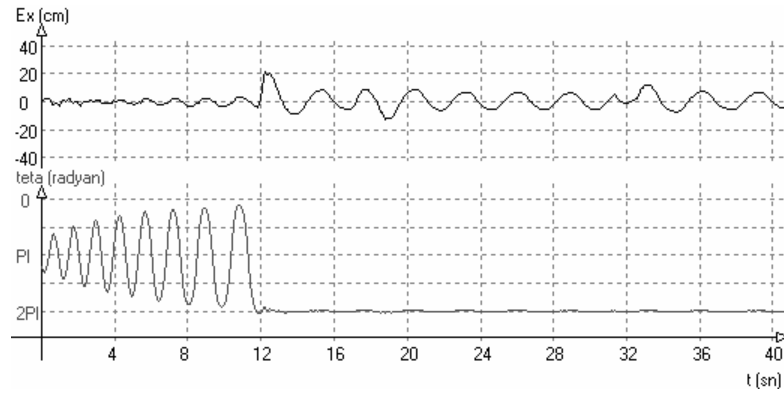
Deneyde başarılı bir senaryo uygulanmıştır. Deney sonucu elde edilen grafikler Şekil 5.63 - Şekil 5.65 ten incelenebilir.  $\theta(t)$  grafikleri dikme anlarında  $\theta$  nın  $2\pi$  ye başarıyla oturduğunu göstermektedir. Konum değiştirmelerinde ise  $\theta$  hataları ihmal edilebilecek kadar küçük kalmıştır. Parametreler ayarlanarak konumdaki salınımlar minimize edilebilir.



Şekil 5.63 Deney 15, ilk deneme “dik, dengede tut, götür”  $x(t)$  ve  $x_r(t)$  grafikleri



Şekil 5.64 Deney 15, ilk deneme “dik, dengede tut, götür”  $E_x(t)$  ve  $\theta(t)$  grafikleri



Şekil 5.65 Deney 15, ikinci deneme “dik, dengede tut, götür”  $E_x(t)$  ve  $\theta(t)$  grafikleri

## BÖLÜM 6

### SONUÇ

Tezde ulaşılmak istenen hedef belirgin kalitede, rekabet edebilir kriterlerde bir ters sarkaç sistemi prototipinin geliştirilmesi ve üretime hazırlanması idi. Hedefe başarı ile ulaşıldığı düşünülmektedir. Bu çalışmayla, Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümüne bilimsel kontrol çalışmaları yapmaya uygun düşük maliyetli bir düzenek kazandırılmıştır. Sistem kendimize ait bir ürün olduğundan ileride bakım-onarıma veya teknik ilavelere açıktır.

Tez kapsamında piyasa araştırmaları, maliyet analizleri, mekanik tasarım, elektronik tasarım, elektromekanik entegrasyon, yazılım modelleme, yazılım kodlama, simülasyon, kullanıcı arayüzü tasarımı, eğitime ve sunuma uygun deneysel uygulama çalışmaları yapılmıştır.

Piyasa araştırmalarında belirgin kalitede ters sarkaç üreten ve pazarlayan yurtiçi ve yurtdışı firmalar araştırılmıştır. Ürünlerin teknik özellikleri ve fiyatları incelenmiştir. Daha sonra yapılan ön maliyet analizlerinde benzer kalitede bir ters sarkacın çok daha makul bir fiyatla kendi bünyemizde üretilebileceği görülmüştür.

Sistemde kullanılacak mekanik ve elektromekanik parçalar belirlendikten sonra gereken hazır parçalar temin edilmiştir. Bunlara örnek olarak DC-servo motor, hassas ray, rulman, kayış, enkoder bloğu vs. verilebilir. Daha sonra gereken mekanik ara parçaların teknik çizimleri hazırlanmış ve atelyede üretilmiştir. Bu parçaların teknik çizimleri Solidworks paket programı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca tüm mekanik parçaların 3 boyutlu modelleri yine aynı programda hazırlanıp mekanik donanımın simülasyonu yapılmıştır. Mekanik imalatı yapılan parçaların ölçekli çizimleri Bölüm 2 de verilmiştir.

Elektronik tasarımda kontrol kartı en can alıcı parça olarak düşünülebilir. Analog Device firmasının ADSP2181 DSP işlemcisi ile yapılmış bir kontrol kartı bu işe uygun bulunmuştur. Kart daha önce başka bir proje için tasarlanmış ve test edilmiş olduğundan herhangi bir sorunla karşılaşılmasıdır. Motor sürücü kartı ve tuş/gösterge kartı da daha

önceden test edilmiş, Robotel Ltd. firmasında üretilen kendi kartlarımızdır [18]. Kartlar küçük modifikasyonlar yapılarak bu projede kullanılabilir şekilde getirilmişlerdir.

Elektromekanik entegrasyon yapıldıktan sonra uygun yazılım hazırlanarak sistemin donanım testleri yapılmıştır. Donanım testlerinde de başarı sağlandıktan sonra tekrarlanan maliyet çalışmalarında, ön maliyet analizlerindeki hedeflerden uzaklaşmadığı gözlenmiştir.

Sistemin rahat kullanılabilmesi açısından uygun bir kullanıcı arayüzüne ihtiyacı bulunduğu ilk yazılım çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Visual Basic programlama dili kullanılarak kontrol ünitesiyle veri haberleşmesi yapabilen basit bir arayüzü hazırlanmıştır. Daha sonra arayüzü, ihtiyaca göre geliştirilerek kolay deney yapılabilmesine izin verecek hale getirilmiştir. Ayrıca verilerin grafiklerinin çizilebilip arşivlenebildiği özellikler eklenmiştir.

Kontrol ünitesi için bir yazılım modeli tasarlanmıştır. Bu modelde arka planda periodik olarak çalışan bir interrupt programı ve ön planda interrupt programı ile senkron çalışan kontrol döngülerinin bulunduğu ana program bulunmaktadır. Interrupt programında hassas zamanlamalarla yapılması gereken enkoder okuma ve kesintisiz haberleşme türünde işler yapılmaktadır. Vakit alabilecek kontrol hesaplarının yapıldığı işler ise ana programda yer almaktadır. Kontrol ünitesi için hazırlanan tüm programlar makine kodu ile yazılmıştır. Bu yüzden performansta problem çıkmamış ancak hesaplamalar yapılırken oldukça güçlük çekilmiştir.

Deneysel çalışmalar yapılırken ilk olarak donanım testlerini teyit edecek geri beslemesiz basit bir deneyler başlanmıştır. Bu deneyi sırayla çubuksuz ve çubuklu olarak yapılan oransal (P), oransal-türevsel (PD) ve oransal-integral-türevsel (PID) geri beslemeli kontrol deneyleri takip etmiştir. Son aşamadaki deneylerde uygun katsayılarla dikme deneyi ile çubuk dikilmiş ve gürbüz bir şekilde dengeye oturtulmuştur. Dengeye oturduktan sonra çubuk, üzerine konan dolu kahve kupasını problemsiz dengede tutabilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Çubuk dengedeleyen

Deneyle sonucunda elde edilen veriler analiz edilmiştir ve arşivlenmiştir. Deneyle yapılırken eğitim amaçlı kullanılabilir şekilde olmalarına özen gösterilmiştir. Tez boyunca yapılan çalışmalardan örnek videolar Ek CD de verilmiştir.

Ortaya çıkarılan prototip laboratuvar kullanımına veya kontrol çalışmaları yapmaya hazır durumdadır. Üzerinde yapılan uygulamalar oransal (P), oransal-türevsel (PD) veya oransal- integral-türevsel (PID) deneyle yapmaya müsaittir. Ancak öğrencilere deney yaptırılması düşünülürse, amaca uygun deney kılavuzu hazırlanması yerinde olacaktır. Prototipin profesyonel anlamda ticarileştirilebilmesi için marka konarak kutulanmaya ihtiyacı vardır. Sistem yazılımı gelişmeye açıktır. Sistem, yazılım çalışmaları eklenerek bulanık mantık, sinirsel ağ gibi farklı kontrol yöntemlerinin de denenebileceği bir sete dönüştürülebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Acosta, J. A., Gordillo, F. and Aracil, J. “A new swing-up law for the Furuta pendulum,” *International Journal of Control*, vol. 76, no. 8, pp. 836–844, 2003.
- [2] Active Robots Limited, 10A New Rock Industrial Estate, New Rock, Chilcompton Redstock Somerset, BA3 4JE, United Kingdom, <http://www.activerobots.com>
- [3] Astrom, K.J. and Furuta, K. “Swinging up a Pendulum by Energy Control”, *Automatica*, Vol. 36, 2000.
- [4] Bugeja, M. “Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System”, *EUROCON 2003 Ljubljana, Slovenia*.
- [5] Chung, C.C. and J. Hauser, “Nonlinear Control of a Swinging Pendulum”, *Automatica*, Vol. 31, 1995.
- [6] Dylan Thorpe and James Driver Thorpe, “Design, Build and Control of a Single / Double Rotational Inverted Pendulum, Final Report”, The University of Adelaide, School of Mechanical Engineering , October 2004
- [7] Educational Control Products, 1 Bucskin Court, Bell Canyon, CA 91307, USA, <http://www.ecpsystems.com>
- [8] EOS Muhendislik Danışmanlık ve Yazılım Ltd. Şti. Hacettepe Üniversitesi Teknokent, <http://www.eosmuhendislik.com.tr>
- [9] Fantoni, I., Lozano, R. and Spong, M. W. “Energy based control of the Pendubot,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 4, pp. 725–729, Apr 2000.
- [10] Furuta, K. and Yamakita, M. "Swing up control of inverted pendulum" ,*IECON '91*, pp. 2193-2198, 1991.
- [11] Googol Technology Ltd., Room 3639, Annex Building, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, <http://www.googoltech.com>
- [12] Grasser, F. , Arrigo, A. D. Colombi, S. and Rufer, A. C. “JOE: a mobile, inverted pendulum,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107–114, Feb 2002.
- [13] Hasomed GmbH, Hasomed GmbH. Double/triple pendulum: Product documentation. Magdeburg, Germany. <http://www.hasomed.de> .



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)


- [14] Iwashiro, A., Furuta, K., and Astrom, K. J. "Energy based control of pendulum," in Proceedings of the IEEE Conference on Control Application, Dearborn, MI, 1996, pp. 715–720.
- [15] Ogata, K. Modern Control Engineering: Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 3rd ed., pp. 952-957, 1997.
- [16] Ohsumi, A. and Izumikawa, T. "Nonlinear control of swing-up and stabilization of an inverted pendulum," proceedings of the 34th conference on decision & control, pp. 3873-3880, 1995.
- [17] Quanser Inc, 80 Esna Park Drive, #1 ,Markham, Ontario, L3R 2R6,  
<http://www.quanser.com>
- [18] Robotel Limited Şirketi, Kalender Sokak 8/A, Kavacık-Subayevleri, Ankara.  
Email: [robotel@roboturk.com](mailto:robotel@roboturk.com) .
- [19] Rubi et al., Swing-up control problem for a self-erecting double pendulum. IEE Proceedings of Control Theory and Applications. v149. 169-175, 2002.
- [20] Slotine, J.J.E. and Li, W. Applied Non-Linear Control, Prentice- Hall Inc., New Jersey, 1991.
- [21] Wang, Z. , Chen,Y. and Fang, N. "Minimum-Time Swing-up of A Rotary Inverted Pendulum by Iterative Impulsive Control", Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004
- [22] Wiklund et al., Wiklund, M., Kristenson, A., & Astrom, K.J. (1993). A new strategy for swinging up an inverted pendulum. In Proceedings of 12th IFAC world congress Vol. 9, (pp. 151-154), 1993.
- [23] Yamakati et al., Yamakati, M., Iwashiro, M., Sugahara, Y., & Furuta, K. (1995). Robust swing up control of double pendulum. In Proceedings of American control conference (ACC) (pp. 290-295). Seattle, Washington, 1995.
- [24] Yamakati et al., Yamakati, M., Nonaka, K., & Furuta, K. (1993). Swing up control of double pendulum. In Proceedings of American control conference (ACC) (pp. 2229-2233). San Francisco, California, 1993.
- [25] Yang, T., "Impulsive Systems and Control: Theory and Applications", Nova Science Publishers, Inc., September 2001.
- [26] Yoshida, K. "Swing-up control of an inverted pendulum by energybased methods," proceedings of the American control conference, pp. 4045-4047, 1999.

## **EKLER**

### **Ek.1 Web Sayfalarından Alıntılar**


**Ek.1. Web Sayfalarından Alıntılar**

**Quanser firmasının web sayfalarından alıntı**



**QUANSER**  
INNOVATE. EDUCATE.

**Range of IP01/IP02 Challenges**



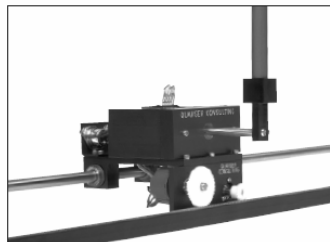
**IP01/IP02 Model Range**

**LINEAR CONTROL CHALLENGE**



**IP01 and IP02** Linear Motion Servo Plants

Product Information Sheet L1 - 1- rev. B



**Description**

Either the IP01 or the IP02 linear motion servo plants serve as the base unit for Quanser's linear family of products. Both plants are ideal platforms to introduce fundamental control concepts and theories on an easy to use and intuitive platform. They consist of a cart driven by a DC motor, via a rack and pinion mechanism to ensure consistent and continuous traction. The cart is also equipped with a rotary joint to which a free turning rod (or pendulum) can be attached. In the case of the IP01, both cart position and pendulum angle are sensed via potentiometers. By contrast, the IP02 system has two encoders, which allow for multiple turns. As a result, the IP02 pendulum can suspend in front of the cart to perform the self-erecting and gantry experiments.

**Key Features**

- Fully compatible with MATLAB/Simulink
- Modular design (experiments are easily interchangeable)
- High quality DC servo motor and gearbox
- High resolution optical encoders, on the IP02, to sense both cart and pendulum positions
- Ten-turn potentiometer, on the IP01, to sense the cart position
- Single-turn potentiometer, on the IP01, to sense the angle of the inverted pendulum
- Precisely machined solid aluminum cart
- Fully documented system models & parameters
- Variable cart load mass
- Variable pendulum rod length
- Open architecture design

**Curriculum Topics**

- Position & Speed Control
- Disturbance Rejection
- Tracking Control & Regulation
- PID Controller Design
- Lead / Lag Compensation
- State-Feedback
- System Modeling & Simulation
- Frequency Analysis
- Phase & Gain Margin
- Nyquist Stability
- Root Locus Design
- Real-Time Control
- Discrete Time Sampling
- System Identification
- Multivariable Control Design

Either the IP01 or the IP02 linear motion servo plant serves as the base unit for Quanser's Linear Control Challenges. With easily interchangeable modules, you can transform the IP01 or IP02 into any of these experiments:

**SISO Configurations (Single Input, Single Output)**

- IP01 or IP02: Position Control
- IP01 or IP02: Speed Control
- SIP: Linear Single Inverted Pendulum Control
- SPG: Linear Single Pendulum Gantry Control
- SESIP: Linear Self-Erecting Single Inverted Pendulum Control
- SLFJ: Single Linear Flexible Joint Control
- SLFJ-plus-SIP: Single Linear Flexible Joint with Single Inverted Pendulum Control
- DLFJ: Double Linear Flexible Joint Control
- SEESAW: Seesaw Control
- SEESAW-plus-SLFJ: Seesaw with Single Linear Flexible Joint Control
- FIP: Linear Flexible Inverted Pendulum Control
- DBIP: Linear Double Inverted Pendulum Control
- AMD-1: One-Floor Active Mass Damper Control

**MIMO Configurations (Multiple Input, Multiple Output)**

- SEESAW-Pendulum: Two Seesaw Modules Coupled Together to Control the Single Inverted Pendulum
- AMD-2: Two-Floor Active Mass Damper Control


Some configurations require IP02, please confirm at time of order.

Model	Description
IP01	The IP01 is instrumented with a 10-turn potentiometer to measure cart position. Pendulum angle is measured using a potentiometer whose range is restricted by mechanical stops.
IP02	The IP02 is instrumented with two quadrature optical encoders, one each for cart position and pendulum angle. The shaft to which the pendulum is attached allows for the pendulum to be suspended in front of the cart, free of the mechanical stops. This permits additional configurations with unrestricted movement of the pendulum.

With Quanser the possibilities are infinite

+1 (905) 940-3575 [www.quanser.com](http://www.quanser.com)

Quanser firmasının web sayfalarından alındı



**QUANSER**  
INNOVATE. EDUCATE.

**Typical Response**

**System Requirements**

**System Specifications**

**LINEAR CONTROL CHALLENGE**



**IP01 and IP02** Linear Motion Servo Plants

Product Information Sheet L1 - 2 - rev. B

The following graph depicts both actual and theoretical position responses of a PV position controller design.

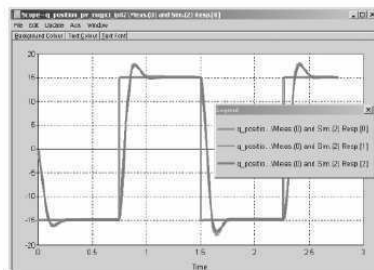


Figure 1: PV Controller: Actual and Theoretical Position Responses to a Square Wave Setpoint

The following graph depicts both actual and theoretical speed responses of a phase-lag-based controller design.

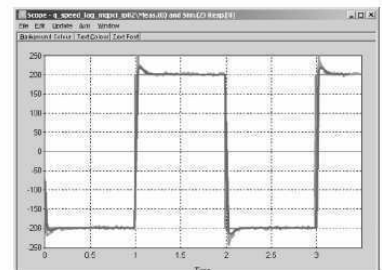


Figure 2: Phase-Lag Controller: Actual and Theoretical Speed Responses to a Square Wave Setpoint

The IP01 or IP02 plants require the following components to complete the experimental setup:

Component	Quanser Recommended (Common Configuration)	Alternative
Power Module	Quanser UPM 1503/2405	Alternate Power Amplifier (Minimum requirements: +/- 12V, 3A)
Control Hardware	Quanser Q4, Q8 Series	dSPACE DS1104* National Instruments E-Series DAQs*
Control Software	Quanser WinCon	The Mathworks – RTWT, xPC dSPACE – ControlDesk National Instruments – Labview RT

\* Quanser offers interface boards for NI E-series & dSPACE DS1104 boards.

Specification	Value	Units
Cart Dimensions (L x D x H)	10 x 14 x 9	cm
Overall Rack Length	1.02	m
Cart Travel	0.814	m
Cart Mass	0.5	kg
Cart Extra Weight Mass	0.37	kg
Rated Voltage	6	V
Maximum Continuous Current	1	A
DC Motor Torque Constant	0.00767	Nm/A
Planetary Gearbox Gear Ratio	3.71	
Long Pendulum Mass	0.23	kg
Medium Pendulum Mass	0.127	kg
Long Pendulum Length (from Pivot to Tip)	0.6413	m
Medium Pendulum Length (from Pivot to Tip)	0.3365	m
IP01 Inverted Pendulum Mechanical Range	±32	deg
IP01 Cart Potentiometer Bias Power	±12	V
IP01 Cart Potentiometer Measurement Range	±5	V
IP01 Cart Potentiometer Sensitivity	0.0931	m/V
IP01 Pendulum Potentiometer Sensitivity	0.2482	rad/V
IP02 Cart Encoder Resolution	4096	counts/rev
IP02 Pendulum Encoder Resolution	22.8	µm/count
	4096	counts/rev
	0.0879	deg/count

With Quanser the possibilities are infinite

+1 (905) 940-3575 [www.quanser.com](http://www.quanser.com)

Products and/or services referred to herein are trademarks or registered trademarks of Quanser Inc. and/or its affiliates. Other product and company names mentioned herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners. © 2006 Quanser Inc. All rights reserved. Specifications are subject to change without notice. Errors and omissions excepted.

## Quanser firması temsilciliğinden fiyat teklifi

PROFORMA FATURA			
 <b>SIMCOTECH</b> <i>Simulation, Control and Test Technologies</i>	Remzi Artar Simulasyon, Kontrol ve Test Teknolojileri H.Ilyas Mah. Gumus sok. NO:27 K:1 Osmangazi - BURSA Tel/Fax: (+90) 224 328 54 66 Web: www.simco-tech.com		
BUTUN FIYATLAR EURO (EUR) CINSINDEN VERILMISTIR. KDV HARICTIR			
<b>ALICI</b>	<b>OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ – ESKİŞEHİR</b>		
<b>TEKLİF TARİHİ</b>	<b>9 Mayıs 2007</b>		
<b>SATICI</b>	<b>TESLİMAT</b>	<b>ÖDEME</b>	<b>NAKLIYE ŞEKLİ</b>
Remzi Artar- Simcotech	Sipariş tarihinden itibaren 60 gün içinde	%80 sipariste. %20 teslim tarihinden itibaren en geç 2 hafta içerisinde	Osmangazi Üniversitesine teslim
<b>SELF ERECTING INVERTED PENDULUM</b>			
Adet	MALIN DETAYLI TARİFİ	TOPLAM TUTAR(EUR) -KDV hariç	
1	SE Inverted Pendulum deney seti aşağıdaki komponentleri içerir: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>IP02- Linear Inverted Pendulum</b> (Doğrusal Ters Sarkaç)</li> <li>- <b>Q4 - Hardware-In-The-Loop Board – Veri Toplama ve Kontrol Kartı</b> terminal bordu ve kabloları ile</li> <li>- <b>UPM 1503</b> (Universal Güç Ünitesi)</li> <li>- <b>WINCON 5.1</b> (Gerçek Zamanlı Yazılım)</li> </ul> Wincon 5.1'in çalışması için gerekli yazılımlar ve versiyonlar: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Microsoft Windows XP Professional Edition SP2</li> <li>- Microsoft Visual Studio .NET 2005 Professional Edition (8.0)</li> <li>- MathWorks MATLAB (2006b) (w/ Simulink, RTW ve Control Systems Toolbox)</li> </ul>	<b>9750,00</b>	
	<b>Gumruk+Nakliye</b>	<b>1170,00</b>	
	<b>TOPLAM</b>	<b>10920,00</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tüm Quanser ekipmanları üretim hatalarına karşı 1 yıl garantilidir.</li> <li>- Fiyat Teklifimiz teklif tarihinden itibaren 60 GÜN geçerlidir.</li> <li>- Banka Bilgileri: AKBANK YENİYOL BURSA ŞUBESİ- Sube Kodu: 275 Hesap No: 40454 Hesap Sahibi: Remzi ARTAR</li> </ul>			

## EOSMEC Kontrol Eğitim Kiti



### GENEL ÖZELLİKLER

EOSMEC Kontrol eğitim kiti, bir çok kontrol algoritmalarının ve teorilerinin uygulamasında kullanılabilir bir sistemdir. Sistemde bir dc motor ile hareket edebilen araba ve doğrusal rulmanlar ve ray ile arabanın yataklandığı ray sistemi bulunmaktadır. Araba üzerinde pozisyon ölçümü için hassas bir potansiyometre ve ayrıca dikey sarkaç açısının ölçülebilmesi ikinci bir hassas potansiyometre bulunmaktadır. Arabanın motor devrinin ölçülmesi için sistemde ayrıca bir encoder bulunmaktadır. Tüm sistem elektrostatik boyanmış sert alüminyum malzemeden üretilmiştir.

### ÖZELLİKLER

- Modüler tasarım
- Montaj kolaylığı
- Tek sistemle birden çok deney
- Yüksek torklu dc motor
- Hassas pozisyon potansiyometresi
- Hassas sarkaç açısı potansiyometresi
- Araba üzerine gömülü ivme sensörü
- Optik motor devir sensörü (encoder)
- Yüksek verimli motor sürücüsü
- Farklı araba yükleri
- Farklı sarkaç çubukları
- Matlab / Simulink uyumu
- Örnek deney yazılımları
- Deney föyleri ve dokümantasyon

### UYGULAMALAR

- dc motor hız kontrolü
- PWM kontrol
- Pozisyon kontrolü & servo motor
- P kontrol algoritmaları
- PI kontrol algoritmaları
- PID kontrol algoritmaları
- Sistem modelleme & simülasyon
- Genişletilmiş Kalman Filtre (EKF)
- Salınım analizleri
- Döngü içinde donanım kontrolü
- Gerçek zamanlı kontrol
- Sistem tanımlama

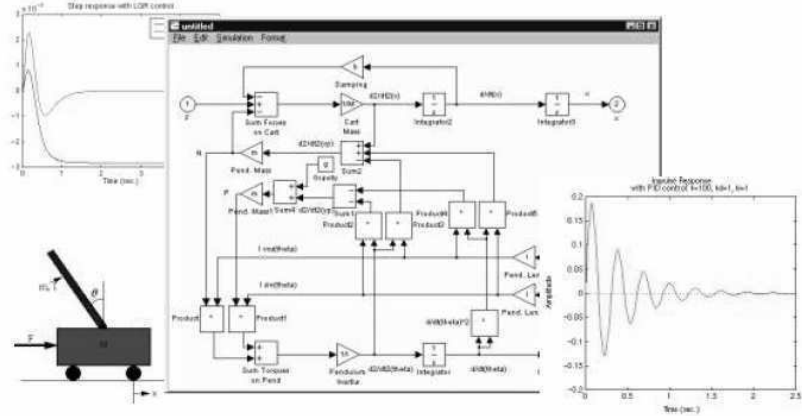
### DENEY KONFİGÜRASYONLARI

EOSMEC Kontrol Eğitim Kiti bileşenleri ile aşağıda belirtilen uygulamalar yapılabilir. Tüm bu uygulamalar Matlab / Simulink ortamlarında geliştirilebilir ve kit ile birlikte sunulan deney föyleri ve örnek Matlab / Simulink programları ile sınavabilir.

- DE-1** PWM Jeneratörü
- DE-2** dc Motor Hız Kontrolü
- DE-3** Orantılı (P) Servo Motor Kontrolü
- DE-4** PID Servo Motor Kontrolü
- DE-5** Servo Motor Durum Uzayı Modelleme
- DE-6** Dikey Sarkaç PID Kontrolü
- DE-7** Dikey Sarkaç Durum Uzayı Modelleme
- DE-8** İvme sensörü Pozisyon Tahmini (Genişletilmiş Kaman Filtre-EKF)

EOS Muhendislik Danışmanlık ve Yazılım Ltd. Şti. firmasının web sayfalarından alıntı

## EOSMEC Kontrol Eğitim Kiti



### ÖRNEK SIMULINK PROGRAMLARI

- SW-1 PWM / Simulink
- SW-2 dc motor speed / Matlab
- SW-3 P controller / Matlab, Simulink
- SW-4 PID controller / Matlab, Simulink
- SW-5 State-space / Simulink
- SW-6 PID Pendulum / Simulink
- SW-7 SS Pendulum / Simulink
- SW-8 EKF / Matlab / Simulink

### TEKNİK ÖZELLİKLER

Ray uzunluğu	1300 mm
Net hareket boyu	1200 mm
Sistem gerilimi	24 V
Motor torku	20 Ncm (max)
Motor akımı	2 A (max)
Dişli kutusu oranı	3.6
Araba boyutları	120 x 100 x 70 mm
Sarkaç boyutları	500 / 1000 mm
Pozisyon pot. çözünürlüğü	0.2 mm/mV
Açı pot çözünürlüğü	0.05 deg/mV
Devir sensörü çözünürlüğü	360 CPR
İvme sensörü çözünürlüğü	2 mg

### ÜRÜN KODLARI

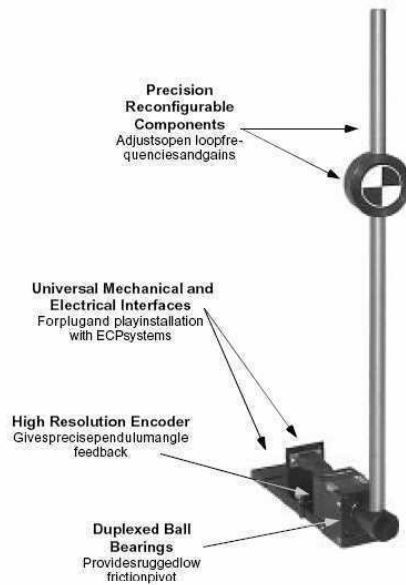
ÜRÜN	ÜRÜN KODU	FİYATI (USD\$)
EOSMEC Kontrol Eğitim Kiti (tüm mekanik elemanlar + sensörler)	EOSMEC	4.200
Güç Kaynağı + PWM Sürücü (EOSMEC güç kaynağı + PWM sürücü)	EOSMEC-PS	400
DAQ Kartı + Terminal (PCI DAQ + Terminal kutusu + test yazılımı)	DAQ	2.800
Örnek deney yazılımları kiti (8 adet örnek deney yazılımı)	EOSMEC-SW	600

Educational Control Products firmasının web sayfalarından alıntı

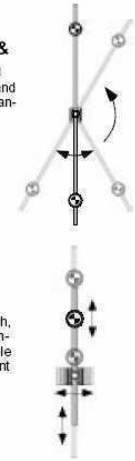


## Inverted Pendulum Accessory

A Second Pendulum Option From ECP: Modular System Add-on



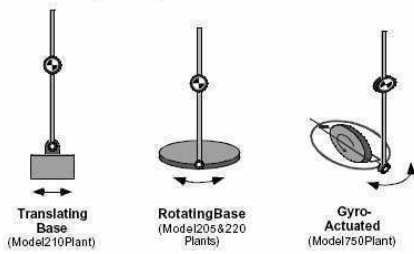
**Self-Erecting, Inverted & Noninverted Operation**  
Lets you control open loop stable and unstable systems and dynamically transition between the two



**Fully Adjustable Dynamic Parameters**  
Adjustable pendulum weight, rod length, and base inertia are ideal for studying control robustness and supporting multiple student assignments with same equipment

Our inverted pendulum accessory is a cost effective way to enhance your laboratory's capability. It has a wealth of features not found in any other commercially available inverted pendulum apparatus. Precision construction, fully adjustable dynamic parameters, and easy installation make it a valuable addition to any control systems laboratory. As with all ECP systems, complete dynamic models and example controllers are provided along with Matlab® scripts, for easy control modeling and design. The Executive USR® program lets you easily implement control and characterize the system via transient response, frequency response, stability and parameter robustness test features. With provided controllers and plug-and-play installation you will get the system up and running in just minutes and perform interesting experiments the very same day!

### Easily Adapts to Most ECP Plants

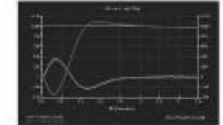


### Two Pendulum Solutions From ECP

ECP now offers two pendulum choices. Our ECP Inverted pendulum (Model 505) is a stand-alone system with unique dynamic characteristics (right half plane zeros and poles). This system has proven itself in 10 years of reliable in-field use and offers one of the lowest cost solutions for a stand-alone experiment commercially available. The Pendulum Accessory (A51) described on this page is based on the classical inverted pendulum model and adds on to other stand-alone ECP systems using their actuators, base feedback, and electronics.

### Stimulating Experiments

(Example: High Bandwidth Step Response)



Commanded position (yellow), Base Position (red) and Pendulum Angle (green) test data show classical response characteristics

A high bandwidth stabilizing controller regulates the base position. In the step response, the base makes an initial rapid reverse motion (nonminimum phase controller) [2], then moves in a positive direction [3] and overtakes the rod [4], to decelerate it and come to a final position [5]. The maneuver is complete in 0.8 seconds.



## Active Robots firmasının web sayfalarından alıntı

Active Robots - Inverted Pendulum System - Control Theory Apparatus - UK - Windows Internet Explorer

E:\my drive e documents\pendulum\web sayfaları ve flatlar\Active Robots - Inverted Pendulum System - Control Theory Apparatus - U

Search web...

Active Robots - Inverted Pendulum System - Control ...

**Browse our Online Catalogue**

ACTIVE ROBOTS  
Robotics and Electronics Technology

Home About Us Contact Latest Products Batteries Robot Kits Controllers Accessories Radio Distributors Links View Basket

Early Learning 3m - 7+Yrs  
Platforms & Chassis  
Programmable Robot Kits  
Microprocessor Control  
Motor Controllers  
Motors & Wheels  
LEGO Kits & Accessories  
LEGO Preschool / DUPLO  
Mindstorms for Schools  
Phidgets USB Interfaces  
Ethernet Control Products  
Radio Solutions  
Transducers & Sensors  
Batteries Chargers PSUs  
Inverted Pendulum  
Inverted Pendulum  
Radio Control Models  
Robonova Humanoid Robot  
Robot Magazine  
Robotics Accessories  
Serial Text/Graphic LCDs  
Ordering Information  
Legal Notices  
Site Map  
Search

**PC Based Control Inverted Pendulum System**

**Inverted Pendulum System**

The inverted pendulum (IP) system is essential in the evaluation and comparison of various control theories. The inverted pendulum is used in simulations and experiments to show the performance of different controllers (e.g. PID, State Space and Fuzzy Controllers etc).

**What is an Inverted Pendulum?**

At some time you may have tried to balance a brush, bat or other object on your index finger or the palm of your hand? You had to constantly adjust the position of your hand to keep the object upright. An Inverted Pendulum does basically the same thing. However, it is limited in that it only moves in one dimension, while your hand could move up, down, sideways, etc. Take a look at the video provided to see exactly how the Inverted Pendulum works.

**What is the IP used for?**

Just as balancing with your hand, an Inverted Pendulum is an inherently unstable system. Force must be properly applied to keep the system intact. To achieve this, proper control theory is required. The Inverted Pendulum is an invaluable tool for the effective evaluation and comparison of various control theories.

**Features**

- Rotational inverted pendulum
- Simple architecture
- Requires minimal space
- PC base control
- Printer port interface
- Easily self inverted
- System model for Matlab included
- 3D Animation recorder and viewer, source code

**Inverted Pendulum System** Product Code: MR-010  
£2,451.50 (Inc VAT £2,880.51) 1 Add to your Cart STATUS: In Stock

Standard shipping within UK only. Wire transfer payment required for overseas orders.  
**Overseas Delivery - contact us for the shipping cost** (volumetric weight 20.0Kg).

Copyright © Active Robots Ltd. 2003 - 2007 Wednesday, May 23, 2007

Internet 100%

## Googol Technology Ltd. firmasının web sayfalarından alıntı

GOOGOL TECHNOLOGY LTD. - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

http://www.googoltech.com/web/eng/the\_company.jsp

Customize Links Free Hotmail My Yahoo! Windows Marketplace Windows Media Windows Yahoo! Downloads Yahoo! Mail Yahoo!



固高科技有限公司  
GOOGOL TECHNOLOGY LTD

HOME | ABOUT US | PRODUCT | TECHNICAL SUPPORT | GOOGOL INSTITUTE | CONTACT US | REQUIREMENT | LINKS | SITE MAP 中文

**:: ABOUT US / THE COMPANY ::**



Googol Technology (HK) Ltd. is the first high-tech company in Asia Pacific region specializing in R&D, production, marketing, and support of motion controllers and controller based systems. Googol Technology's motion controllers and systems are applied in wide range of industries including semiconductor / microelectronics, plastic injection molding, and CNC machine tool. Regional application engineering expertise, strong support, cost effectiveness, and high performance set Googol Technology apart from all others.

Founded in 1999 by experts in motion control and mechatronics with combined over 60 years of experience in R&D and management in UC Berkley, MIT, and Bell Lab, the company is located in entrepreneur center of Hong Kong University of Science & Technology.

Googol Technology ( Shenzhen ) Ltd., the subsidiary owned by Googol HK, is located at High-Tech Industrial Park on Shenzhen, China, with the best talent and resources from many countries and Chinese mainland together, Googol SZ is a full Hedge operation with products R&D, application engineering, manufacturing and technical supports.

Since the first day of Googol Technology's establishment, the company has strived relentlessly to roll out series of motion controllers and controller based systems. Googol Technology currently has GO/GM/GT/GH series multi axis motion controllers for customers with increasing level of application sophistication and budget, specialized control systems including CNC for machine tool, and educational products for schools and universities. In addition, Googol Technology provides custom-made engineering service to solve clients' various motion control challenges.



Googol Technology ( SZ ) Ltd.

Product Enquiry Back to Home

Copyright 2005 Googol Technology (HK) Limited. All Rights Reserved

Done

**Invitation to The First International Technical and Vocational Education Fair in Shenzhen, China:** (08 Apr 06) 

Dear friends,

Greeting from Googol Technology. The First China International Technical and Vocational Education Fair (Please click the link below for more information) will be held in Shenzhen Conference and Exhibition Center from May 18th-21st. Googol Technology Ltd will participate in this event and exhibit our most advanced educational products such as inverted pendulum series, ball and beam system, magnetic levitation system, motion controllers, etc. The First International Technical and Vocational Education Fair is one of the theme exhibitions of The Second China (Shenzhen) International Cultural Industry Fair, hundreds of domestic and oversea vocational colleges, technical universities, and vocational and educational equipment manufacturers will show up. Googol Technology sincerely invites you to visit and talk to us at **booth 261**.

Googol Technology has established close relationship with over 800 domestic and oversea first class schools, vocational and technical colleges, and scientific research institutes. We earnestly hope that we will be your loyal assistants and together we will promote the reformation of engineering education.

We are looking forward to seeing you there.

 The First China International Technical and Vocational Education Fair



## ÖZGEÇMİŞ

**Gökhan Dındış** Ocak 1964, Eskişehir doğumludur ve Türkiye Cumhuriyeti vatandaşıdır. İlk orta ve Lise öğrenimini Ankarada tamamlamıştır. 1985 yılında Anadolu üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinden bölüm birincisi olarak mezun olmuş, 1987 yılında yine aynı üniversiteden yüksek lisans derecesini almıştır.

Northern Telekom, Aselsan gibi Türkiye'nin elektronikte lider firmalarında araştırma geliştirme mühendisi olarak çalıştıktan sonra 1990 yılında A.B.D ye yerleşmiştir. Yurt dışındaki çalışmalarına, Elektrik, Elektronik ve Makine Mühendisliği konularında donanım, yazılım ve entegrasyonları kapsamında araştırma ve geliştirme mühendisi olarak devam etmiş olup Amerikan Patent Enstitüsü tarafından kabul edilen bir patenti mevcuttur. 2002 yılından sonra çalışmalarını büyük ölçüde Türkiye'de devam ettiren Gökhan Dındış, insansız hava araçları, gezgin otonom robotlar, robotik, yapay zeka, kontrol sistemleri, kullanıcı arayüzü geliştirme, otomasyon sistemleri, yeraltı yüksek gerilim kablo test cihazları ve metodları, zaman eksenli yansıma ölçer (TDR) sistemleri, nümerik kontrollu cihazlar ve güç elektroniği konularıyla ilgilenmektedir.