

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## **ASILI SARKAÇ SİSTEMİNDE KONUM KONTROLÜ**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet KÜÇÜKER**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Saadettin AKSOY**

**Haziran 2007**

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## **ASILI SARKAÇ SİSTEMİNDE KONUM KONTROLÜ**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet KÜÇÜKER**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK**

**Bu tez 20 / 06 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Doç. Dr. Saadettin AKSOY  
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU  
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat BOZ  
Üye**

## TEŞEKKÜR

Bütün öğrenim hayatım boyunca ve özellikle tez konumun belirlenip yapımı aşamasında bana yol gösteren ve her türlü açmazlarımı kolaylaştıran danışman hocam sayın Doç. Dr. Saadettin Aksoy'a, hayatıma akademisyen olarak devam etme kararını almamda büyük etkileri olan Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bayrak ve Doç. Dr. Zafer Demir'e, arkadaşlarım Arş. Gör. Burhan Baraklı, Arş. Gör. Melih Göksel'e, çalışmalarım süresince bana kaval ve bağlama çalarak beni dinlendiren kardeşime, yaptığı pasta, börek ve açmalarla tezimin doyurucu olmasını sağlayan anneme, maaş kartını bana vermesiyle maddi açıdan destekleyen babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ASILI SARKAÇ SİSTEMİ .....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Sarkaç Sistemin Uygulama Alanları.....	8
2.3. Asılı Sarkaç Sistemin Oluşturulması.....	9
2.4. Sistemin Matematiksel Modeli.....	10
BÖLÜM 3.	
KONTROL YÖNTEMLERİ.....	12
3.1. Giriş	
3.1.1. Açık çevrim kontrol .....	12
3.1.2. Kapalı çevrim kontrol .....	13
3.2. PID Kontrol .....	13
3.3. Model Esaslı Adaptif Kontrol .....	15
3.3.1. Adaptif kontrol ve MEAK'ın tarihi gelişimi .....	15
3.3.2. Adaptif kontrolün kullanım alanları .....	17

3.3.3. MEAK yöntemi .....	19
3.3.4. MEAK türleri .....	20
3.3.5. MIT kuralı .....	21
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>BENZETİM ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>26</b>
4.1. Giriş.....	26
4.2. Sistemin Model Benzetimi ve Animasyonu.....	26
4.3. Kontrolörsüz Geri Beslemeli Sistemin Benzetimi.....	29
4.4. PID Kontrolörlü Sistemin Benzetimi .....	30
4.5. Model Esaslı Adaptif Kontrolörlü Sistemin Benzetimi .....	33
4.5.1. MIT kuralıyla sarkaç sistemin benzetimi .....	33
4.5.2. I. Dereceden sistemin MEAK benzetimi.....	38
4.6. MEAK MIT kuralı ve PD Kontrolörlü Sistemin Benzetimi .....	38
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>41</b>
5.1. Giriş.....	41
5.2. Kontrolörsüz Geri Beslemeli Sisteme İlişkin Deneysel Sonuçlar....	42
5.3. PID Kontrollü Sisteme İlişkin Deney Sonuçları .....	43
5.4. Model Esaslı Adaptif Kontrolörlü Sistemin Deney Çalışması.....	45
5.5. MEAK ve PD Kontrollü Sistemin Deney Çalışması .....	48
<b>BÖLÜM 6.</b>	
<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>51</b>
<b>BÖLÜM 7.</b>	
<b>TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....</b>	<b>53</b>

KAYNAKLAR.....	54
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$a$	: İvme
$c$	: Viskoz sönümleme katsayısı
$d$	: Askı noktasının ağırlık merkezine uzaklığı
$e$	: Hata işareti
$F$	: Kuvvet
$g$	: Yerçekimi sabiti
$G$	: Sistem transfer işlevi
$G_m$	: Model transfer işlevi
$h$	: Yükseklik
$J$	: Atalet moment
$J(\theta)$	: Performans ölçütü
$K_d$	: Türevsel kontrol katsayısı
$K_i$	: İntegral kontrol katsayısı
$K_m$	: Gerilim tork orantısı sabiti
$K_p$	: Oransal control katsayısı
$L$	: Sarkaç çubuk uzunluğu
$m$	: Sarkaç çubuk kütlesi
$T_0$	: Salınım periyodu
$T_s$	: Örnekleme süresi
$u$	: Sistem giriş işareti
$u_c$	: Sistem control giriş işareti
$v$	: Hız
$V$	: Gerilim
$y$	: Sistem çıkış işareti
$y_m$	: Model çıkış işareti
$z$	: Sönüm oranı

$\theta$	: Sarkaç açısı
$\gamma$	: Adaptasyon oranı
$w$	: Açısal hız
$\Delta K$	: Kinetik enerji değişimi
$\Delta U$	: Potansiyel enerji değişimi
PID	: Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol
MEAK	: Model Esaslı Adaptif Kontrol



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Sarkaç sistemi genel görünüşü.....	3
Şekil 2.2.	Sarkaç sisteminde etkileyen kuvvetler.....	4
Şekil 2.3.	Sarkaç sistemi.....	5
Şekil 2.4.	Asılı sarkaç kontrolü düzeneği.....	9
Şekil 2.5.	Sisteme ilişkin blok diyagramı.....	11
Şekil 3.1.	Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.....	12
Şekil 3.2.	Kapalı çevrim kontrol blok diyagramı.....	13
Şekil 3.3.	PID kontrol blok diyagramı.....	14
Şekil 3.4.	MEAK genel blok diyagramı.....	19
Şekil 3.5.	Adaptif ileri besleme kazançlı sistemin blok diyagramı.....	23
Şekil 4.1.	Sisteme ilişkin benzetim modeli blok diyagramı.....	27
Şekil 4.2.	60° başlangıç açısı için sarkaç açısının zamana göre değişimi...	28
Şekil 4.3.	Sistem salınımının animasyonundan görüntüler .....	28
Şekil 4.4.	Kontrolörsüz geri beslemeli sistemin benzetimi blok diyagramı	29
Şekil 4.5.	Kontrolörsüz sistemde 20°'lik referans sarkaç açısına ilişkin sarkaç açısının zamana göre değişimi.....	30
Şekil 4.6.	PID'li kontrol benzetimi blok diyagramı.....	31
Şekil 4.7.	PID'li kontrol benzetim sonuçları.....	32
Şekil 4.8.	MEAK blok diyagramı.....	35
Şekil 4.9.	MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.1$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	36
Şekil 4.10.	MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.01$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	36
Şekil 4.11.	MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.001$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	37
Şekil 4.12.	MEAK MIT kuralı 1.dereceden sisteme ilişkin $\gamma = 0.001$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	38

Şekil 4.13.	MEAK MIT +PD kontrol blok diyagramı.....	39
Şekil 4.14.	MEAK MIT Kuralı + PD kontrollü asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.1$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	39
Şekil 4.15.	MEAK MIT Kuralı + PD kontrollü asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.01$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	40
Şekil 4.16.	MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.001$ için çıkış açısının zamana göre değişimi.....	40
Şekil 5.1.	Deney düzeneği.....	41
Şekil 5.2.	Kontrolörsüz geri beslemeli sisteme ilişkin blok diyagramı.....	42
Şekil 5.3.	20°'lik referans girişine ilişkin çıkış eğrisi.....	42
Şekil 5.4.	PID'li kontrole ilişkin blok diyagramı.....	43
Şekil 5.5.	PID'li kontrole ilişkin deney çalışması sonuçları.....	44
Şekil 5.6.	MEAK blok diyagramı.....	45
Şekil 5.7.	MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin $\gamma = 0.1$ için deneysel çıkış eğrisi.....	46
Şekil 5.8.	MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin $\gamma = 0.01$ için deneysel çıkış eğrisi.....	46
Şekil 5.9.	MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin $\gamma = 0.001$ için deneysel çıkış eğrisi.....	47
Şekil 5.10.	MEAK+PD kontrol blok diyagramı .....	48
Şekil 5.11.	MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.1$ için deneysel çıkış eğrisi.....	49
Şekil 5.12.	MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.01$ için deneysel çıkış eğrisi.....	49
Şekil 5.13.	MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin $\gamma = 0.001$ için deneysel çıkış eğrisi.....	50
Şekil A.1.	Çözücü seçim ekranı.....	57
Şekil A.2.	Model özellikleri ekranı.....	58
Şekil A.3.	Sistem benzetim modeli.....	59
Şekil A.4.	Başlangıç açısı belirleme ekranı.....	59
Şekil A.5.	Animasyon modeli.....	60
Şekil A.6.	S-fonksiyon blok parametreleri giriş arayüzü.....	61
Şekil A.7.	Kontrolörsüz geri beslemeli sistem modeli.....	61
Şekil A.8.	PID kontrolörlü sistem modeli.....	62

Şekil A.9.	MEAK MIT sarkaç sistem modeli.....	63
Şekil A.10.	MEAK MIT 1. dereceden sistem modeli.....	64
Şekil A.11.	MEAK+PD MIT sarkaç sistem modeli.....	65
Şekil D.1.	Geri beslemeli kontrolörsüz sistem ön panel.....	72
Şekil D.2.	PID kontrol ön panel.....	73
Şekil D.3.	MEAK ve MEAK+PD kontrol ön panel.....	74
Şekil D.4.	Sistemin genel görüntüsü.....	75

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Asılı Sarkaç Sistem, Konum kontrolü, Model Esaslı Adaptif Kontrol, PID

On sekizinci yüzyıldan günümüze dek değişik alanlarda uygulanan asılı sarkaç sistemi konum kontrolü kontrol mühendisliğinin önemli bir sorunudur. Zamanla sarkaç parametrelerinde oluşan değişimler sistemin kontrolünü olumsuz yönde etkilemekte ve kararsızlığa sebep olabilmektedir. Söz konusu bu sorunların çözümü için literatürde geniş uygulama alanı bulan PID vb. gibi klasik kontrol yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Sorunun çözümü için adaptif kontrol yöntemlerini kullanmak kaçınılmaz olmaktadır.

Bu çalışmada asılı sarkaç sisteminin model esaslı adaptif konum kontrolü öngörülmüştür. Öncelikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bir asılı sarkaç sisteminin matematiksel modeli kullanılarak Matlab/Simulink yazılımı ortamında PID ve model esaslı adaptif kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Daha sonra aynı kontrol yöntemleri Labview yazılımı kullanılarak gerçek zamanda yürütülerek değişik koşullar için deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu, PD kontrolör ile model esaslı adaptif kontrolün birlikte kullanılması durumunda oldukça iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir.

# **POSITION CONTROL IN COMPOUND PENDULUM SYSTEM**

## **SUMMARY**

**Key Words:** Compound Pendulum System, Position Control, Model Reference Adaptive Control, PID

Compound pendulum system position control which is applied in different fields from eighteenth century to today has been an important problem of control engineering. Changes in pendulum parameters in the course of time affects system control negatively and could cause system instability. Classical control methods like PID etc. which have a great application area in literature became insufficient for solution of these mentioned problems. So the solutions of this problem using adaptive control methods are being necessary.

Model reference adaptive position control in compound pendulum system has been supposed in this study. At first, using mathematical model of the compound pendulum system realized in the laboratory environment, PID and model reference control methods applied by using Matlab/Simulink software. After that the mentioned control methods are applied in real time with Labview Software and experimental results for different conditions are obtained. Simulation results and experimental results that has been obtained nearly the same and PD controller with model reference adaptive control fairly well results have been observed.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Asılı sarkaç ileri düzey fizik eğitiminde standart bir konu olmasıyla beraber birçok laboratuvar programlarında da ele alınmaktadır [1]. Ağırlık merkezinin yeri ve atalet momenti parametrelerinin belirlenmesi karmaşık hesaplamalar gerektirir [2]. Bunun yanı sıra sadece açısal dinamikler yardımıyla belirlenebilen ve zor fark edilebilen ağırlık dağılımının etkilerinin kavranması da çok zordur. Asılı sarkaç sistemlerin kontrolü dönme momenti, atalet momenti, basit harmonik hareket gibi konuların anlaşılmasını sağlar [3].

Asılı sarkaç konum kontrolüne ihtiyaç duyulan alanlar arasında protez bacak modellemesi, yelkenli gemilerin dengesi, halatlı yük taşıma sistemleri gibi alanlar sıralanabilir. Sistemin kullanıldığı alana bağlı olan çeşitli etkiler sonucu sistem modelinin değişmesi ve dolayısıyla kontrol noktasında zaman kaybı oluşması ve bazı durumlarda da sistemin kararsızlığa gitmesiyle karşılaşmaktadır [4].

Bu çalışmada asılı sarkaç sistemin konum kontrolünün gerçekleştirilmesi ve belirlenen sistem parametrelerinin değişmesi halinde kontrol parametrelerinin sistemi belirlediğimiz modelin dışına çıkamayacak şekilde ayarlaması amaçlanmaktadır.

Literatürde genellikle ters sarkaç sistemi üzerinde çalışmalarla karşılaşmaktadır. Parametre ayarlama konusunda kullandığım Model Esaslı Adaptif Kontrol algoritmasının MIT kuralı ile uygulanmasının kararlılık problemlerine yol açtığı belirtilmektedir [5].

İkinci bölümde asılı sarkaç sistemi ve salınım hareketi hakkında bilgiler verilmektedir. Sistemin matematiksel modelinin oluşturulması, model parametrelerinin incelenmesi konularında bilgilerin de yer aldığı bu bölüm sistemi tanımamız için önemlidir.

Üçüncü bölümde birim geri beslemeli kapalı çevrim kontrol, PID kontrol, MEAK ve MIT kuralı olmak üzere kullanılan kontrol yöntemleri hakkında bilgiler verilerek kontrol yöntemlerinin kullanım sebepleri ve alanları üzerinde durulmaktadır.

Sistem için MATLAB/Simulink benzetim ortamında model oluşturulması, oluşturulan bu model için kontrolörsüz geri beslemeli sistem cevabı, PID kontrol, MEAK benzetimi ve MEAK ile PD kontrolörün birlikte kullanılarak benzetimi dördüncü bölümde incelenmektedir.

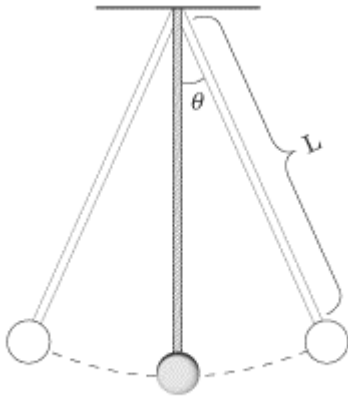
Beşinci bölüm olan deneysel çalışmalarda benzetimini yaptığımız sistemin kontrolörsüz geri beslemeli sistem cevabı, PID, MEAK, MEAK ve PD kontrolörlü sistem cevapları Labview yazılım aracılığıyla bilgisayar ortamında incelenmektedir.

Elde edilen neticeler altıncı bölüm olan sonuçlar bölümünde incelenmekteyken uygulama alanları ve yöntemleri ile ilgili ileriye yönelik öneriler yedinci bölüm olan tartışma ve öneriler bölümünde anlatılmaktadır. Matlab/Simulink ve Labview bilgileri, kullanılan kodlar, benzetim modelleri, deney çalışması arayüzleri Ekler bölümünde gösterilmektedir.

## BÖLÜM 2. ASILI SARKAÇ SİSTEMİ

### 2.1. Giriş

Sarkaç salınım hareketi üzerine ilk çalışma onuncu yüzyılda İbn-i Yunus tarafından yapılmış bu alanda yeni çalışmalara ışık tutmuştur. Sonrasında Galileo zamanı ölçmek için kullanmıştır. XVII. yüzyıl fizikçilerinden Huygens, Newton, Hooke, Galileo'nun gözlemleri ve çalışmaları ışığında sarkaç salınım hareketi konusunda çeşitli çalışmalar yapmıştır [6].



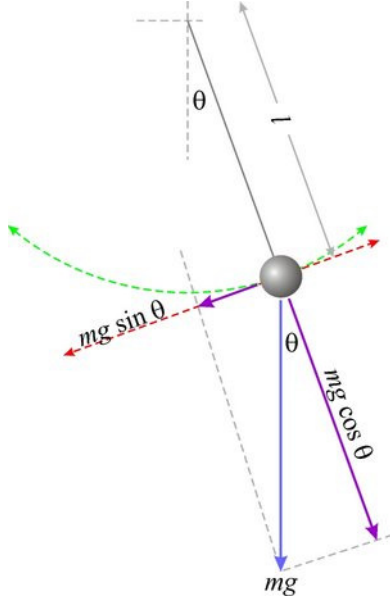
Şekil 2.1. Sarkaç sistemi genel görünüşü

Batıda bilimin gelişmesinde çok önemli rol oynayan sarkaç sistem, çarpışma kanunları, kütlelerin korunumu kanunları, yerçekimine göre hızlanma, ekvator ve kutup bölgelerindeki yerçekiminin değişmesinin keşfiyle orantılı dünyanın şeklinin belirlenmesi gibi konularda adeta bir temel kaynak olarak görülmüştür [7].

Basit sarkaç sistemin salınım periyodunun bulunması için Newton'un II. Kanununu bilmemiz gerekmektedir.



F kuvvetinin etkilediği bir m kütlesi saniyede a metre kadar hızlanacaktır. Şekil 2’de görüldüğü gibi sarkaç kütlesini etkileyen yerçekimi gücünün yatay bileşeni bu hızlanmayı sağlamaktadır.



Şekil 2.2. Sarkaç sisteminde etkileyen kuvvetler

$$F = m.a \quad (2.1)$$

Dolayısıyla

$$F = -m.g.\sin \theta = m.a \quad (2.2)$$

$$a = -g.\sin \theta \quad (2.3)$$

olacaktır.

Yerçekimi sabiti g dünyanın farklı noktalarında farklı değer alacaktır. Hızlanmanın negatif işaretli olması aşağıya doğru olduğunu gösterir. Bu lineer hızlanma  $\theta$  açısı ile orantılı olarak değişmektedir.

Böylece hızlanmayı kontrol eden güç açığı da kontrol edebilir sonucu çıkarılmaktadır.

$$s = l\theta \quad (2.4)$$

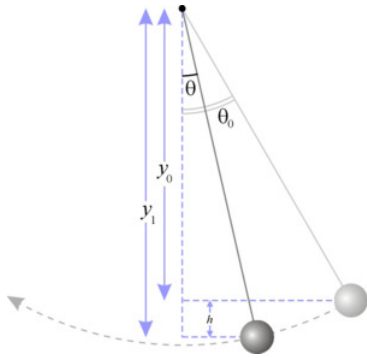
$$v = \frac{ds}{dt} = l \frac{d\theta}{dt} \quad (2.5)$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.6)$$

$$l \frac{d^2\theta}{dt^2} = -g \sin \theta \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (2.8)$$

Denklem(2.3) Mathieu eşitliği olarak da bilinmektedir. Mekanik enerji dönüşümü prensiplerinden de elde edilebilen bu denklem yerçekimi potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümünü de açıklamaktadır [8].



Şekil 2.3. Sarkaç sistemi

Potansiyel enerjideki değişim

$$\Delta U = mgh \quad (2.9)$$

Kinetik enerjideki değişim

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.10)$$

Kayıp enerji olmadığı düşünülürse

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.11)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.12)$$

Yay uzunluğu formülünden aşığıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{l}\sqrt{2gh} \quad (2.13)$$

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere h y<sub>1</sub> ile y<sub>0</sub> arasındaki yükseklik farkını ifade etmektedir.

Sarkacın başlangıç açısı  $\theta_0$  olduğunda yüksekliği y<sub>0</sub> sonraki açısı  $\theta$  ve sonraki yüksekliği y<sub>1</sub> denklem 2.14 ve denklem 2.15 ile gösterilmektedir.

$$y_0 = l.\cos\theta \quad (2.14)$$

$$y_1 = l.\cos\theta \quad (2.15)$$

Aralarındaki farkı alırsak h yüksekliğini elde ederiz

$$h = l.(\cos\theta - \cos\theta_0) \quad (2.16)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{2g}{l}}(\cos\theta - \cos\theta_0) \quad (2.17)$$

$\theta$  açısını çok küçük olarak kabul edilen bir yaklaşımda bulunulursa;

$$\sin\theta \cong \theta \quad |\theta| \ll 1 \quad (2.18)$$

Yukarıdaki 2.18 denklemleri aşağıdaki eşitlikte yerine konulursa 2.20 eşitliği elde edilir.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \theta = 0 \quad (2.20)$$

şekline dönüşür.  $\theta(0) = \theta_0$  ve  $\frac{d\theta}{dt}(0) = 0$  başlangıç koşulları altında denklemin çözümü salınım fonksiyonu elde edilir.

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t\right) \quad |\theta_0| \ll 1 \quad (2.21)$$

$\frac{g}{l}$  terimi  $\frac{2\pi}{T_0}$ 'a eşit ve salınımının periyodu  $T_0$  olan bir titreşimdir.

$$w = \sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.22)$$

Salınım periyodunun bulunmasını sağlayan aşağıdaki eşitlik Huygen'in kuralı olarak da adlandırılmaktadır [9].

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad |\theta_0| \ll 1 \quad (2.23)$$

## 2.2. Sarkaç Sistemin Uygulama Alanları

Asılı sarkaç sistemi geçmişten günümüze birçok alanda hayatımızı kolaylaştırmıştır. İlk kullanım alanlarından biri saatlerdir [10]. Zaman periyodu 2 sn. olarak verilen ve saniye sarkacı olarak da bilinen sarkacın her salınışında 2 sn. süre geçmekte ve sarkacın merkezinin bağlı olduğu noktalardaki dişliler aracılığıyla 60 sn. de bir derece yelkovan, yelkovanın 60 derecelik hareketinde de akrep hareket ederek zamanı ölçmeyi sağlamaktadır.

Dünyanın farklı bölgelerinde farklı noktalarında farklı yerçekimi değerleri olduğunun ölçümü de yine sarkaç sayesinde gözlenebilmektedir. Bunun yanı sıra hareketlerinin grafiğe dökülerek kullanıldığı sismometre gibi uygulamaları da mevcuttur [11].

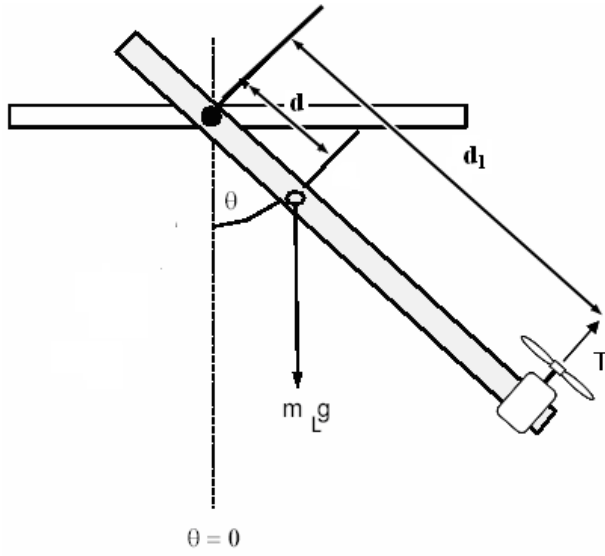
Sarkaç sistemlerin çift sarkaç ya da eş sarkaçlar kullanılarak belirli başlangıç şartlarında kaotik hareketlerin incelenmesi konusunda da çalışmalar bulunmaktadır. Aynı zamanda atalet yer gösterici sistemlerin tasarımında mutlaka kullanılması gereken Schuler ayarlama metodu da sarkaç mantığından hareketle oluşturulmuştur [12].

Çeşitli oyun alanlarında karşılaşacağımız oyuncaklar sarkaç prensibini temel olarak kullanmıştır. Örneğin salıncak bir çeşit parametrik osilatör olarak kabul edilebilir. Bu alanda oyun araçlarının dengesinin korunuşunda kontrol metotlarına ihtiyaç duyulmaktadır [13].

Protez bacakların modellenmesi ve protez bacak uygulamaları, mikro hava araçlarının kontrolü, çiftlik traktörleri, yelkenliler asılı sarkaç sistemin kontrolüne ihtiyaç duyulan alanlar arasında sıralanabilirler [14,15].

### 2.3. Asılı Sarkaç Sistemin Oluşturulması

Salınım hareketinin açıklanmasının ardından uygulama alanlarından bahsedilen asılı sarkaç sistemin konumunun kontrol edilebilmesi amacıyla öncelikle sistem düzeneğinin çalışma prensibinin, ardından sistem matematiksel modelinin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.4. Asılı sarkaç kontrolü düzeneği

Yukarıdaki şekilde verilen sarkaç düzeneğinde sarkacın asılı olduğu noktadaki açı değerini ölçebilmek ve konumu istediğimiz açı değerine getirebilecek bir itme gücünü oluşturmak gerekir. Açı değerini ölçmek için enkoder, potansiyometre vb herhangi bir araç kullanılabilir. İtme gücünü sarkacın en uç noktasına sarkacı yukarıya kaldırabilecek güçte bir dc motor sağlamaktadır. Amacımız sarkacı en kısa sürede istediğimiz açı değerlerine getirebilecek bu itme gücünü oluşturmaktır.

Oluşturulan sistemde itme gücü 0 olarak ele alındığında sarkaç açısı sıfır olması ve hareketsiz olması gerekirken itme gücü arttırıldığında sarkaç açısının artması gerekmektedir.

## 2.4 Sistemin Matematiksel Modeli

Bir sistemin kontrol edilebilmesi için sistemin modelinin oluşturulması gerekmektedir. Asılı sarkaç sisteminde matematiksel model oluşturulurken Arşimed'in moment prensipleri, Newton'un yerçekimi kanunları dikkate alınmalıdır.

$L$ = Çubuğun uzunluğu

$m$ = Çubuğun ağırlığı

$d$ = Askı noktasının ağırlık merkezine uzaklığı

$J$ = Atalet momenti

$g$ =Yerçekimi ivmesi

$c$ = Viskoz sönümlenme katsayısı

olmak üzere Şekil 2.4' deki asılı sarkaç sisteminin asıldığı noktaya göre Arşimet moment prensipleri esas alınarak moment kuralı uygulanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilmiş olur [16].

$$j\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + m_Lgd \sin \theta = T \quad (2.24)$$

Burada  $T$  motorun ucundaki pervanenin dönmesiyle oluşacak itme gücünü (Tork),  $\theta$  ise kontrol etmek istediğimiz dönme açısını temsil etmektedir. 2.24 eşitliğinin her iki yanını  $j$  ile bölünürse aşağıdaki biçime dönüşür.

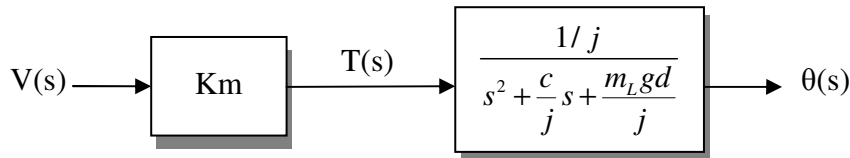
$$\ddot{\theta} = \frac{c}{j}\dot{\theta} - \left(\frac{m_Lgd}{j}\right) \sin \theta \quad (2.25)$$

Dönme açısını ( $\theta$ ) çıkış büyüklüğü, uygulanan momenti ( $\tau$ ) ise giriş büyüklüğü olarak göz önüne alırsak, sarkaç sistemi için gerekli transfer işlevi;

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{js^2 + cs + m_Lgd \sin \theta} \quad (2.26)$$

biçimde verilebilir.

Sisteme ilişkin blok diyagramı ise Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Sisteme ilişkin blok diyagramı

Motora belirli bir gerilim uygulanarak  $\theta_{ss}$  açısı bulunur. Bu değerler kullanılarak motora uygulanan gerilim ile oluşturulacak olan moment arasındaki ilişki;

$$Km = \frac{m_Lgd \sin \theta_{ss}}{V} \quad (2.27)$$

ifadesi ile verilebilir. Böylece hız ile açı arasındaki transfer işlevi;

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{Km / j}{s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_Lgd}{j}} \quad (2.28)$$

biçiminde yazılabilir.



## BÖLÜM 3. KONTROL YÖNTEMLERİ

### 3.1. Giriş

Matematiksel modelini belirlediğimiz bir sistemi kontrol etmek için kullanılacak kontrol yöntemleri iki ana gruba ayrılır

- 1- Açık çevrim kontrol yöntemleri
- 2- Kapalı çevrim kontrol yöntemleri

Bu yöntemlerin amaçları şöyle sıralanabilir;

- Süreçlerdeki fiziksel çıkış büyüklüğünü arzulanan düzeyde tutmak.
- Süreçlere ilişkin fiziksel çıkışların belli bir değişim formunu izlemelerini sağlamak.
- Ardışıl lojik mantığına sahip süreçlerin kontrolünü gerçekleştirmek [17].

#### 3.1.1. Açık çevrim kontrol

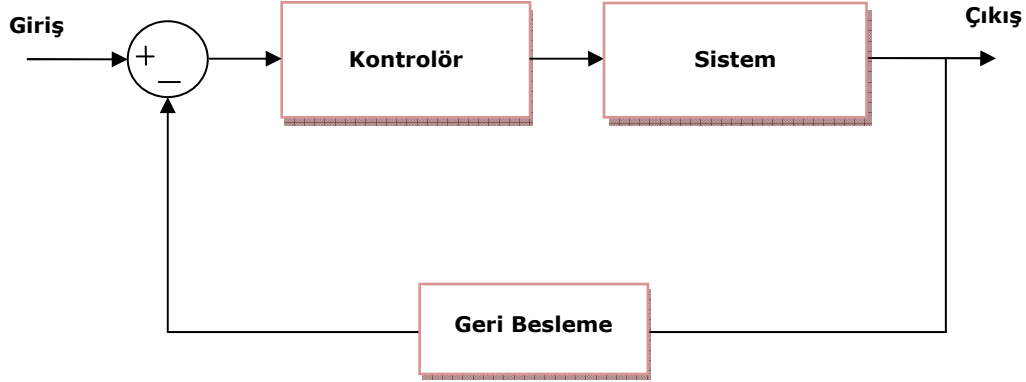
Kontrol işareti çıkış işaretinden etkilenmeyen sistemlere açık çevrim kontrol sistemler denir. Blok diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilen açık çevrim kontrol sistem parametrelerindeki değişiklikler ya da sisteme etkiyen bozucular nedeniyle sistem çıkışında oluşabilecek olan değişiklikleri algılayamaz [18].



Şekil 3.1. Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı

### 3.1.2. Kapalı çevrim kontrol

Sisteme etkiyen kontrol işaretinin sistem çıkışının da göz önüne alınarak üretildiği kontrol sistemlerine kapalı çevrim sistemi denir.



Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol blok diyagramı

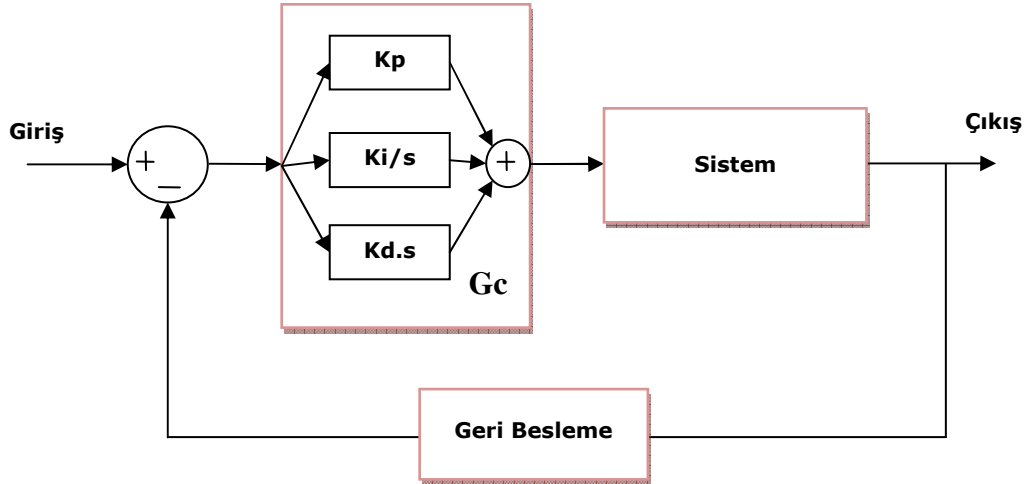
Kontrol yöntemlerinin birçoğu kapalı çevrim kontrol içerisine girmektedir. Bu çalışmada Kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden PID kontrol, Model esaslı Adaptif kontrol, MEAK ve PD kontrolün birlikte kullanımını tercih edilerek mukayeseleri yapılmıştır [19].

### 3.2. PID kontrol

PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüler endüstride 60 yılı aşkın süredir geniş alanda kullanılmaktadır. Endüstri uygulamalarının pek çoğunda standart bir çözüm olarak görülmekte olan bu kontrol yöntemi üç terimli kontrolör olarak da adlandırılmaktadır [20]. Bu kontrolör bileşenleri şu şekilde sıralanmaktadır:

- 1- Oransal Kontrolör (P)
- 2- İntegral Kontrolör (I)
- 3- Türevsel Kontrolör (D)

Oransal, türev, integral kontrolörlerin birleşmesiyle oluşan PID kontrolörün çıkışı ayrı ayrı incelenen kontrolör çıkışlarının toplamıdır.



Şekil 3.3. PID kontrol blok diyagramı

Dolayısıyla PID kontrolör ( $G_c$ ) için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d.s \quad (3.1)$$

“ $K_p$ ” oransal kontrolörü ifade etmektedir ve sabit kazançlı bir kuvvetlendirici gibi düşünebiliriz. Uygulaması basit olan oransal kontrolörde her zaman kararlı hal hatası vardır ve hatanın boyutu sistemden sisteme değişir.

Kontrolör kazancı büyük seçildikçe kararlı hal hatası azalacak ancak geçici yükselme miktarı büyüyecektir. Oransal kontrolün önemli bir özelliği, tip 0 sistemlerde, bir set değişiminden sonra bir kararlı hal hatası vermesidir. Bu hata ofset hatası olarak tanımlanır. Kontrolör ancak yeni bir ofset olduğunda yeni bir çıktı verir [21].

“ $K_i$ ” integral kontrolörünü belirtmektedir ve  $K_i$  katsayısı integralin kazancıdır. İntegral kontrolör kararlı hal hatasını yok edebilmek için sistem tipini 1 artırır.

Kd katsayısı is türevsel kontrolörün ifadesidir ve türevin kazancıdır. Türev kontrolör hata sabit ise veya çok az değişim gösteriyorsa bu hatayı giderecek işaret üretmez İntegral kontrolör ya da oransal kontrolör ile beraber kullanılır. Türev kontrolörü gürültülere karşı duyarlıdır aşımı ve osilasyonu azaltır fakat kararlı hal hatasına etkisi yoktur [22].

PD, PI kontrolör kullanımı için kullanmak istemediğimiz kontrolörün katsayısını sıfır olarak kabul etmemiz yeterli olacaktır.

### **3.3. Model Esaslı Adaptif Kontrol (MEAK)**

#### **3.3.1. Adaptif kontrol ve MEAK'ın tarihi gelişimi**

Adaptif kontrol mantığı 1951 yılında, içten yanmalı motorlarda performans karakteristiklerinde oluşan belirsizlikleri optimize edecek bir kontrol sistemi ile ilgilenen Draper ve Li tarafından düşünülmüştür. Bu konudaki çalışmalarını 1955 de yayınlamışlardır [23].

Adaptif terimi ilk defa 1954 de Tsien tarafından insan beyninin modeli tanımlandığı zaman kullanıldı. 1955'de Benner ve Drenick “Adaptif” karakteristikleri olan bir kontrol sistemi tanımladılar [24,25].

Sonraki adım Whitaker tarafından 1958'de atıldı Whitaker, uçak uçuş kontrol sistemini Adaptif olarak düşünerek, istenen ve gerçek olan işaretler arasındaki hatayı esas model kullanarak elde etti. Bu hata işareti, sisteme istenen davranışı yaptıracak şekilde kontrol parametrelerinin değiştirilmesinde kullanıldı. Bu tür sistemler model esaslı Adaptif kontrol sistemleri olarak belirtilirler [26].

1960'da Li ve Van der Valde, kontrol çevrimindeki limit çevrim tarafından yaratılan parametre belirsizliklerinin kompanizasyonuna dayanan başka bir Adaptif kontrol sistemi üzerine çalıştılar. Bu tarz sistemler kendi kendine osilasyon yapan Adaptif sistemler olarak adlandırılırlar.

1963 de Petrov adaptif kontrole yeni bir yaklaşım geliştirdi. Kontrol girişinin bir röle veya anahtarlama olduğu durumlarda sistem çıkış yörüngesinin değişmediği varsayımına dayanan bir yöntemi kullanan sistemler, değişken yapıli sistemler olarak adlandırılır.

İngiltere'de Bellman ve USSR'den Fel'dbaum 1960-1961 yılları arasında olası belirsizliğe sahip sistemler için kontrolörlerin tasarımındaki dinamik programlama üzerine araştırmalarını yayınladılar.

Astrom ve Wittenmark, Adaptif kontrolün diğer bir önemli konusu olan kendi kendini ayarlayabilen sistemleri 1971 de geliştirmişlerdir. Bu kontrol sistemleri, mikroişlemcilerle gerçekleştirmeleri açısından kullanışlıdır. Bu çalışmalar sonrası bu alana ilgi oldukça artmıştır [27].

Diğer önemli gelişmeyi 1974 yılında Monopoli'nin Model Esaslı Adaptif Kontrol yaklaşımına argüman hatası yaklaşımını tanımlamasıdır. Bu tanımlama, global olarak asimptotik kararlı algoritmalar geliştirilme üzerine araştırmaların artmasına neden oldu. Bu gelişmeler ışığında hem ayrık hem sürekli sistemler için 1980'de Narendra, Morse, Goodwin et al ve Egardt tarafından pek çok yayınlar yapıldı [28].

### 3.3.2. Adaptif kontrolün kullanım alanları

Sistem parametrelerinde ve giriş işaretinde belirsizliklerin ve önceden görülmeyen değişimlerin bulunduğu durumlarda birçok mühendislik problemi otomatik kontrole bağlıdır. Adaptif kontrolün kullanım alanları genel olarak şöyle sıralanabilir.

- Uçak kontrolü: Yere uzaklığa bağlı olarak değişen hava yoğunluğu, sestan hızlı uçakların dinamik davranışını etkiler
- Füze kontrolü: Yakıt tükendikçe kütle ve ağırlık merkezi değişir.
- Süreç kontrolü: Bir kimyasal sistemin sürekli işlemlerinde sıcaklık ve giriş-çıkış akış hızlarında değişiklik olduğunda parametrelerde değişimler olabilir.
- Elektriksel sürücüler: Kâğıt sarma, tel çekme makineleri gibi bazı makinelerde gerilimin sabit kalması gereklidir.
- Gemilerde kontrol: Gemilerde veya petrol tankerlerinde transfer fonksiyonun dinamik karakteristikleri geminin yüküyle, hızıyla, suyun derinliğiyle ve içinde bulunduğu çevre şartlarıyla değişir.
- Metalürjiye ait işlemler: Çeşitli işlemlerin parametreleri fırından fırına farklılık göstereceği gibi başlangıç şartları da her zaman aynı olmayabilir. Rektör karakteristiklerinin değişmesine sebep olacak bu etkenler nedeniyle kullanılabilir.
- Uydu konum kontrolü: Bazı uydular kısa süreli ve oldukça düzensiz atmosferdeki olayları gözlemek için kullanılır. Uygun gözleme zamanının artırılması için uydunun çok hızlı yönlendirilmesi gerekmektedir.

Birçok pratik kontrol problemlerinde karşılaşılan değişken durumlar şöyledir:

- Sistemin transfer fonksiyonunun derecesinin veya parametrelerinin değişmesi durumu: Bunlar çevre değişimlerinden, ham madde özelliklerinden, değişken katsayılı karakteristiklerinden ileri gelir.
- Olasıl karakterli bozucu işaretler.
- Giriş işaretinin yapısındaki değişimler.
- Sistem parametrelerinin giriş/çıkış bozucuları nedeniyle değişmesi.
- Karmaşık kimyasal veya biyokimyasal reaksiyonlardaki lineer olmayan davranışlar.
- Ölü zaman etkisi
- Kontrol sistemi yeni işleme görevlendirildiğinde ortaya çıkan belirsizlikler

Yukarıda sıralanan durumlarda klasik kontrolçüler sistem performansını kabul edilebilir düzeyde yürütemezler [29].

Giriş işaretlerindeki ve parametrelerdeki tahmin edilemeyen bu tarz değişikliklerin üstesinden gelinmesi için adaptif kontrolçülere ihtiyaç duyulmaktadır.

Pratik kontrol sistemleri genellikle çok karmaşık yapıda ve dinamikleri ayrıntılı bilinmemektedir. Parametre değişimleri ya da giriş işaretindeki büyük değişimler ve sistemde rastgele oluşan değişimler genelde ölçülemez bu durumlarda değişimleri otomatik olarak düzenleyecek sistem gereksinimleri ön plana çıkar ve bu noktada yine adaptif kontrolörlerden faydalanabiliriz [30].

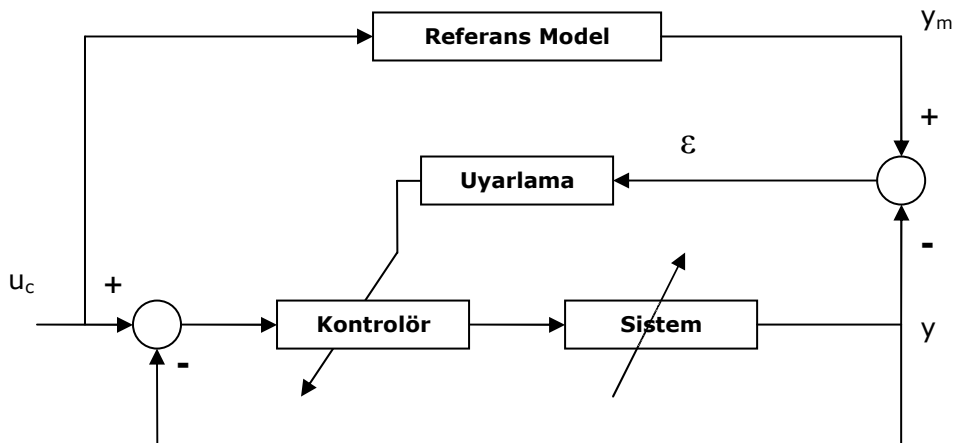
### 3.3.3. MEAK yöntemi

Model esaslı adaptif kontrol tekniği, adaptif tekniklerin özel bir sınıfı olarak veya belirli problemlere yeterli çözümler sunabilmek için klasik geri beslemeli kontrolün bir gelişmesi olarak düşünülebilir.

MEAK sistemler için, sistemin dinamik performansını belirlemek gerekmediğinden, oldukça yüksek adaptasyon hızı ile gerçeklenmeleri kolaydır. Bu nedenle de önemlidirler ve farklı durumlarda kullanılmaları mümkün olmaktadır [31].

Kan basıncının, araçların aktif süspansiyon sistemlerinin, lazerle haberleşme sistemlerinin kontrolünde de kullanılmakta olan bu yöntem model takibi alanında öncelik taşımaktadır [32,33,34].

MEAK sistemlerde asıl amaç, bilmediğimiz sistem çıkışını kontrol sisteminin bir parçası olan model sistem çıkışına asimptotik olarak yaklaştırmaktadır. Genel blok diyagramı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. MEAK genel blok diyagramı



MEAK metodunda gerçek denetim sistemi ile karşılaştırmaya esas olarak bir matematiksel model kullanılır. Matematik model ile sisteme aynı girişi uygulanarak gerçek sistem ve esas alınan model sistem çıkışı arasındaki hata minimum olacak şekilde kontrolcü parametreleri ayarlanır. Yani sistem esas model davranışına zorlanır. Kontrolcünün performansı matematiksel modelin sistemi ne kadar yakından temsil ettiğine bağlıdır [35].

Şekil 3.4' de görüldüğü gibi sistemde halen geri besleme döngüsü mevcuttur. Bu, uyarlamalı denetimde ortaya çıkabilecek bir arızanın sistemin çalışmasını durdurmasını önlemek içindir. Gerçek sistem üzerine etki eden dış bozucular gerçek/model hata sinyalini değiştirecek ve uyarlamalı döngü yolu ile denetleyici ayarlarının yeniden ayarı için esas teşkil edecektir [36].

### 3.3.4. MEAK türleri

Model esaslı adaptif sistemlerde uyarlama kurallarında çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımları şöyle sıralayabiliriz

- MIT kuralı
- Lyapunov yaklaşımı
- Hiperkararlılık yaklaşımı
- Monopoli'nin argüman hatası yaklaşımı
- Narendra'nın hata modeli yaklaşımı
- Egardt'ın birleşim yaklaşımı
- Çok değişkenli MEAK sistemleri
- Bulanık kontrolör yaklaşımı

Bu kontrol türlerden en sık karşılaşılan yöntemler MIT kuralı ve Lyapunov yaklaşımıdır [37].

### 3.3.5. MIT kuralı

Geleneksel MIT kuralı bir çeşit ayarlama mekanizmasıdır ve MEAK sistemlerinde istenilen matematiksel model ile sistemin çıkışının birbiriyle eşleşmesini sağlayacak kontrol parametrelerinin oluşturulmasını sağlar [38].

MIT kuralı açının güncellenmesini sağlayacak performans ölçütündeki değişme ile açının değişimi arasındaki ilişki olarak da bilinmektedir.

Esas alınan model ile gerçek sistemin çıkışı arasındaki fark hata olarak kabul edilir ve  $e$  olarak gösterilmektedir. Amaç bu hatayı en aza indirgeyerek istenen kontrolü sağlamaktır.

$$e = y_{sistem} - y_{model} \quad (3.2)$$

Bu hata kullanılarak  $J(\theta)$  olarak adlandırdığımız performans ölçütü şekillendirilebilir.  $J$   $\theta$ 'nın ( $\theta$  kontrolör içine adapte edilebilecek parametre olmak üzere) bir fonksiyonudur. Performans ölçütünün seçimi parametrelerin nasıl güncelleneceği konusunda belirleyici rol üstlenmektedir.

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(\theta) \quad (3.3)$$

$\theta$  parametresinin nasıl güncelleştirildiğini belirleyebilmek için  $\theta$  açısındaki değişimin denklem formuna getirilmesi gerekmektedir. Amacımız hataya duyarlı performans ölçütümüzü minimize etmek ise  $J$ 'nin negatif gradyanı yönünde hareket etmesi yeterli olacaktır.  $J$ 'deki bu değişim  $\theta$ 'daki değişimle orantılı olduğu varsayılmaktadır. Buna göre;  $\theta$ 'nın türevi  $J$ 'deki negatif değişime eşit olacaktır.

Dolayısıyla performans ölçütü için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\delta J}{\delta \theta} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4 ile verilen bu eşitlik aynı zamanda MIT kuralı olarak da bilinmektedir.

MIT kuralı kontrolörün adaptif doğasının merkezini oluşturmaktadır. Duyarlılık türevi olarak da bilinen hatanın  $\theta$ 'ya göre kısmi türevi (Denklem 3.5)  $\theta$  açısının nasıl güncelleştirileceğini açıklamaktadır.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (3.5)$$

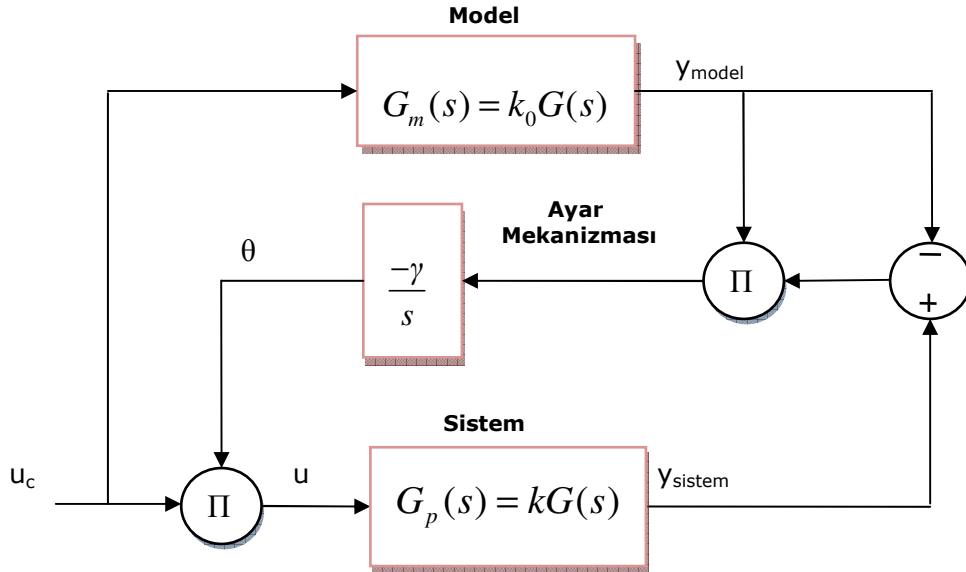
Bir kontrolörün güncellenmesi gereken birçok çeşit parametresi olabilir. Bunlardan bazıları giriş bazıları da çıkış parametreleri olarak da kabul edilebilir. Bu durumlarda duyarlılık türevleri her parametre için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Elde edilen duyarlılık türevleri hatayla çarpılarak sonuca gidilmelidir.

Performans ölçütünün farklı seçimi aşağıdaki denklemlerden de anlaşılacağı üzere çok farklı ve birbirine zıt sonuçlar oluşturabilir.

$$J(\theta) = |e| \quad (3.6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta} \text{sign}(e) \quad \text{sign}(e) \begin{cases} 1, & e > 0 \\ 0, & e = 0 \\ -1, & e < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

MIT kuralının adaptif kontrolcüyü nasıl şekillendirdiğini daha net bir şekilde açıklamak için, adaptif ileri beslemeli bir sistemi inceleyebiliriz.



Şekil 3.5. Adaptif ileri besleme kazançlı sistemin blok diyagramı

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = kG(s) \quad (3.8)$$

Şekil 3.5 de blok diyagramı verilen sistem için denklem 3.8 de belirtilmiş k sabiti bilinmemektedir. Bundan dolayı istenen k değerini sağlayacak bir model oluşturularak ileri besleme kazancıyla adaptasyonu yoluyla sistem cevabının belirlenen model cevabını takip etmesi sağlanabilir.

$$\frac{Y(s)}{U_c(s)} = k_0G(s) \quad (3.8)$$

Performans ölçütü olarak daha önce de ele aldığımız denklemi seçersek

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(\theta) \quad \frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (3.9)$$

Sistem için hata 3.9 eşitliğiyle ifade edilebilir

$$e = y - y_m = kGu - G_m u_c \quad (3.10)$$

Transfer fonksiyonları girişlerindeki terimlerle çarpılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir

$$e = kGU - G_m U_c = kG\theta U_c - k_0 G U_c \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte hata ifadesinin güncellenecek  $\theta$  ifadesini içerdiği açıkça görülmektedir. O halde güncelleme kuralını belirlemek için duyarlık türevini hesaplayarak model çıkışına yansıtırız.

$$\frac{\delta e}{\delta \theta} = kG U_c = \frac{k}{k_0} y_m \quad (3.12)$$

Sonuç olarak MIT kuralı  $\theta$  ifadesinin güncellenmesini sağlayacak eşitliği verecek şekilde uygulanmış oldu.  $k$  ve  $k_0$  sabitleri  $\gamma$  içerisinde birleştirilirse eşitlik şu hale gelir:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{k}{k_0} y_m e = -\gamma y_m e \quad (3.13)$$

Bu sistemi ayarlamak için  $k$  ve  $k_0$  sabitlerinin değerleri değiştirilebilir.

MIT kuralının uygulanışında bilinmesi gereken bazı avantaj ve dezavantajlar vardır. Avantaj olarak görülen özellikleri model takibinde bir noktada birleşme konusunda sağlam bir teori olması, uygulanabilir olması, kolay ve anlaşılabilir şekilde ilkelendirilebilmesidir. Dezavantajlarından biri  $\gamma$  seçimidir.  $\gamma$  seçimi adaptasyon oranı ve yakınsama açısından çok önemlidir.

Genel olarak  $\gamma$  küçük seçilmelidir. Ancak sorun  $\gamma$ 'nın ne kadar küçük seçileceği noktasında kesin kanılar bulunmamasıdır. Diğer bir dezavantaj ise kararlılık problemleri görülebilmektedir [39].

## BÖLÜM 4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

### 4.1. Giriş

Asılı Sarkaç Sisteminin benzetim çalışmaları için MATLAB/Simulink yazılımı kullanılmıştır. EK A'da verilen benzetim ortamı işlemleri MATLAB programı tabanında yapılır. Bu bölümde salınım hareketinin modellenmesi, kontrolörsüz kapalı çevrim sistem modellenmesi, PID kontrol, MEAK, MEAK+PD kontrolörlü sistem benzetim çalışmaları incelenmektedir.

### 4.2. Sistemin Model Benzetimi ve Animasyonu

Salınım hareketinin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$j\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + m_L g d \sin \theta = 0 \quad (4.1)$$

$\ddot{\theta}$ 'nin denklemin sol tarafına diğer tüm terimlerin denklemin sağ tarafına alınması için gerekli işlemi yaparak denklem 4.3 elde edilir.

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

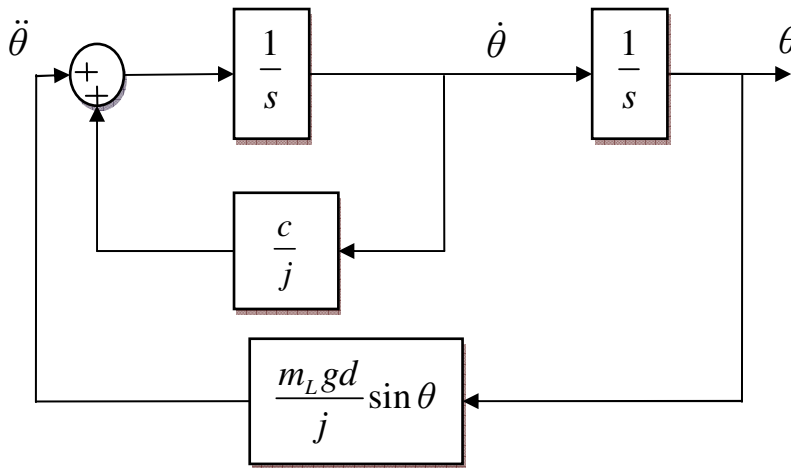
$$\ddot{\theta} = -\frac{c}{j}\dot{\theta} - \left(\frac{m_L g d}{j}\right)\sin \theta \quad (4.3)$$

Asılı sarkaç modelin parametreleri;

- $L$ = Çubuğun uzunluğu 0.5 m
- $m$ = Çubuğun ağırlığı 0.1kg
- $d$ = Askı noktasının ağırlık merkezine uzaklığı:0.017m
- $J$ = Atalet momenti:  $0.0021 \text{ kg.m}^2 = (1/12)*(m*L*L+m*d*d)$ ;
- $g$ =Yerçekimi ivmesi  $9.8 \text{ ms}^2$
- $c$ = Viskoz sönümlenme katsayısı 0.00035 Nms/Rad

olarak seçilmiştir. Bu değerler Ek. A da açıklanan Simulink model özellikleri açılarak başlangıç şartları bölümüne yazılmıştır.

Elde ettiğimiz diferansiyel denkleme ilişkin blok diyagramı Şekil 4.1’de verilmiştir.

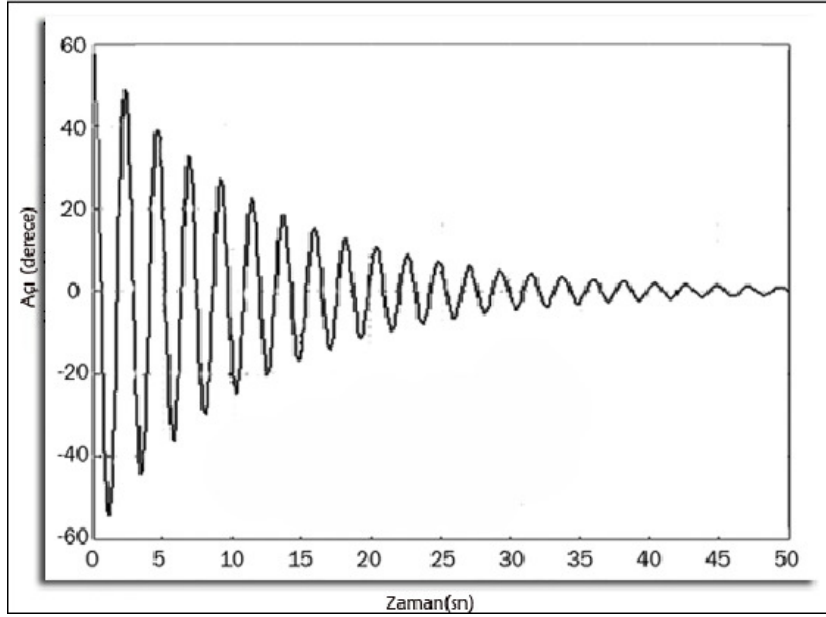


Şekil 4.1. Sisteme ilişkin benzetim modeli blok diyagramı

Başlangıç açısını Ek A’da anlatıldığı gibi  $60^\circ$  olarak kabul ederek benzetimi yapılmaktadır. Belirlediğimiz başlangıç şartları sonucunda asılı sarkaç sistemimizin  $60^\circ$ ’den başlayıp  $0^\circ$ ’ye yaklaşıncaya kadar çok uzun bir süreçte salınım yaptığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.2).

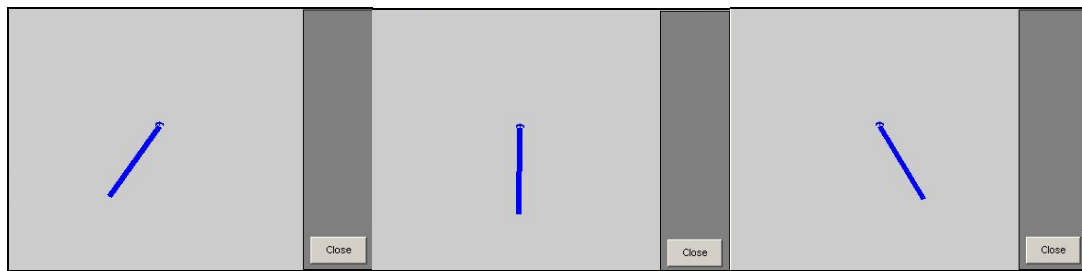
Çalışmamızın ikinci bölümünde de belirtildiği üzere sarkaç  $0^\circ$  ’yakınlarında çok daha uzun süre salınımını sürdürecektir.





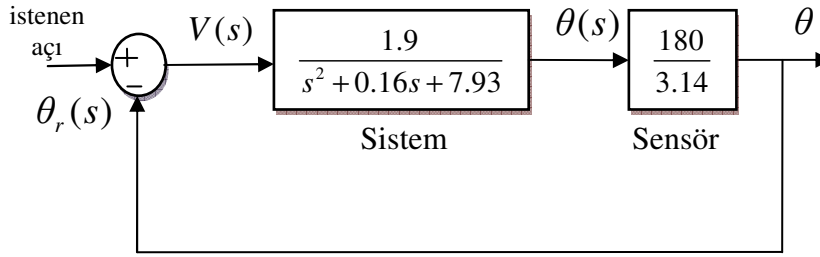
Şekil 4.2.  $60^\circ$  başlangıç açısı için sarkaç açısının zamana göre değişimi

Ek A.'da anlatılan ve Ek B.' de program kodu verilen sistemin salınım animasyonunu izleme için oluşturulan model sayesinde benzetim başladığında çubuk  $60^\circ$  ilk konumundan aşağı doğru hareket etmekte ve salınım Şekil 4.2'de verilen grafikteki durumla aynı şekilde animasyonu gerçekleştirmektedir. Animasyon sırasında gözlenen arayüz Şekil 4.3 ile verilmektedir.



Şekil 4.3. Sistem salınımının animasyonundan görüntüler

### 4.3. Kontrolörsüz Geri Beslemeli Sistemin Benzetimi



Şekil 4.4. Kontrolörsüz geri beslemeli sistemin benzetimi blok diyagramı

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{Km / j}{s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_L g d}{j}} \quad (4.4)$$

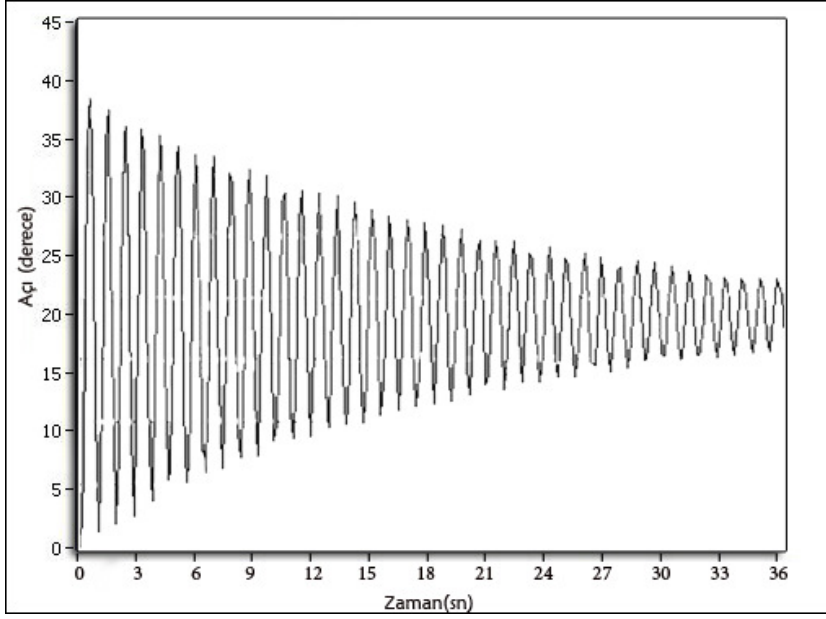
Aşağıdaki veriler (4.4) denkleminde yerlerine konulursa 4.5 eşitliği elde edilir.

- L= Çubuğun uzunluğu 0.5 m
- m= Çubuğun ağırlığı 0.1kg
- d= Askı noktasının ağırlık merkezine uzaklığı:0.017m
- J= Atalet momenti:  $0.0021 \text{ kg.m}^2 = (1/12)*(m*L*L+m*d*d)$ ;
- g=Yerçekimi ivmesi  $9.8 \text{ ms}^2$
- c= Viskoz sönümlenme katsayısı 0.00035 Nms/Rad
- Km=0.004

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{Km / j}{s^2 + \frac{c}{j}s + \frac{m_L g d}{j}} = \frac{1.9}{s^2 + 0.16s + 7.93} \quad (4.5)$$

Elde edilen bu transfer fonksiyonu diğer kontrol yöntemlerinde de kullanılmaktadır. Kontrolörsüz kapalı çevrim sistemin 20°'lik referans sarkaç açısına ilişkin benzetim sonucu Şekil 4.5 ile verilmektedir.

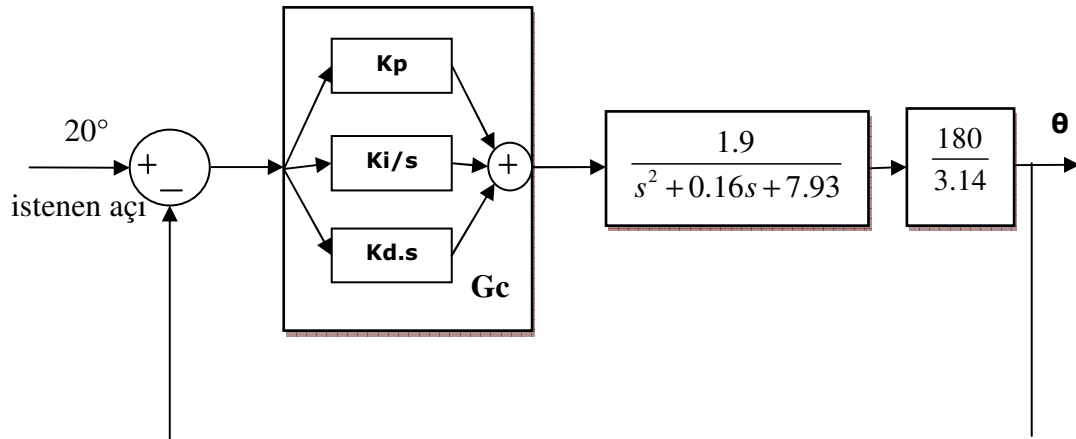
Söz konusu eğriden de görüleceği üzere sistem sıfır tipi bir sistem olduğundan sarkaç açısı istenen 20 derecelik istenen açiya ulaşamamaktadır.



Şekil 4.5. Kontrolörsüz sistemde 20°'lik referans sarkaç açısına ilişkin sarkaç açısının zamana göre değişimi

#### 4.4. PID Kontrolörlü Sistemin Benzetimi

PID kontrolörlü sistemin benzetimine ilişkin blok diyagramı Şekil 4.6' da verilmiştir. Blok diyagramında sistemden sonra gelen çarpan radyan birimindeki çıkış açısının dereceye çevrilmesini sağlar.



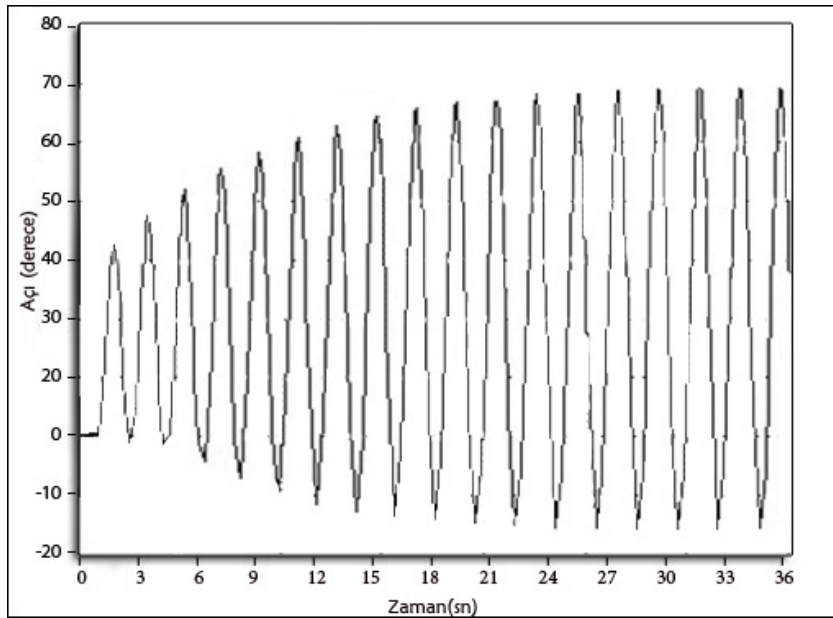
Şekil 4.6. PID'li kontrol benzetimi blok diyagramı

Sistemin PID'li kontrolünün benzetiminde  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  deneme yanılma yöntemiyle değiştirilerek istenilen 20 derecelik açığa verilen cevaplar incelenmiştir.  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$

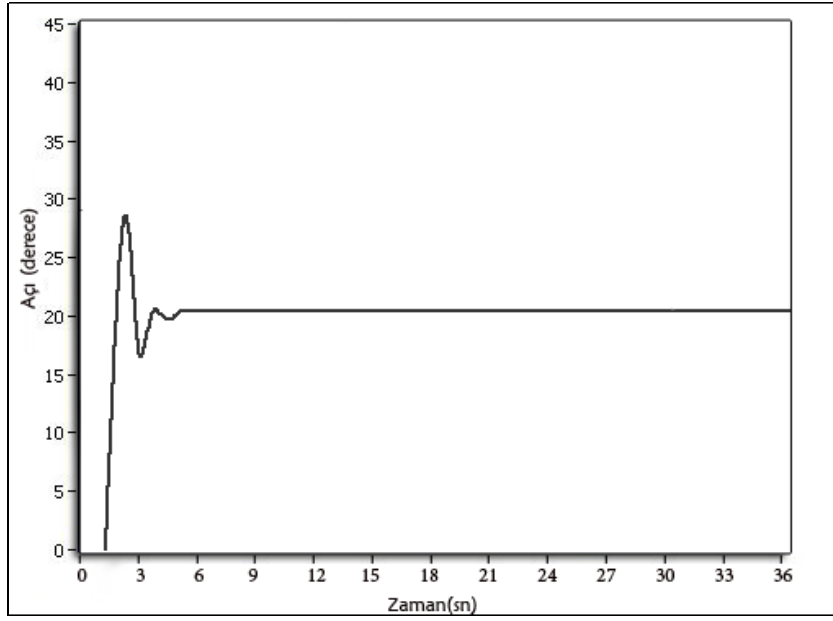
parametrelerinin uygun değerlerinin belirlenebilmesi için Nichols Ziegler yöntemi sıkça kullanılmaktadır [40].

Çalışmamızda bu parametreler benzetim ortamında deneyerek belirlenmiştir. Çeşitli parametre değerleri için elde edilen cevap eğrileri Şekil 4.7’de verilmiştir.

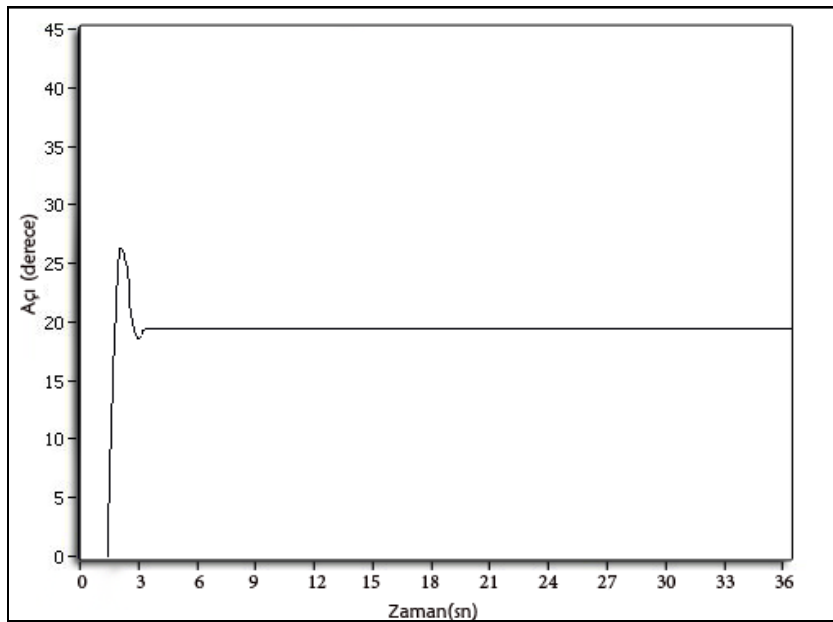
Türevsel kontrolörün sistemi kararsız davranış sergilemekten kurtardığı ve integral kontrolör kullanılmadığında kararlı hal hatası oluştuğu Şekil 4.7’den açıkça gözlenmektedir.



(a)  $K_p : 5$     $K_d : 0$     $K_i : 4$



(b)  $K_p: 5$   $K_d: 0.5$   $K_i: 4$



(c)  $K_p: 6$   $K_d: 1$   $K_i: 0$

Şekil 4.7. PID'li kontrol benzetim sonuçları

## 4.5. Model Esaslı Adaptif Kontrolörlü Sistemin Benzetimi

### 4.5.1. MIT kuralıyla sarkaç sistemin benzetimi

MEAK sistemin benzetiminin yapılabilmesi için MIT kuralı uygulanması gereklidir. Üçüncü bölümde anlatılan adımları sarkaç sistemimiz için uygulamayı istersek öncelikli olarak hatanın bulunması, performans ölçütünün belirlenmesi, duyarlılık türevlerinin hazırlanması aşamaları incelenmelidir.

Sistem çıkışı ile model çıkışımız arasındaki fark:

$$e = y_{sistem} - y_{model} \quad (4.6)$$

Performans ölçütü:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(\theta) \quad (4.7)$$

Duyarlılık türevi

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\delta J}{\delta \theta} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta \theta} \quad (4.8)$$

Olarak kabul edildikten sonra sistemimizin transfer fonksiyonu G modelimizin transfer fonksiyonu  $G_m$  olmak üzere hata 4.9 denkleminde ifade edilir şekilde gelir.

$$e = y - y_m = Gu - G_m u_c \quad (4.9)$$

Model çıkışı 4.10 denkleminde ifade edilirse;

$$y_m = \left( \frac{1.9}{s^2 + 0.16s + 7.93} \right) (\theta_1 u_c - \theta_2 y) \quad (4.10)$$

$$y_m = \frac{1.9\theta_1}{s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2} u_c \quad (4.11)$$

Hata eşitliğini şu şekilde gösterebiliriz:

$$e = y - y_m = \frac{1.9\theta_1}{s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2} u_c - G_m u_c \quad (4.12)$$

Hatanın duyarlık türevlerini inceleyecek olursak

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \frac{1.9\theta_1}{s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2} u_c \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = -\frac{(1.9)^2 \theta_1}{(s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2)^2} u_c = -\frac{1.9\theta_1}{s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2} y \quad (4.14)$$

4.13 ve 4.14 denklemlerini elde ederiz

$$s^2 + 0.16s + 7.93 + 1.9\theta_2 \approx s^2 + a_{1m}s + a_{0m} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} u_c \quad (4.16)$$

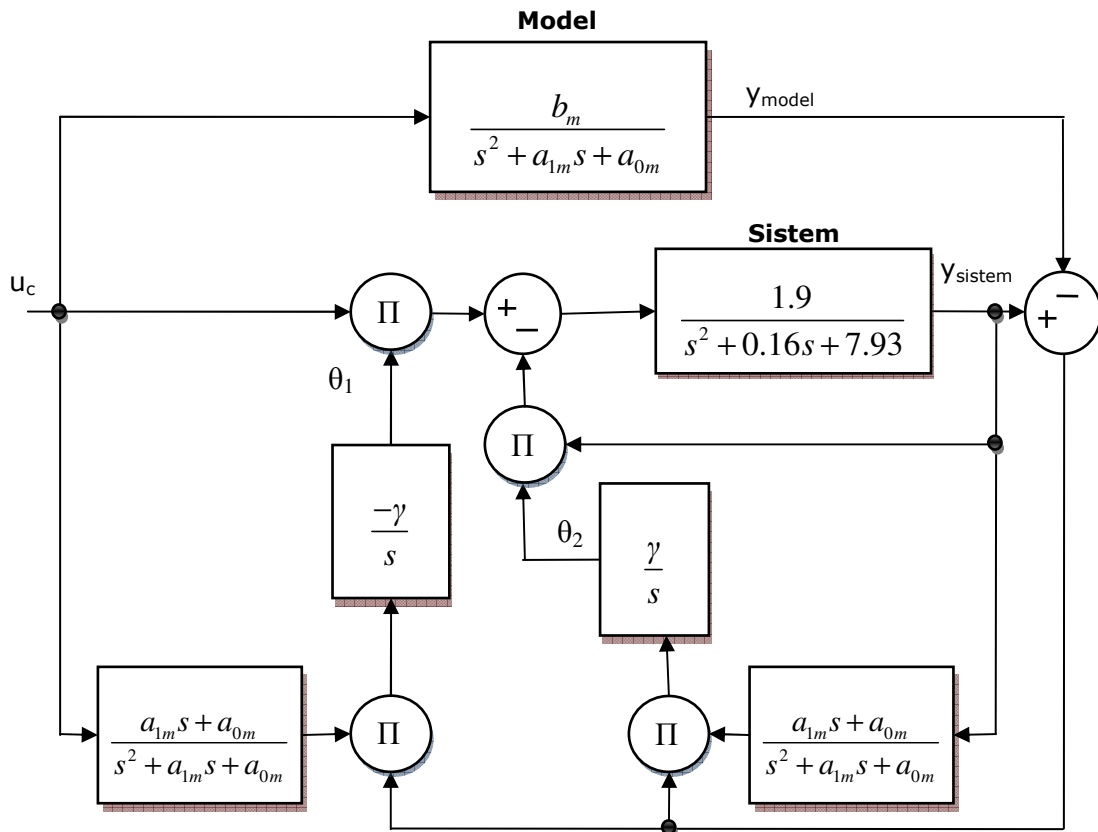
$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = -\frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} y \quad (4.17)$$

4.16 ve 4.17 denklemleriyle aşağıdaki diferansiyel denklemler oluşturulur.

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_1} e = -\gamma \left( \frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} u_c \right) e \quad (4.18)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_2} e = -\gamma \left( \frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} y \right) e \quad (4.19)$$

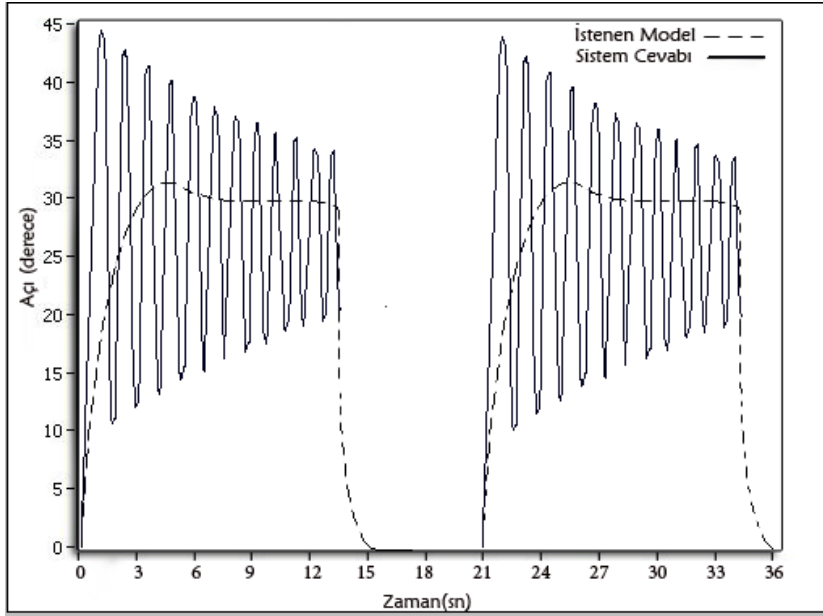
4.18 ve 4.19 diferansiyel denklemlerini kullanarak Şekil 4.8 ile verilen blok diyagramını elde ederiz.



Şekil 4.8. MEAK blok diyagramı

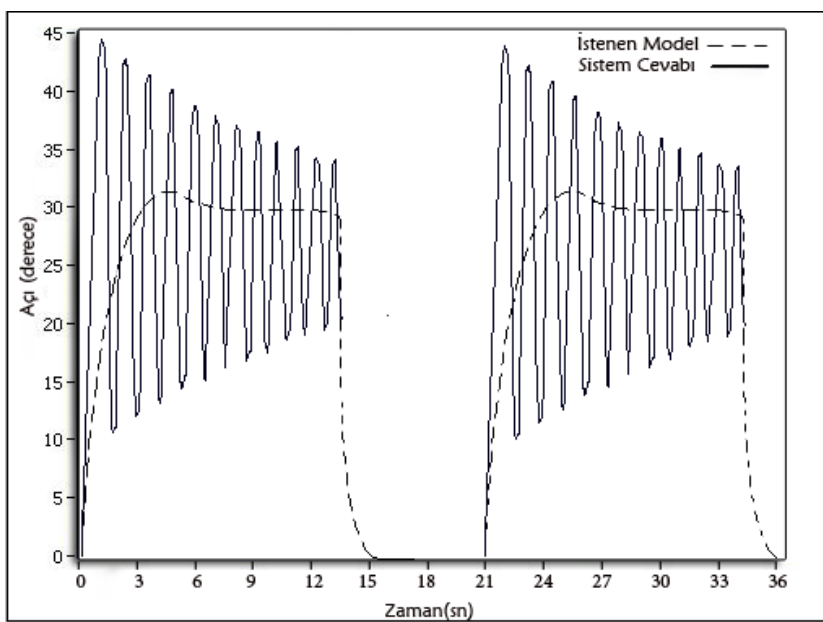
Model parametreleri için kullanılan kodlar Ek-C'de verilmektedir.





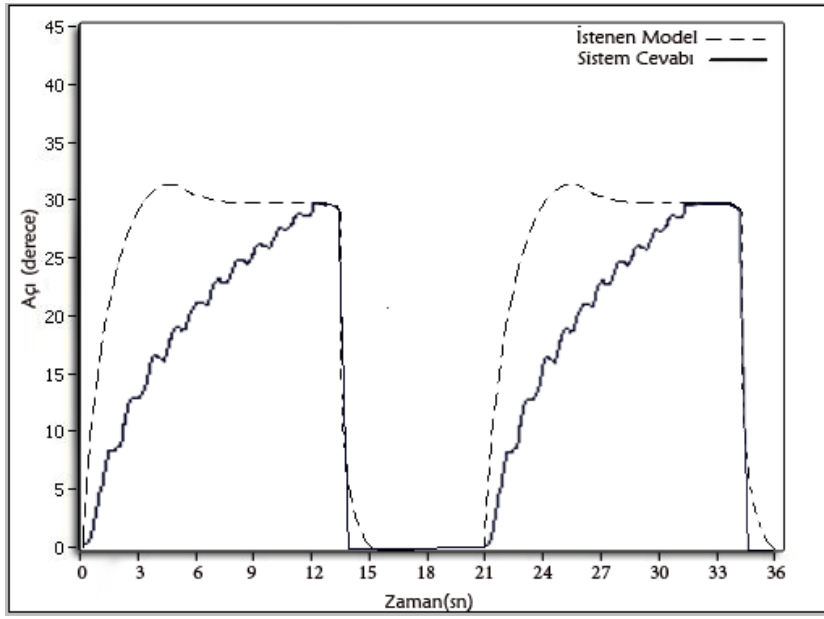
Şekil 4.9. MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.1$  için çıkış açısının zamana göre değişimi

Model esaslı adaptif kontrol yöntemi MIT kuralıyla asılı sarkaç sisteme uygulandığında  $\gamma=0.1$  olarak seçildiğinde sistem salınımı sürdürmektedir. İstenmeyen bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla  $\gamma=0.01$  olarak Ek C'de gösterildiği gibi uygulanıp benzetimi yapıldığında karşılaşılan durum Şekil 4.9'la birebir aynı olmamasına rağmen aynı özellikleri taşımakta ve kontrol sağlanmamaktadır.



Şekil 4.10. MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.01$  için çıkış açısının zamana göre değişimi

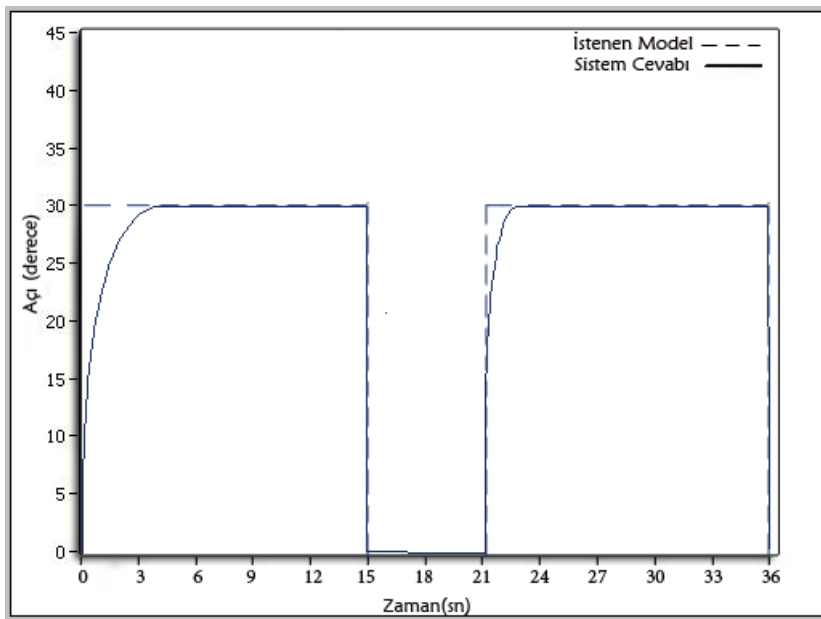
MIT kuralının dezavantajları arasında da saydığımız  $\gamma$ 'nin seçilmesi konusunda genel yargı  $\gamma$ 'nın mümkün olduğunca küçük seçilmesidir. Bu yargıdan yola çıkarak benzetim ortamında  $\gamma$ 'yı 0.001 olarak aldığımızda sistem diğer  $\gamma$  değerlerine oranla daha mantıklı bir cevap vermekte fakat Şekil 4.11 ile gösterildiği gibi titreşimli durumla karşı karşıya gelinmektedir. Bu noktada MIT kuralının asılı sarkaç sistem için ideal bir kontrol seçeneği olmadığı görüşü netleşmektedir.



Şekil 4.11. MEAK MIT Asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.001$  için çıkış açısının zamana göre değişimi

#### 4.5.2. I. Dereceden sistemin MEAK benzetimi

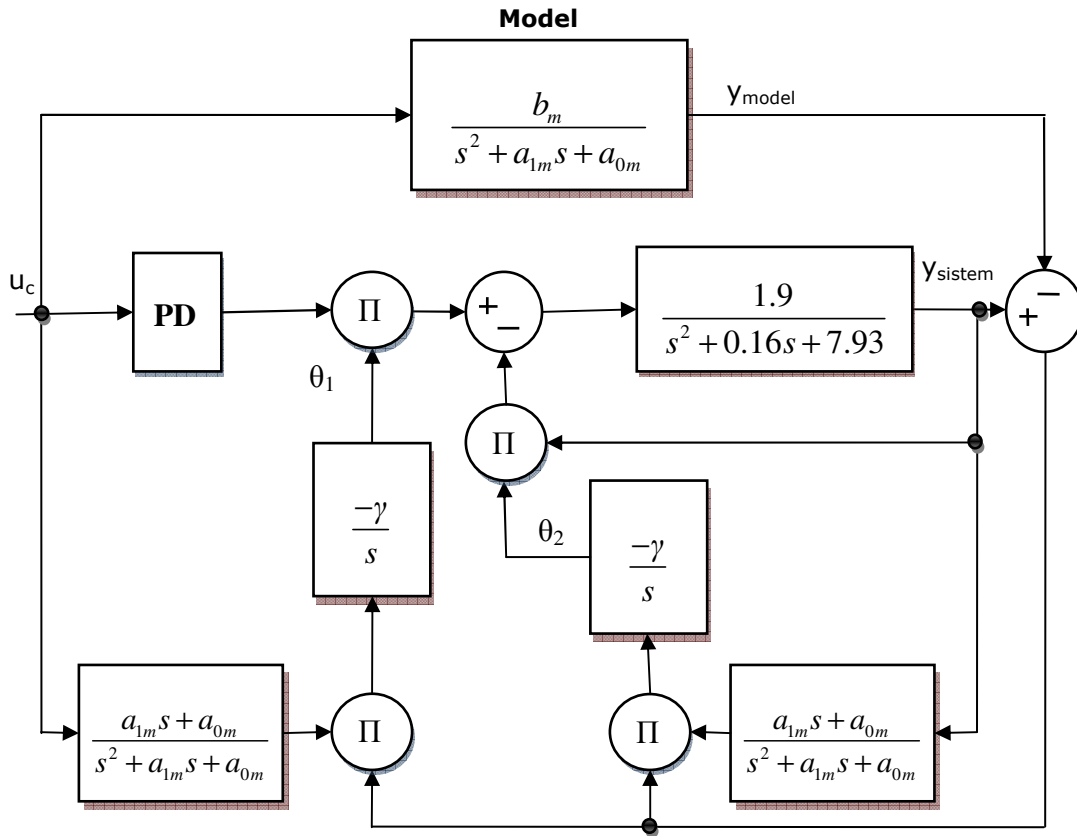
MIT kuralının I. dereceden bir sistemde başarılı olup olmadığı konusunda yapılan benzetim çalışması sonucunda Şekil 4.12 sonuçları elde edilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere asılı sarkaç sistem kontrolünde kararsızlığa giden sistem cevabına karşılık birinci dereceden sistemde başarılı bir model takibi sağlanmaktadır.  $\theta$  açılarındaki değişimlere de dikkat edecek olursak ilk andaki değişim dışında çok ufak değişimler olmakta yani sistem çabuk bir şekilde modeli takip etmektedir.



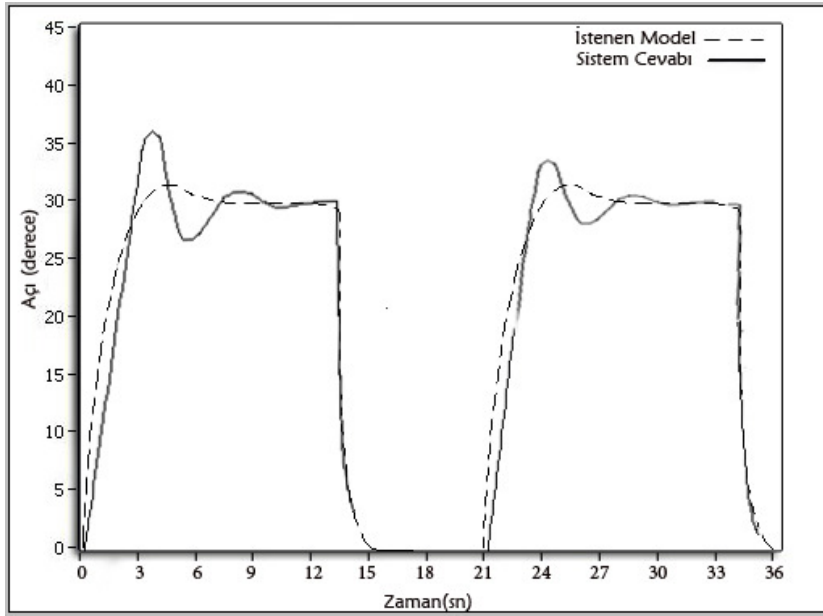
Şekil 4.12. MEAK MIT kuralı 1.dereceden sisteme ilişkin  $\gamma = 0.001$  için çıkış açısının zamana göre değişimi

#### 4.6. MEAK MIT ve PD Kontrollü Sistemin Benzetimi

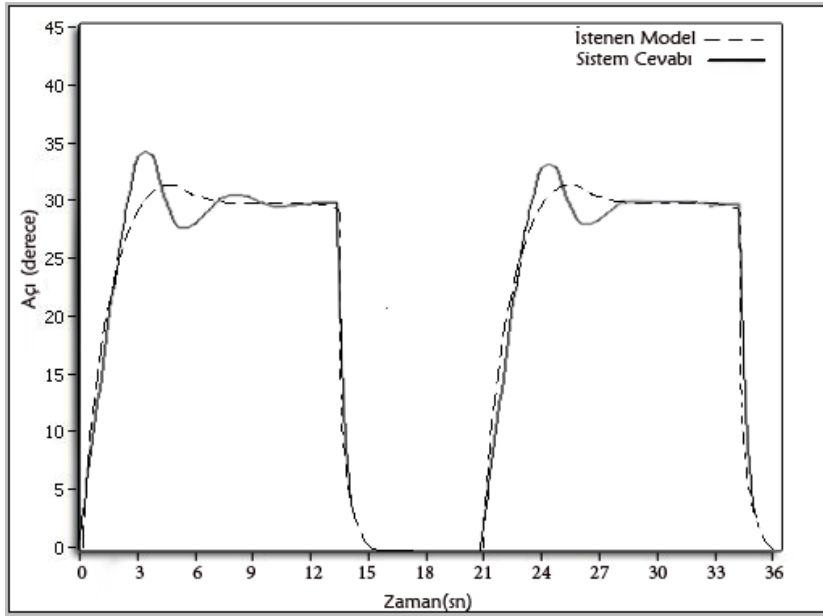
Bu çalışmada model esaslı adaptif kontrolörü PD kontrolör ile birlikte kullanarak kararlılık konusundaki problemlerin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla Şekil 4.13 ile verilen blok diyagramının çeşitli  $\gamma$  değerleri için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.



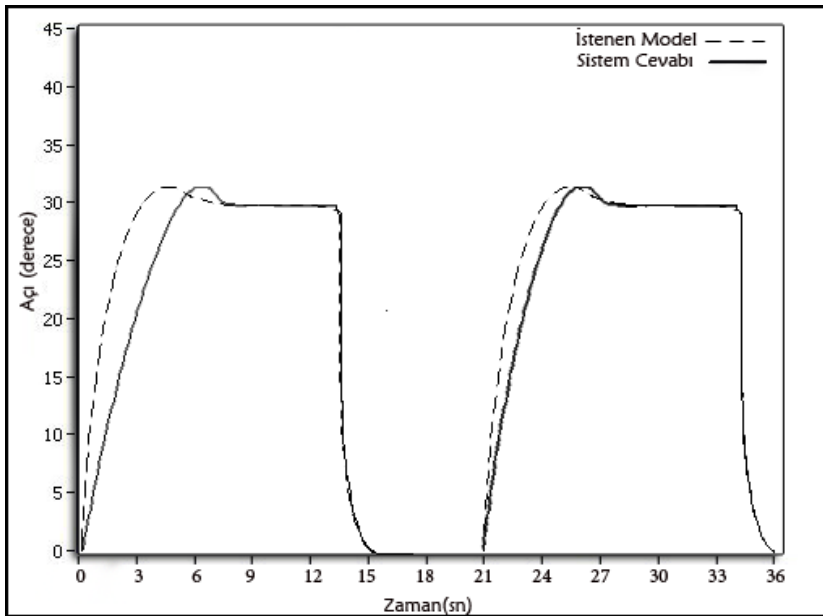
Şekil 4.13. MEAK MIT +PD kontrol blok diyagramı



Şekil 4.14. MEAK MIT Kuralı + PD kontrollü asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.1$  için çıkış açısının zamana göre değişimi



Şekil 4.15. MEAK MIT Kuralı + PD kontrollü asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.01$  için çıkış açısının zamana göre değişimi



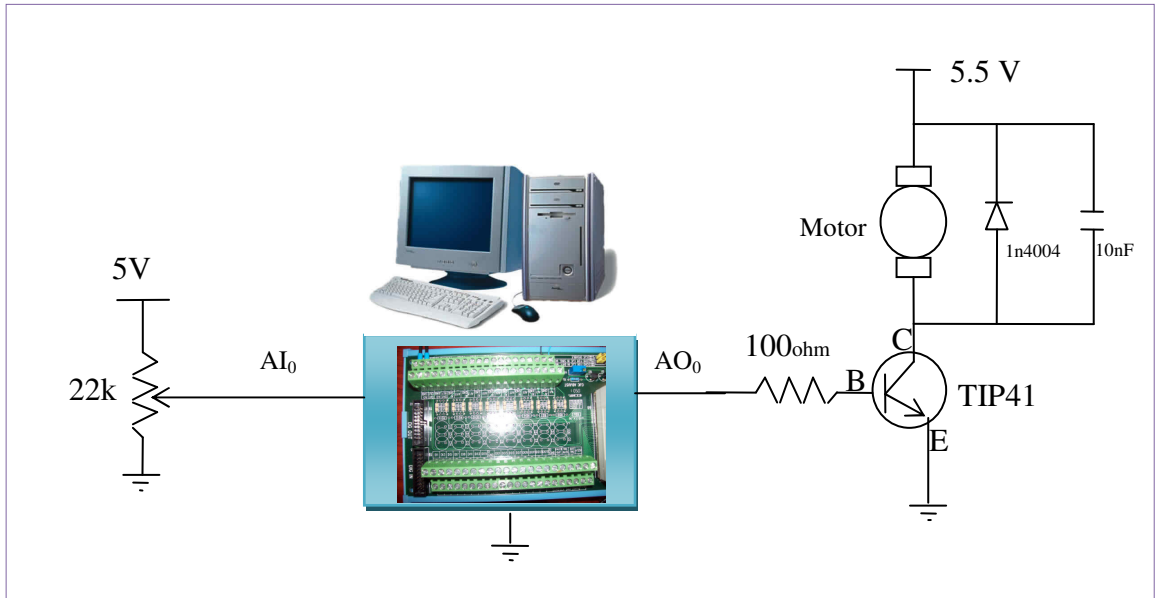
Şekil 4.16. MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.001$  için çıkış açısının zamana göre değişimi

PD kontrolörle MIT kuralının birlikte kullanılması sayesinde asılı sarkaç sisteminin kararsız davranış sergilemesi ve  $\gamma$ 'nın küçük seçilmesi sayesinde ilk anda oluşan aşımalar engellenmektedir.

## BÖLÜM 5. DENEY ÇALIŞMALARI

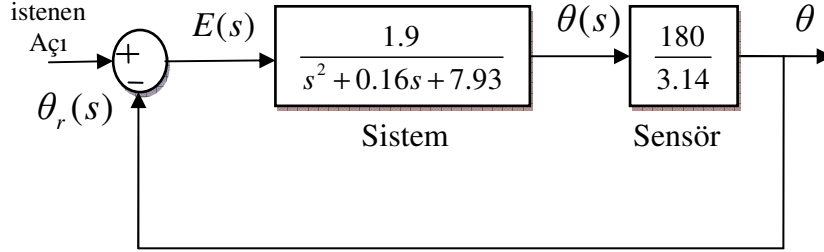
### 5.1. Giriş

Asılı sarkaç sistemine ilişkin Şekil 5.1 ile verilen sistem düzeneği kurulmuştur. Veri toplama kartının analog giriş kanalından gerilim ölçülmekte, analog çıkış kanalından ise sisteme kontrol gerilimi uygulanmaktadır. Sisteme ilişkin gerekli yazılım gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'den görüldüğü gibi sarkaç açısı gerilim bölücü bir döner potansiyometre ile analog giriş kanalı üzerinden bilgisayara aktarılmakta, sistem analog çıkış kanalına bağlanmış olan bir sürücü transistör vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Bu bölümde sistemin kontrolsüz sistem cevabının incelenmesi, PID kontrol uygulaması, MEAK, MEAK+PD kontrolörlü sistem uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

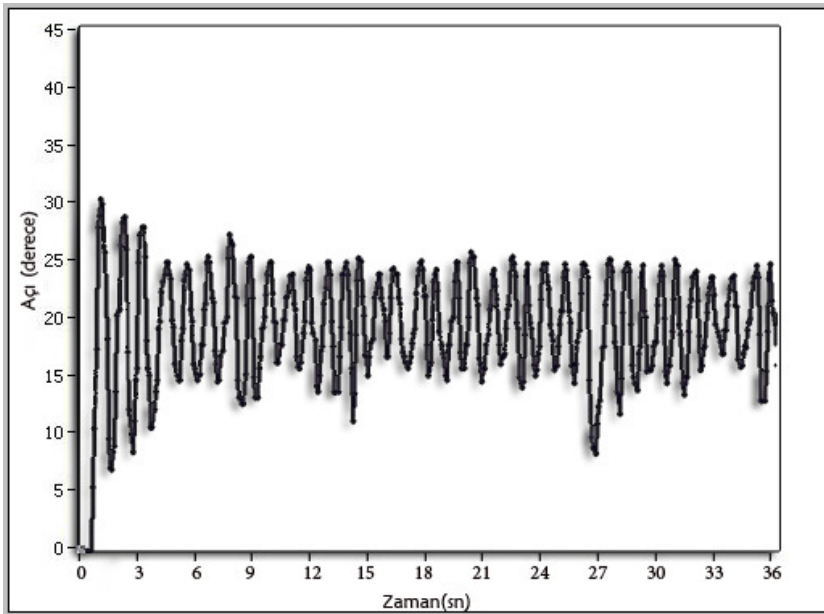


Şekil 5.1 Deney düzeneği

## 5.2. Kontrolörsüz Geri Beslemeli Sisteme İlişkin Deneysel Sonuçlar



Şekil 5.2. Kontrolörsüz geri beslemeli sisteme ilişkin blok diyagramı



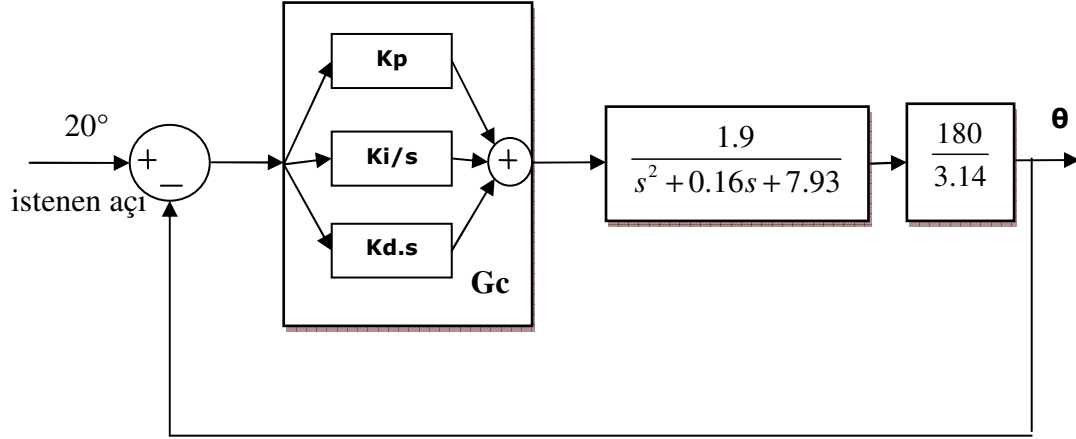
Şekil 5.3. 20°'lik referans girişine ilişkin çıkış eğrisi

Şekil 5.2'de kontrolörsüz geri beslemeli sisteme ilişkin blok diyagramı verilmiştir. Şekil 5.3'de ise söz konusu sisteme 20°'lik referans girişi uygulandığında sarkaç açısının zamana göre değişimi verilmiştir.

Bu eğrilerden de anlaşılacağı üzere sistem benzetim çalışmasına yakın bir sonuç vermekte ve 20 derece istenen açıya ulaşamamaktadır. Aynı zamanda çıkış açısındaki sürekli değişimin giderilmesi de mümkün olmamaktadır. Ek D'de tasarlanan arayüz hakkında bilgi verilmektedir.

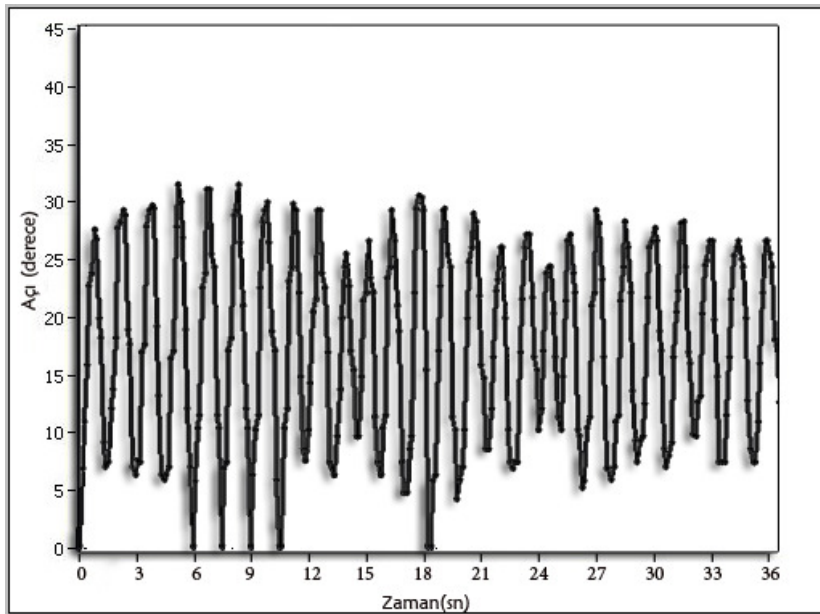
### 5.3. PID Kontrollü Sisteme İlişkin Deney Sonuçları

PID kontrollü sisteme ilişkin deneysel çalışma yapılırken aşağıdaki blok diyagramı kullanılmıştır.



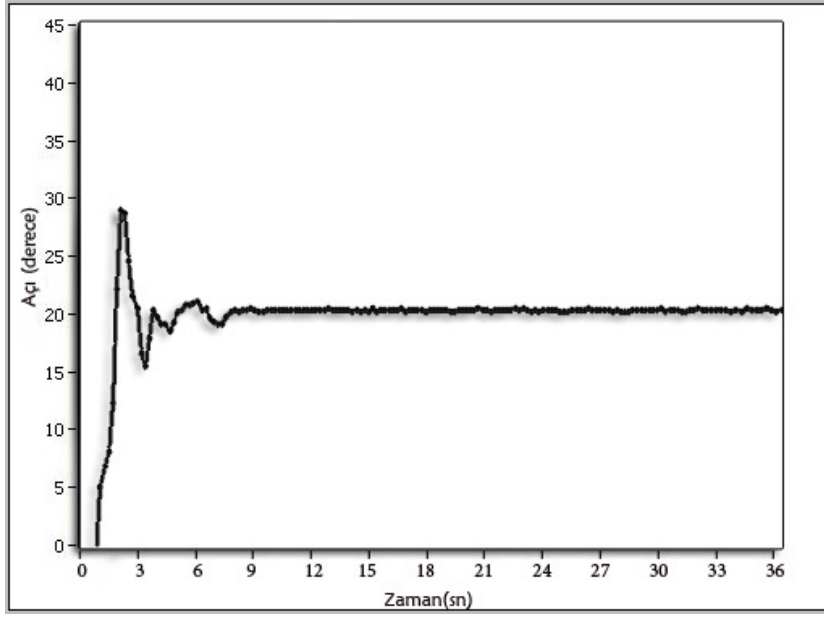
Şekil 5.4. PID'li kontrole ilişkin blok diyagramı

Sistemin PID kontrolünün deney çalışmasında  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  dışarıdan ayarlanabilinecek bir arayüz tasarımı yapılmış (EK D) bu sayede bu parametreler değiştirilerek istenilen 20 derecelik açığa verilen cevaplar incelenmiştir. Çeşitli parametre değerleri için elde edilen cevap eğrileri Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

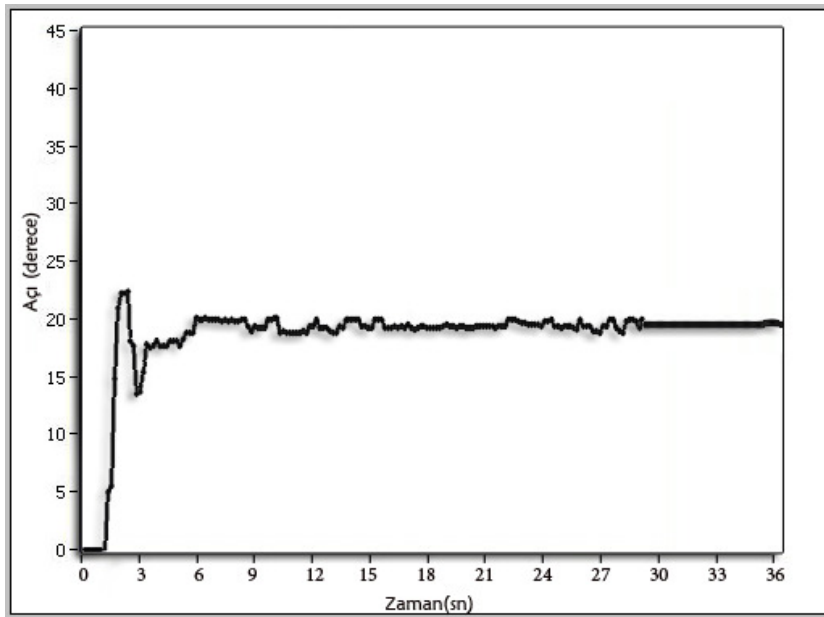


(a)  $K_p : 5$     $K_d : 0$     $K_i : 4$





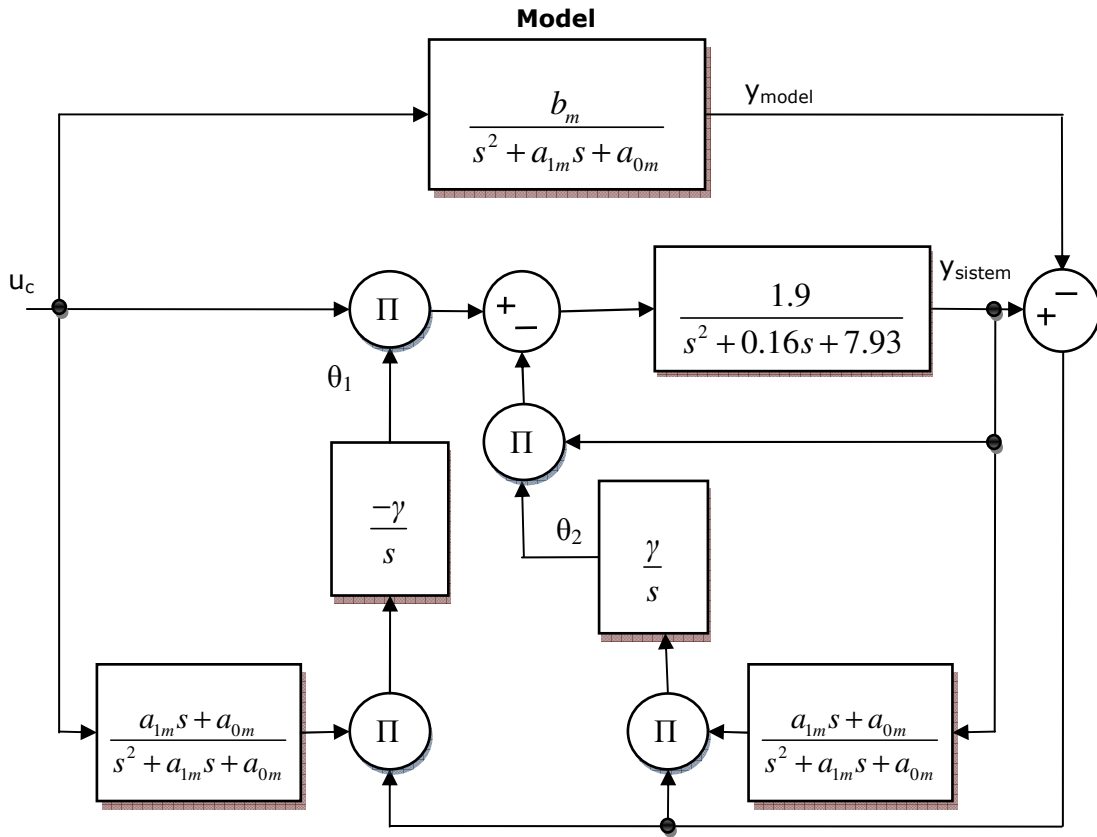
(b)  $K_p : 5$   $K_d : 0.5$   $K_i : 4$



(c)  $K_p : 6$   $K_d : 1$   $K_i : 0$

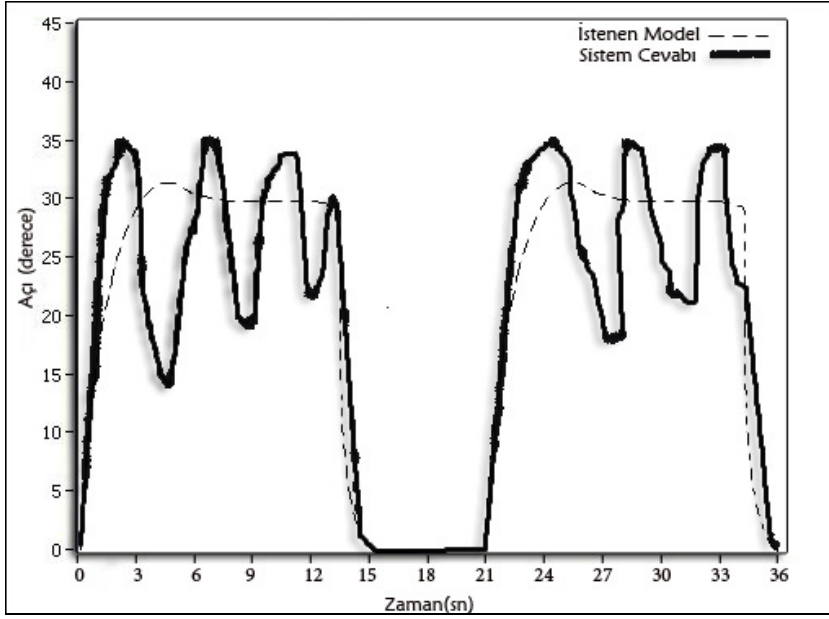
Şekil 5.5. PID'li kontrole ilişkin deney çalışması sonuçları

#### 5.4. Model Esaslı Adaptif Kontrolörlü Sistemin Deney Çalışması

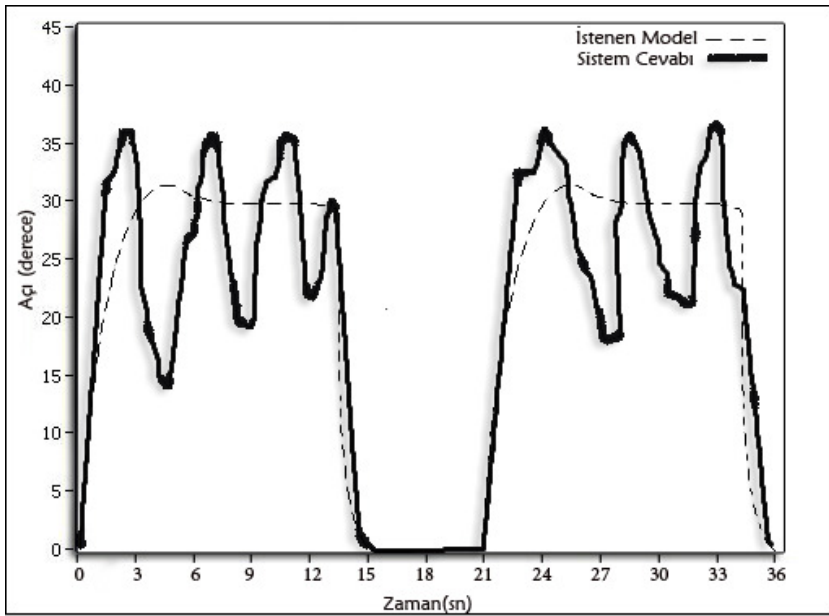


Şekil 5.6. MEAK blok diyagramı

Şekil 5.6 blok diyagramı verilen sistem deneysel olarak gerçekleştirilerek  $\gamma$  0,1 – 0,01 – 0,001 parametre değerleri için sonuçlar incelenmiştir. Tasarlanan arayüz Ek D’de verilmiştir.



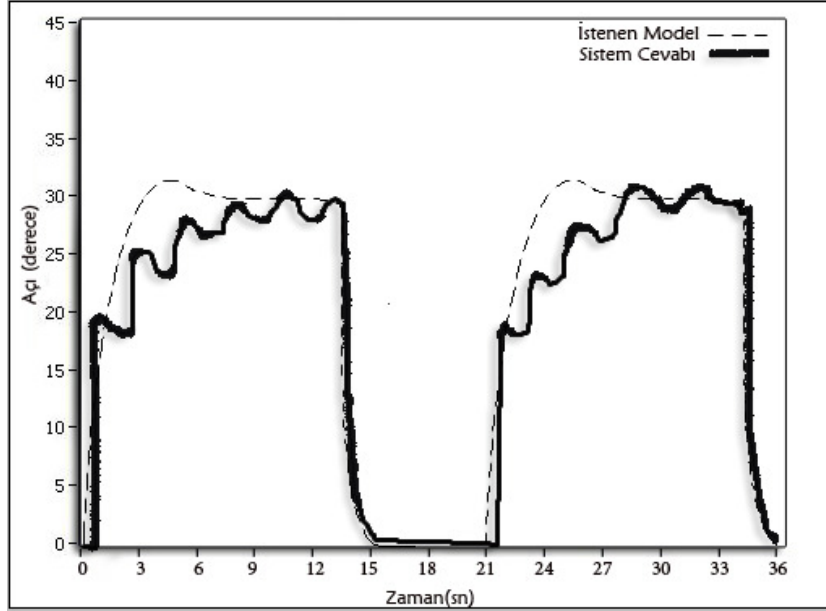
Şekil 5.7. MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin  $\gamma = 0.1$  için deneyel çıkış eğrisi



Şekil 5.8. MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin  $\gamma = 0.01$  için deneyel çıkış eğrisi

MIT kuralının dezavantajları arasında saydığımız  $\gamma$ 'nın seçilmesi konusunda genel yargı  $\gamma$ 'nın mümkün olduğunca küçük seçilmesidir. Bu yargıdan yola çıkarak deney ortamında  $\gamma$ 'yı 0.001 olarak aldığımızda sistem diğer  $\gamma$  değerlerine oranla daha makul bir cevap vermekte fakat istenilen model takibi tam olarak gerçekleştirilememektedir. Benzetim sonuçlarına yakın olan deneyel sonuçlarından

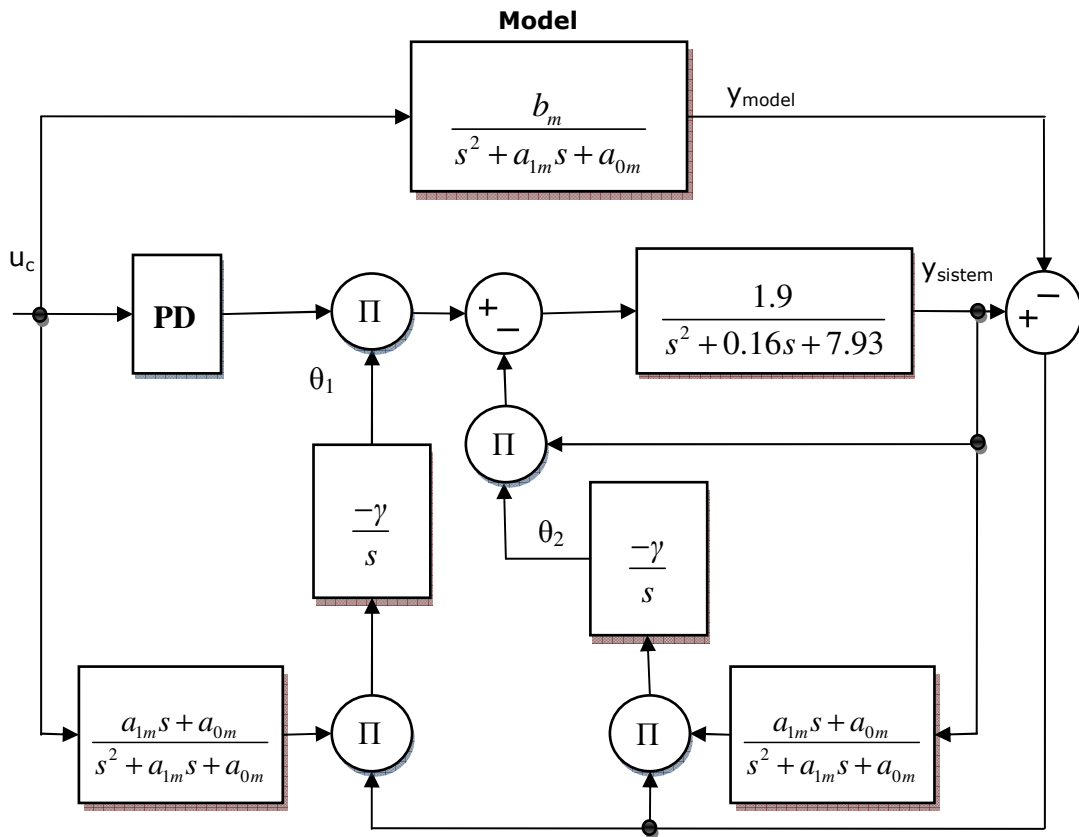
da anlaşıldığı üzere asılı sarkaç sisteminde MEAK kontrol ile pratik ortamda oldukça iyi model takibi yapılamamaktadır.



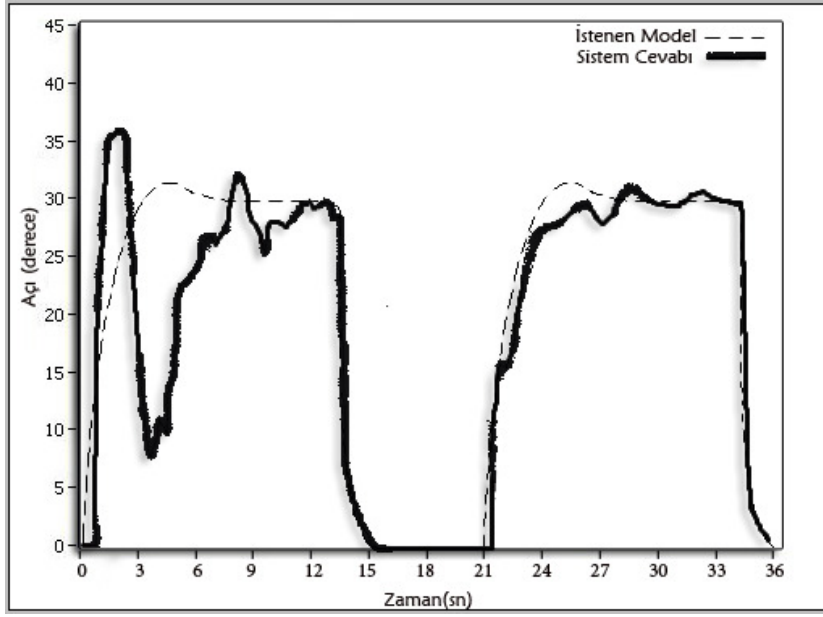
Şekil 5.9. MEAK MIT Asılı sarkaç sistemine ilişkin  $\gamma = 0.001$  için deneysel çıkış eğrisi

### 5.5. MEAK ve PD Kontrollü Sistemin Deney Çalışması

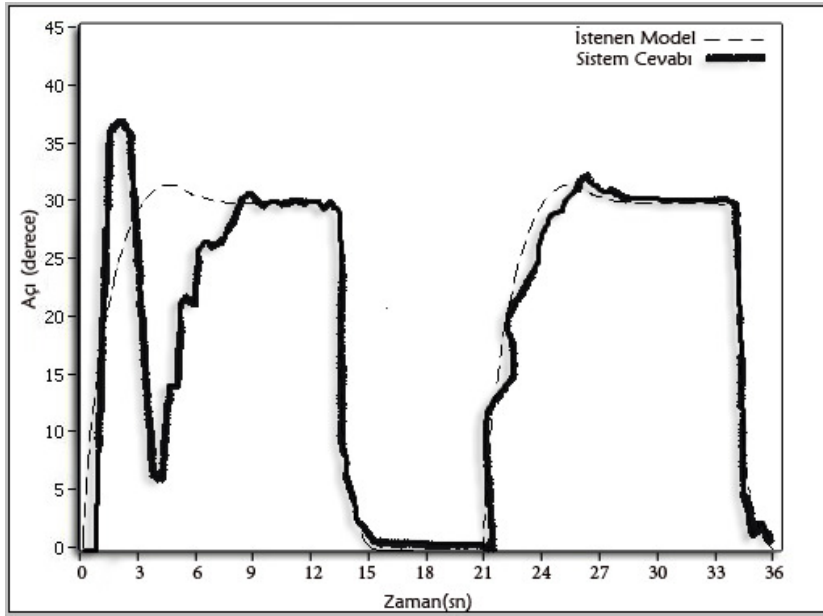
Bu çalışmada model esaslı adaptif kontrolörü PD kontrolör ile birlikte kullanarak kararlılık konusundaki problemlerin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla Şekil 5.10 ile verilen blok diyagramının çeşitli  $\gamma$  değerleri için yapılan deney çalışmalarının sonuçları Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ile sunulmaktadır.



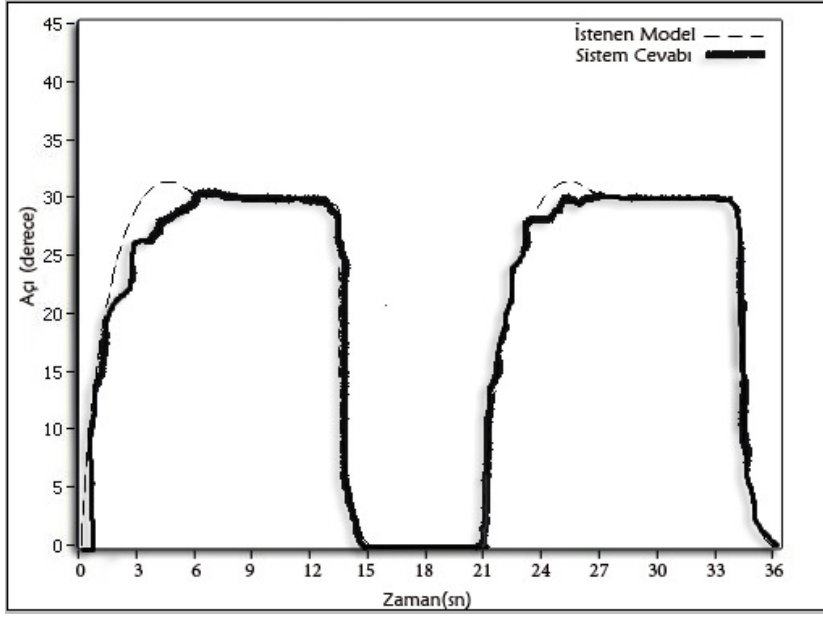
Şekil 5.10. MEAK+PD kontrol blok diyagramı



Şekil 5.11. MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.1$  için deneysel çıkış eğrisi



Şekil 5.12. MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.01$  için deneysel çıkış eğrisi



Şekil 5.13. MEAK MIT Kuralı + PD asılı sarkaç sisteme ilişkin  $\gamma = 0.001$  için deneysel çıkış eğrisi

Benzetim sonuçlarıyla uyumluluk gösteren deneysel sonuçlardan da görüleceği üzere PD kontrolörle MIT kuralının birlikte kullanılması sayesinde asılı sarkaç sisteminin kararsız davranış sergilemesi ve  $\gamma$ 'nın küçük seçilmesi sayesinde ilk anda oluşan aşım engellenmektedir.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Asılı sarkacın benzetim ve deneysel sonuçlarından da anlaşılacağı üzere sistem aşırı derecede salınımlı bir sistemdir. Kontrolörsüz geri beslemeli sistemin cevabında da aynı sonuçla karşılaşmış uzun süreli salınım gözlenmiştir.

Endüstride PID kontrolör yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sistem bu noktada adaptif değildir. Parametre değişimleri ya da giriş işaretindeki büyük değişimler ve sistemde rastgele oluşan değişimler genelde ölçülemez bu durumlarda değişimleri otomatik olarak düzenleyecek sistem gereksinimleri ön plana çıkar. Bu noktada PID kontrolörler yetersiz kalmaktadırlar.

Model esaslı kontrolörlerin MIT kuralıyla uygulanmasında sistemin kararsızlığa gitmesi sorun oluşturmaktadır. Birinci dereceden sistemlerde performansı yüksek olan MEAK MIT kuralı asılı sarkaç sisteminde aynı performansı gösterememekte ve sistem kararsız davranışlar sergilemektedir. Ayrıca model esaslı kontrolcüler MIT kuralıyla kullanılırken  $\gamma$ 'nın seçiminde sıkıntılar yaşanmaktadır.  $\gamma$  değerini mümkün olduğu kadar küçük almamız gerekmektedir. Çalışmamızda bu değer 0.001 olarak belirlenmiştir. Bu değer altında seçilmesi durumunda sistem istenilen model takibini gerçekleştirememektedir.

Benzetim çalışmalarımızda MIT kuralının eksik yönü PD kontrolör birlikte kullanılarak tamamlanmakta ve kararsızlık problemi ortadan kaldırılarak model takibi ile asılı sarkaç istenilen açığa getirilmektedir.

Deneysel çalışmalar için hazırlanan parametreler dışarıdan ayarlanabilir arayüzler sayesinde eğitim amaçlı kullanılacak sistem düzeneği elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen eğrilerin benzetim çalışmalarındaki eğrilere yakınlık gösterdiği ancak tamamen aynı olmadığı görülmüştür. Ortam şartları, deney



düzeninde oluşabilecek arızalar ve modelini ele aldığımız sistem ile gerçek sistem modelinin arasında az da olsa fark olması bu eğrilerin tamamen aynı olmasını engelleyici sebepler olarak sıralanabilir.

## **BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER**

Asılı sarkaç sistemde konum kontrolünün incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre PD kontrolörlü MEAK MIT kuralı istenilen modeli izlemeye bu çalışmada bahsedilen yöntemler içerisinde en iyi performansı göstermektedir. Bu konuda yurtdışında yapılan çalışmalar genellikle laboratuarlarda kontrol eğitimi üzerine kullanılmaktadır. Deney düzeneği hazırlanan sistem için çeşitli arayüzler hazırlanarak istenilen tüm parametrelerin bilgisayar aracılığıyla değiştirilip sistem davranışının izlenmesi sağlanabilir. Bu yöntem gerek PID gerek MEAK ve diğer tüm kontrol metotlarının akılda kalıcı olması açısından öğrenciler için önemli ve bir seçenektir. Eğitim seti olarak kullanılabilirliğinin dışında örneğin bir teknede kullanılarak yine bir kumanda aracılığıyla teknenin istenen açığa en hızlı şekilde getirilmesi ya da halatla taşımacılık sistemlerinde yükün sarsılmadan bir noktadan başka bir noktaya taşınması sağlanabilir.

Bu çalışmada uygulanan yöntemler dışında MEAK türlerinden Lyapunov, Hiperkararlılık, Monopoli yaklaşımı vb diğer yaklaşımların sisteme uygulanması mukayese açısından önemlidir. Ayrıca kayan kipli kontrol yaklaşımının da bu sistemde başarılı sonuçlar verebileceği söylenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] IVEY D.G. and HUME J.N.P., Physics, p.434 *Ronald Press*, New York 1974
- [2] HINRICHSEN P.F. , “Practical Applications of Compound Pendulum” p286-292 *The Physics Teacher* May. 1981
- [3] OVERBECK C.J. , PALMER R.R. , STEPHENSON R.J. AND WHITE M.W. , “Cenco Selective Experiments in Physics” Nos. 154 and 157 *Central Scientific Co.* Chicago,1941
- [4] SASTRY S. and BODSON M. , Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness, *Prentice-Hall*, 1989-1994
- [5] ZHOU K., DOYLE J. C. Essentials Of Robust Control, *Prentice Hall* 1997
- [6] ARTMAN S.S., The Simple Pendulum Is Not So Simple, Society for Industrial and applied Math. , Vol.40, No 4, 927-930 , 1998
- [7] MATTHEWS M.R., GAULD C. and STINNER A., The Pendulum: It’s Place in Science, Culture and Pedagogy. *Science & Education*,13, 261-277., 2005
- [8] MCLACHLAN, N.W., Theory and application of Mathieu functions. New York, 1962
- [9] HUYGENS C. (translated by BLACKWELL R.), The pendulum clock or geometrical demonstrations concerning the motion of pendula as applied to clocks. Ames, IA: *Iowa State University Press*. 1986
- [10] GREGORY L.B. and BLACKBURN J.A. , The Pendulum: A Physics Case Study, *Oxford University Press*, 2005
- [11] WILCZEK F. and SHAPER A. , "Geometric Phases in Physics", *World Scientific*, 1989
- [12] HUBBARD J.H. , The Forced Damped Pendulum: Chaos, Complication and Control., 1999
- [13] URQUHART M. , Playground Physics: Swing Set Physics, *Lectures*, 1996

- [14] HINRICHSEN P.F. , Sail 9, 28 (1978), Yachts and Yachting 63, p.347, Feb 1978
- [15] SNEED G.C. , “School Technology Programme” *Inst. Ed. Tech. University of Surrey*, Guildford,Surrey, U.K. 1971
- [16] LAUBENBACHER R, PENGELLEY D. , *Mathematical Expeditions: Chronicles by the Explorers*,1998
- [17] BOLTON W, *Newnes Kontrol Mühendisliği Cep Kitabı*, 1998
- [18] PARASKEVOPOULOS P.N. *Modern Control Engineering*, , *Marcel Dekker Inc.*, 2002
- [19] ÖZDEMİR A. , *Otomatik Kontrol Ders Notları*,*Sakarya Üniversitesi* 2003
- [20] AKSOY S., “Programlanabilir Lojik Denetleyiciler ve Mühendislik Uygulamaları”, *Değişim Yayınevi*, Sakarya 2004.
- [21] CHESMOND C.J. , “Control System Technology ” *Edward Arnold*,1982
- [22] SCHLEICHLER M, BLASINGER F. , *Control Engineering A Guide for Beginners*, 2003
- [23] SASTRY, Two Timescale Analysis of the Alopex Algorithm for Optimization. *Neural Comp.* 14: 2729-2750, 2002
- [24] ASELTINE J.A. MANCINI A. R. SARTURE C. W. , A Survey of Adaptive Control Systems *Automatic Control*, IRE Transactions on Volume 6, Issue 1, Page(s):102 – 108, Dec 1958
- [25] HSU J. , MESERVE W. , Decision-making in adaptive control systems; *Automatic Control*, IRE Transactions on Volume 7, Issue 1, Page(s):24 – 32, Jan 1962
- [26] ASTROM K.J , Adaptive control around 1960.; *Control Systems Magazine*, IEEE Volume 16, Issue 3, Page(s):44-49, June 1996
- [27] ASHER R.B. , ANDRISANI D. , Bibliography on adaptive control systems, II; Dorato, P. ; *Proceedings of the IEEE* Volume 64, Issue 8, Page(s): 1226 – 1240, Aug. 1976
- [28] BAYARD D.S., A modified augmented error algorithm for adaptive noise cancellation in the presence of plant resonances; *American Control Conference*, 1998. *Proceedings of the 1998* Volume 1, Page(s):137 - 141 vol.1 24-26 June 1998
- [29] CHALAM V.V., *Adaptive Control Systems*, I. Title II. Series 1987

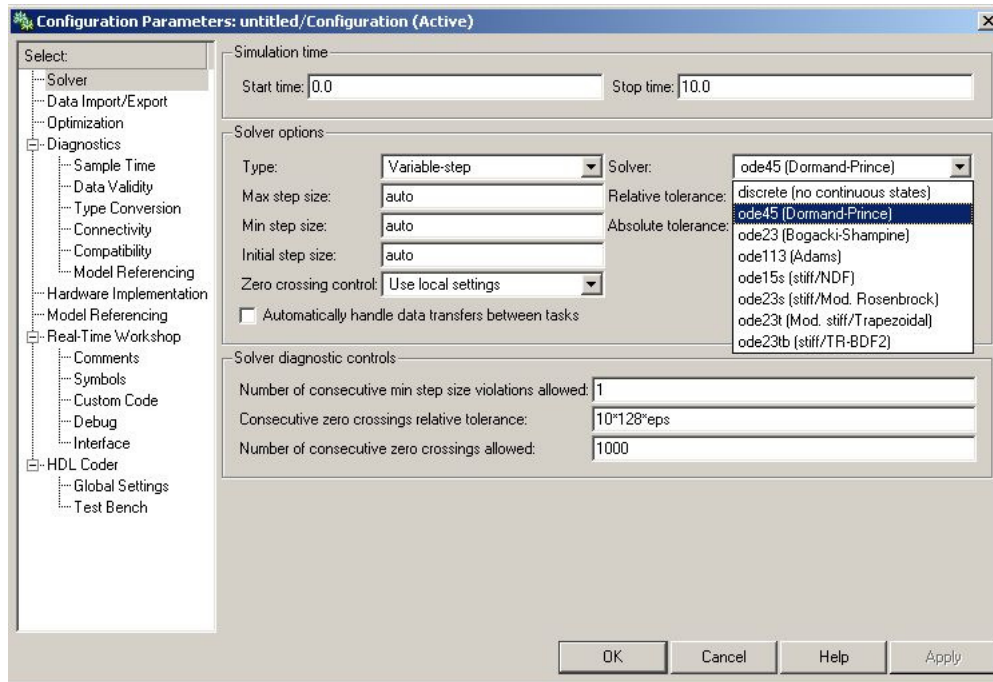
- [30] SRAGOVICH V.G. , *Mathematical Theory Of Adaptive Control*,2005
- [31] MÖRÜ C., *Adaptif kontrol sistemleri ve bir mikrokontrolör ile simülasyonu, İÜ FBE*, 1991
- [32] STEINMENTS J.M. , *MRAC of blood pressure, Florida Atlantic University*, MSE 1332203, 1987
- [33] NIKULIN V.V. , *Advanced Control Technologies for Laser Communications, Binghamton University*, New York, 2002
- [34] SUNWOO M. , CHEOK K.C. , HUANG N.J. , *MRAC for Vehicle Active Suspension Systems Industrial Electronics*, IEEE Transactions on Volume 38, Issue 3, Page(s):217 – 222, June 1991
- [35] IOANNOU P. and SUN J. '*Robust Adaptive Control*' published by *Prentice Hall*, Inc in 1996
- [36] YÜKSEL İ., *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Uludağ Üniversitesi Basımevi*, Bursa, 1995.
- [37] KANNAN S.K. , *Adaptive Control of systems in cascade with saturation, School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology*,2005
- [38] ASTROM K.J. and WITTENMARK B., *Adaptive Control, Addison-Wesley*, New York 1995.
- [39] HANG C., LEE T., HO W., *Adaptive Control*, Instrument Society of America 1993.
- [40] BURNS R.S. , *Advanced Control Engineering, Butterworth-Heinemann*,U.K. 2001

## EKLER

### EK A. Matlab/Simulink Benzetim Ortamı

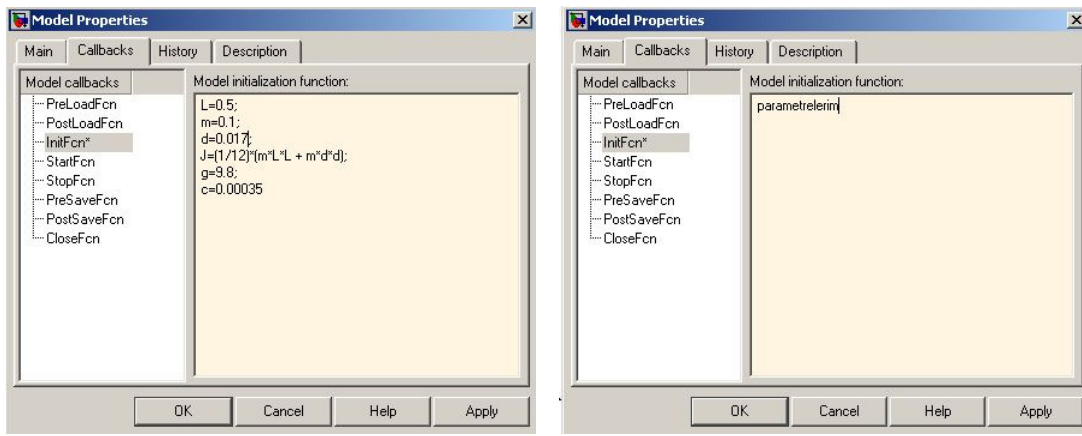
Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Boş bir çalışma alanına blokları yerleştirerek ve blok değerlerini girip istediğimiz şekilde birleştirerek benzetim yapmamıza olanak sağlayan Simulink ortamında aynı zamanda gerçek zamanlı uygulamaların çalıştırılması da mümkün olmaktadır.

Simulink bize görsel olarak blokları kullanmamızı sağlarken Matlab altında bu benzetimin gerçekleştirilmesi için işlemler yapılmaktadır. Bu işlemleri gerçekleştiren matlab mekanizmalarına Çözücü (Solver) adı verilmektedir. Çeşitli çözücüleri mevcut olan Simulink ayrı zaman için de farklı çözücüler sunmaktadır. Bu çalışmada Şekil A.1' de görülen çözücülerden en sık kullanılmakta olan ODE45 çözücüsü tercih edilmiştir.



Şekil A.1. Çözücü seçim ekranı

Ayrıca Simulink işlemleri başlamadan önce başlangıç fonksiyonları belirlemek mümkündür. Bu fonksiyonları ister direk olarak Şekil A.2a ile verilen ekrana girebilir ister ayrı bir matlab dosyası içerisinde alabiliriz. Çalışmamızın model oluşturma bölümünde veriler direk girilmiş MEAK kontrolü bölümünde ise bu değerler parametrelerim.m adlı dosyadan alınarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden Şekil A.2 b' de görülen ekrana dosyanın adını yazmamız yeterlidir.



a) Parametreler direk girilmekte

b) Parametreler dışarıdaki dosyadan alınmakta

Şekil A.2. Model özellikleri ekranı

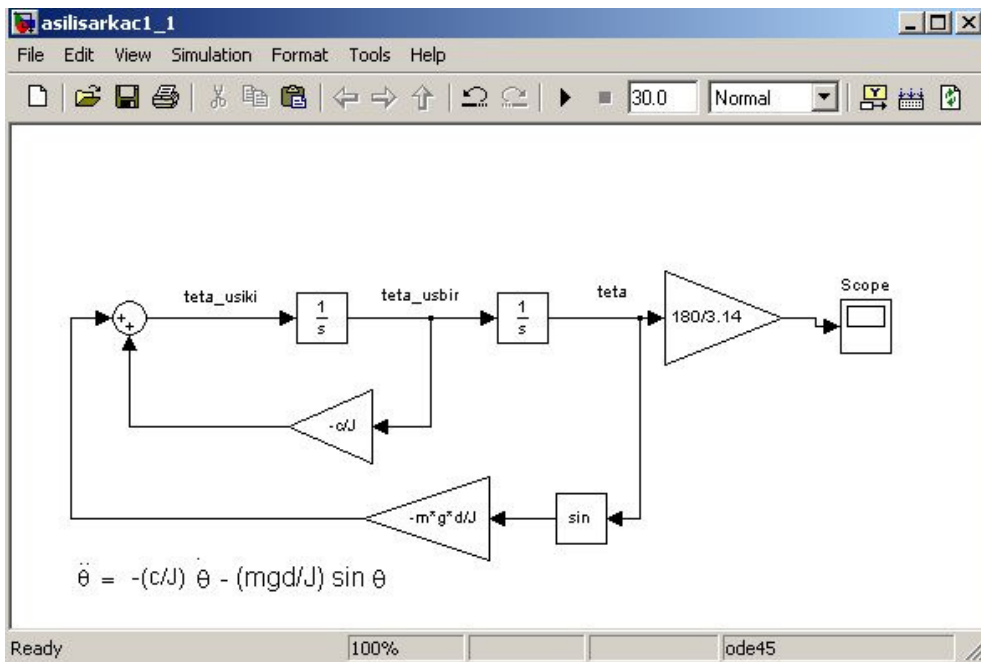
Matlab ortamında herhangi bir sistem modellenirken genellikle sırasıyla şu işlemler uygulanır:

- 1- En yüksek dereceli terim eşitliğin sol tarafında diğer tüm terimler eşitliğin sağ tarafında olacak şekilde düzenlenir.
- 2- Gerekli integratör bloklarının sayısı (2.derece ise 2 blok gereklidir) belirlenerek çalışma alanına sürüklenir
- 3- İntegratör blokları gerekli şekilde birleştirilir

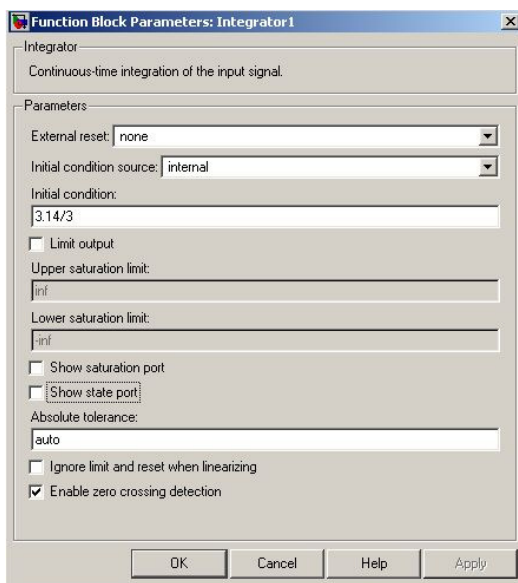
Denklemleri sağlayacak bloklarla birlikte model bağlantıları kurulur.

İkinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edildiğinden dolayı benzetim çalışma alanına iki integratör bloğu eklememiz gerekmektedir. Aynı zamanda trigonometrik fonksiyon bloğu toplama bloğu ve kazanç bloğuna da ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil A.3' de oluşturulan modelin başlangıç şartı için teta açısını veren integratör bloğunun özelliklerine Şekil A.4' de görüldüğü gibi değerler girilir.



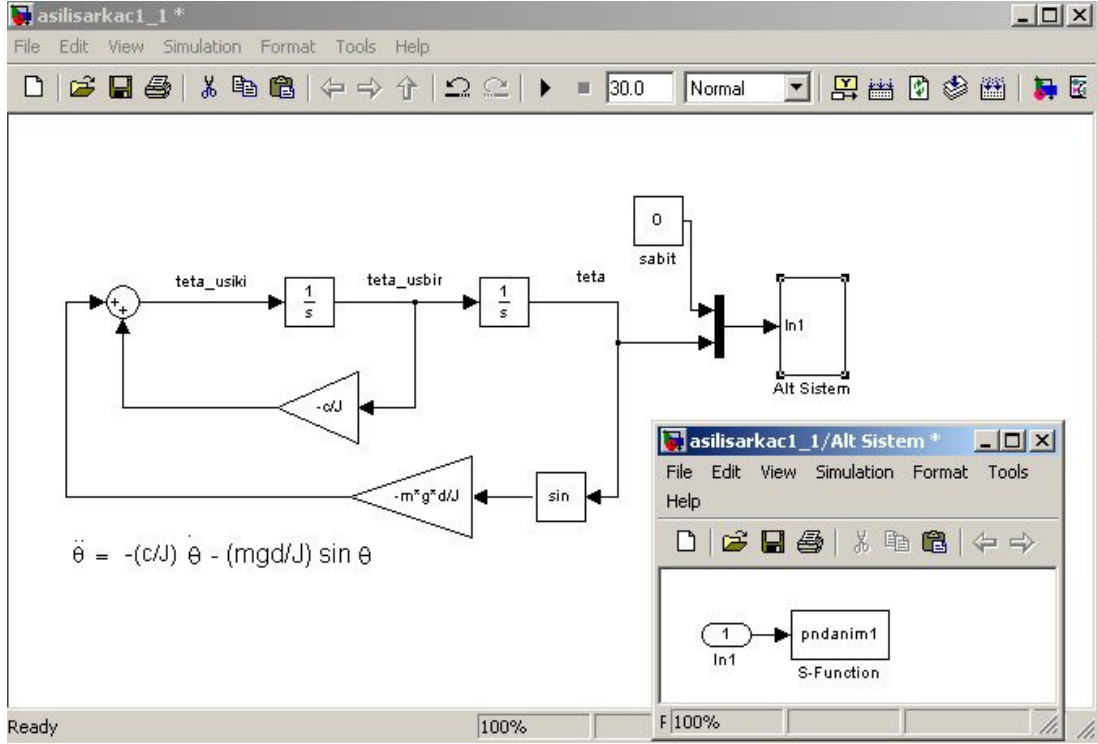
Şekil A.3. Sistem benzetim modeli



Şekil A.4. Başlangıç açısı belirleme ekranı

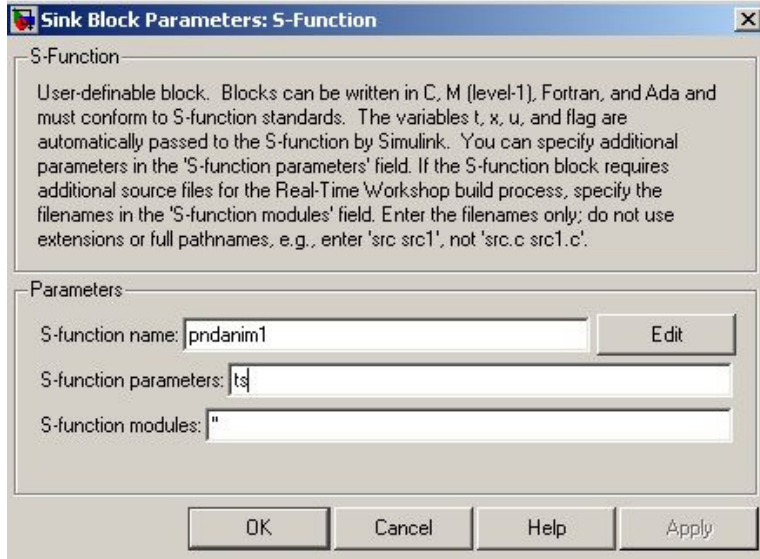


Simulink ortamında animasyon oluşturabilmek için EKB' de verilen pndanim1.m kodları kullanılmış ve aşağıdaki model oluşturulmuştur alt sistemde s-fonksiyonu bloğu kullanılmıştır.



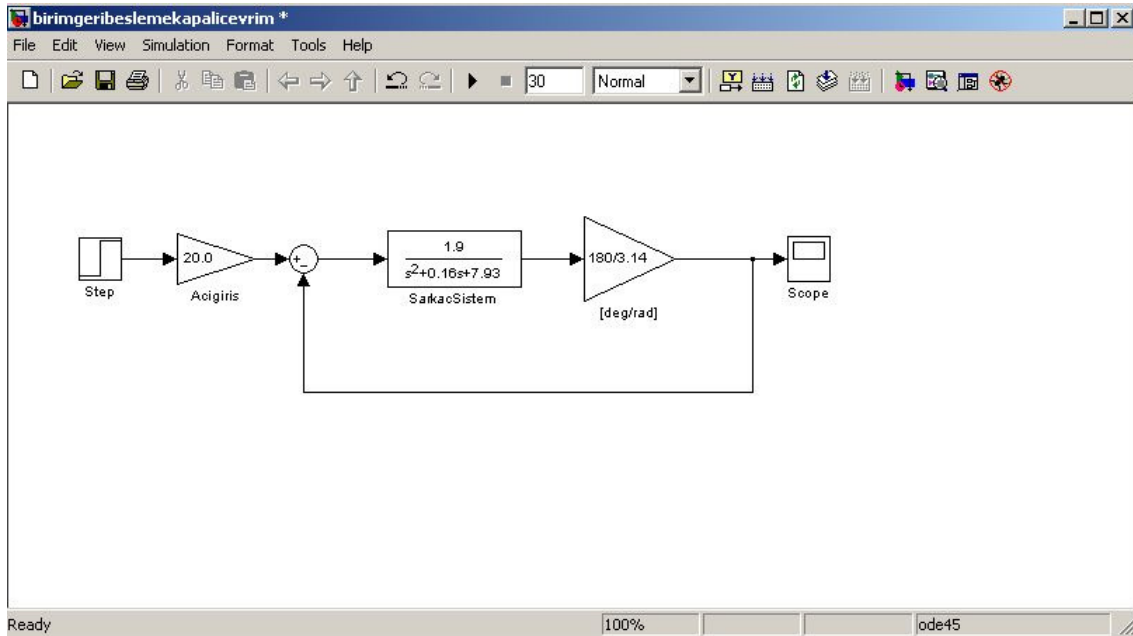
Şekil A.5. Animasyon modeli

S-Fonksiyon bloğunun parametreleri bölümüne pndanim1 yazılarak (Şekil A.6) alt sistem çıkışı silinmiş ve maskelenmiştir.

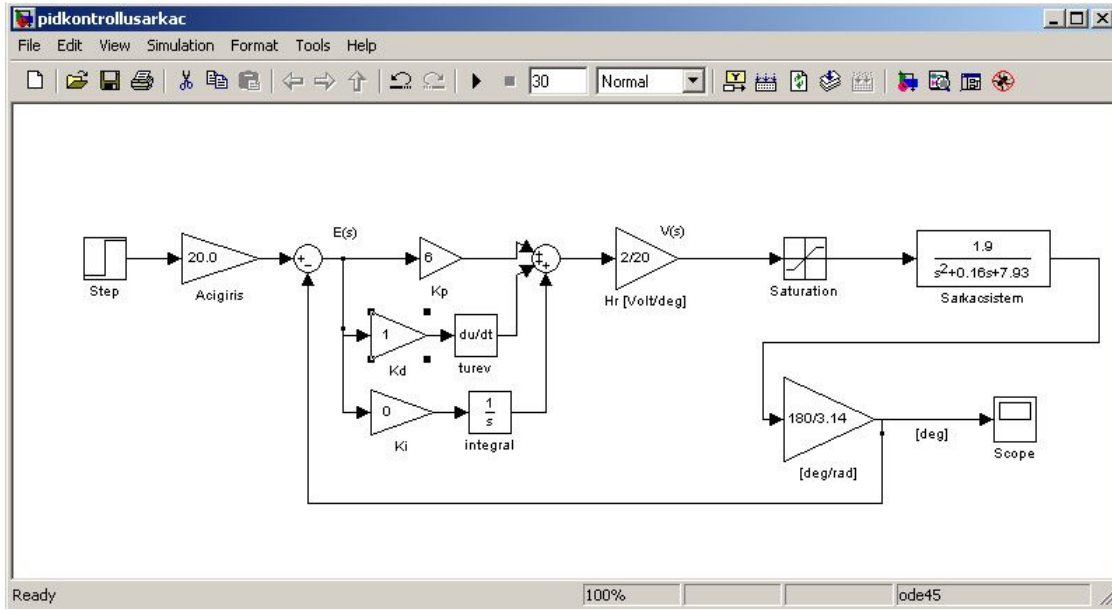


Şekil A.6. S-fonksiyon blok parametreleri giriş arayüzü

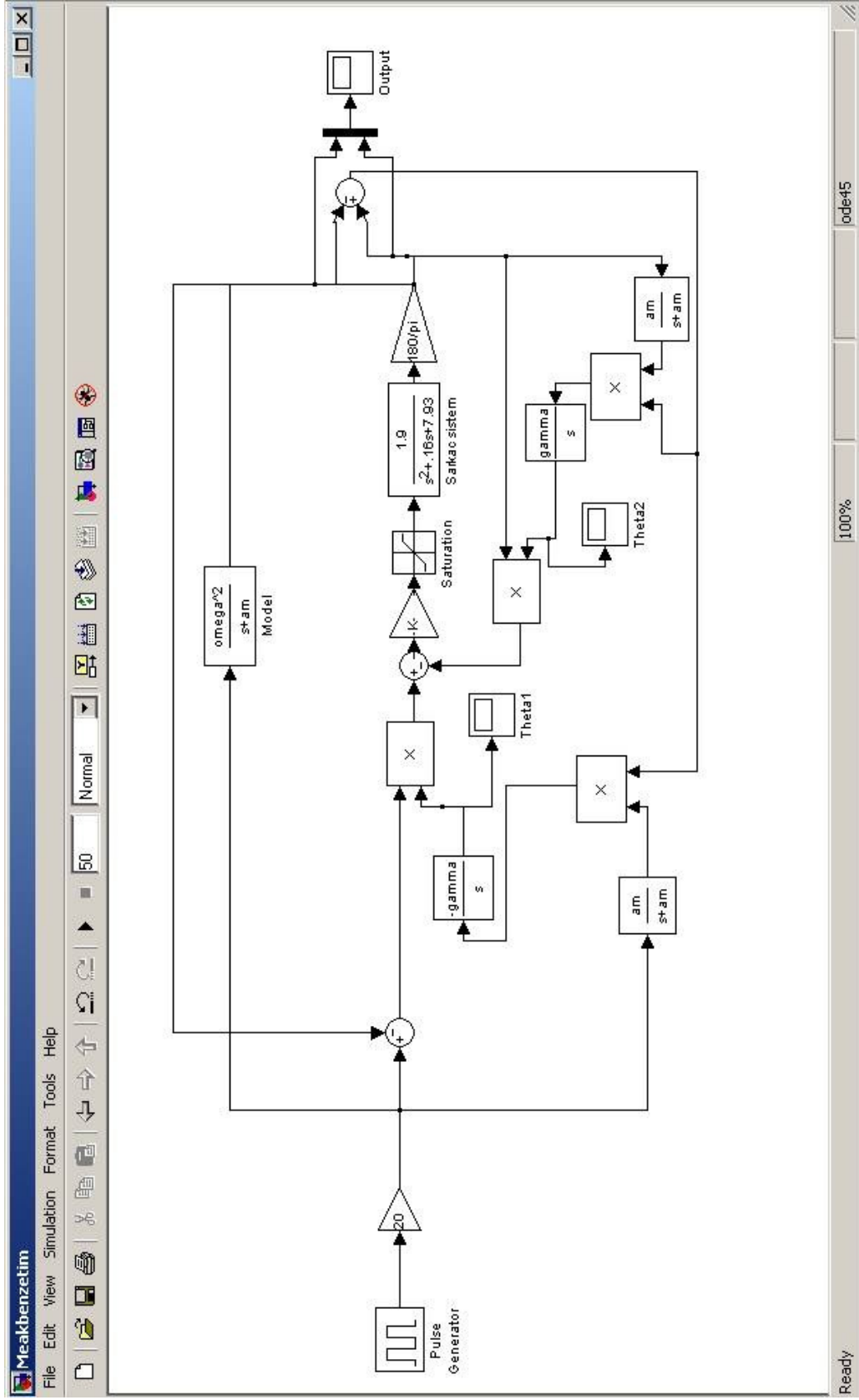
Benzetim ortamında oluşturulan model dosyaları Şekil A.7-A.11 olarak verilmektedir



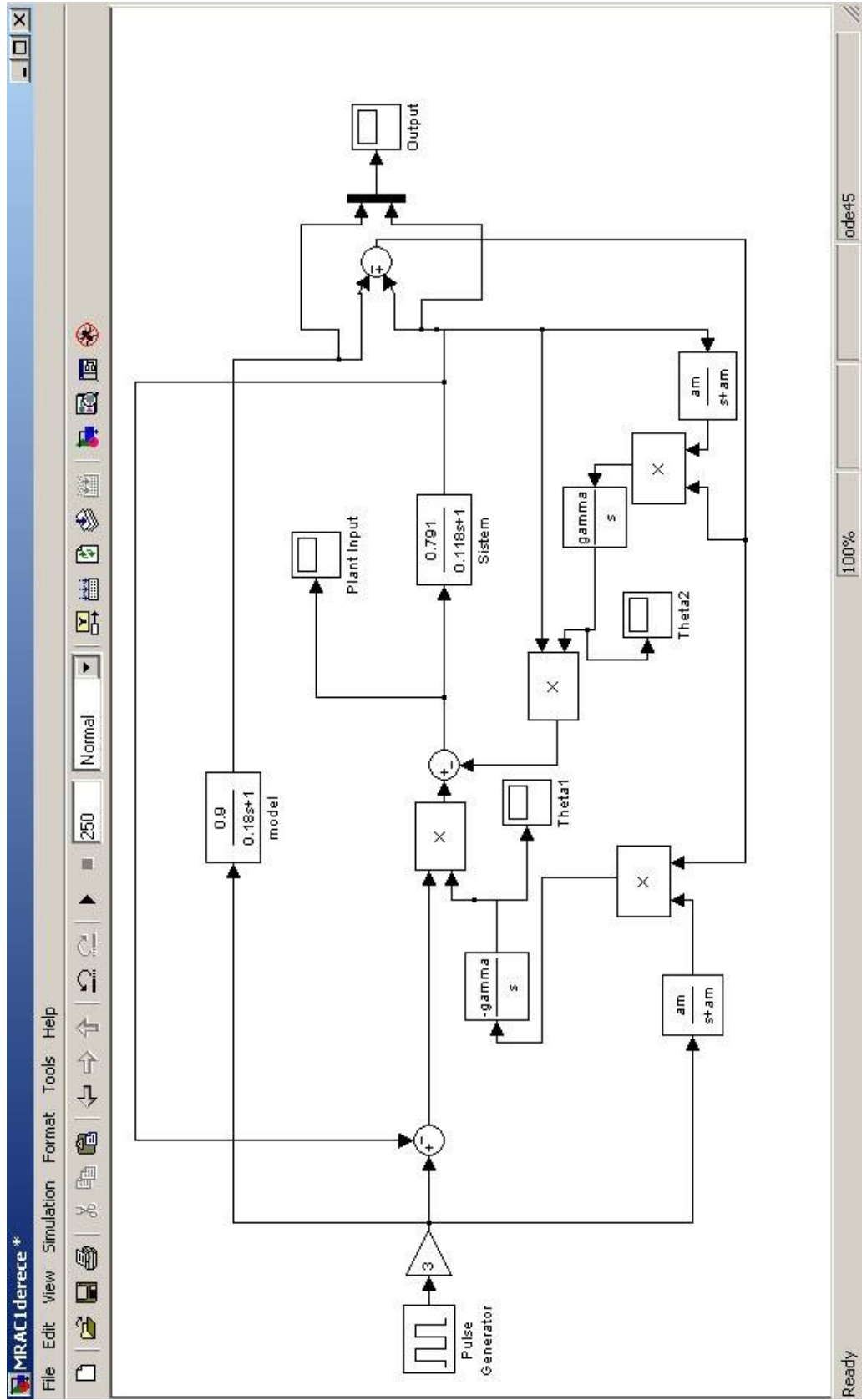
Şekil A.7. Kontrolörsüz geri beslemeli sistem modeli



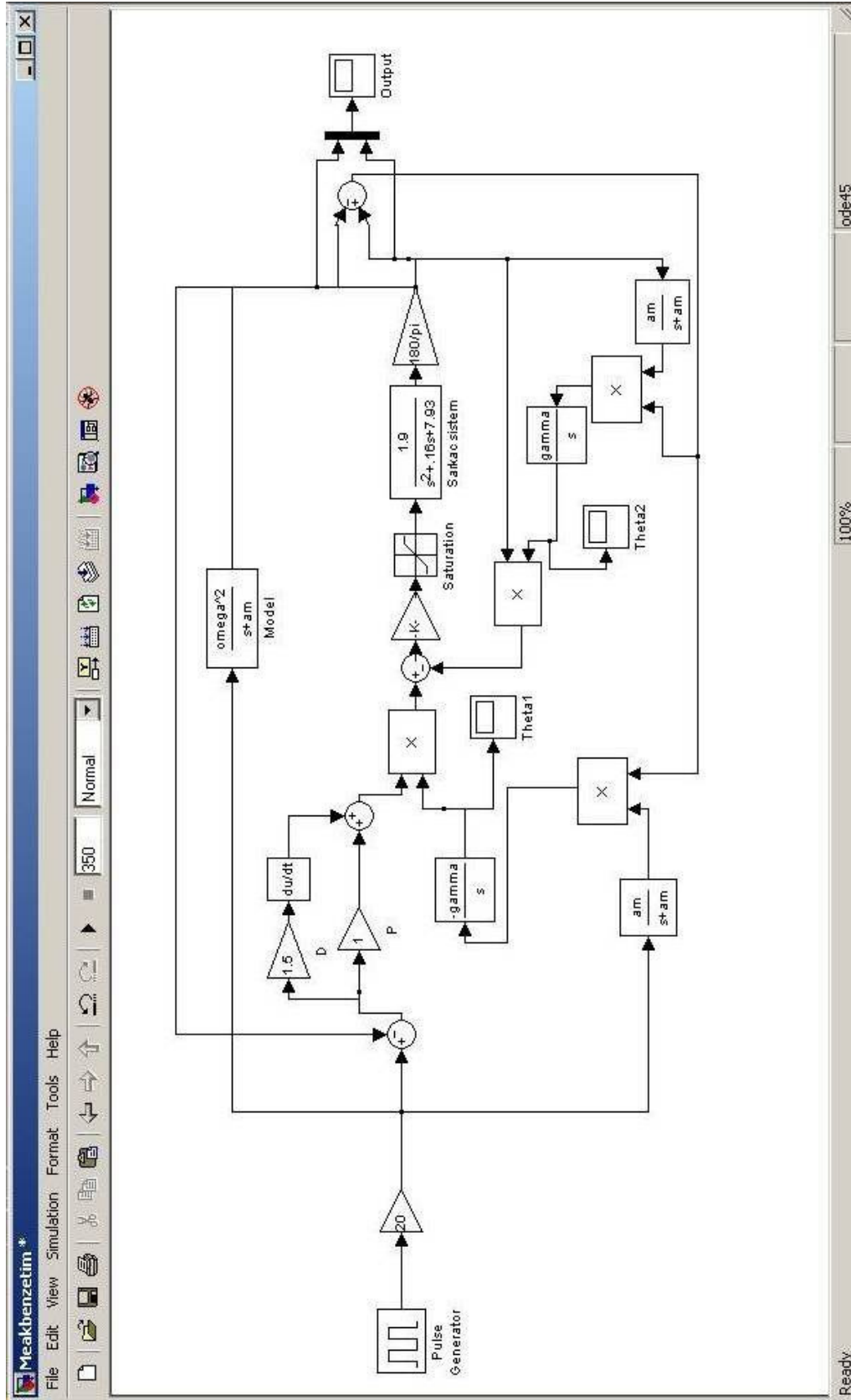
Şekil A.8. PID kontrolörlü sistem modeli



Şekil A.9. MEAK MIT sarkaç sistem modeli



Şekil A.10. MEAK MIT 1. dereceden sistem modeli



Şekil A.1.1. MEAK+PD MIT sarkaç sistem modeli

## EK B. Sarkaç Animasyonu Matlab s-fonksiyonu

```

function [sys,x0]=pndanim1(t,x,u,flag,ts);
global PendAnim1

if flag==2,
    if any(get(0,'Children')==PendAnim1),
        if strcmp(get(PendAnim1,'Name'),'simppend Animation'),
            set(0,'currentfigure',PendAnim1);
            hndlList=get(gca,'UserData');
            x=[u(1) u(1)+2*sin(u(2))];
            y=[0 -2*cos(u(2))];
            set(hndlList(1),'XData',x,'YData',y);
            set(hndlList(2),'XData',u(1),'YData',0);
            drawnow;
        end
    end
    sys=[];

elseif flag == 4 % Return next sample hit
    % ns stores the number of samples
    ns = t/ts;
    % This is the time of the next sample hit.
    sys = (1 + floor(ns + 1e-13*(1+ns)))*ts;

```

```
elseif flag==0,  
    animinit('simppend Animation');  
    [flag,PendAnim1] = figflag('simppend Animation');  
    axis([-3 3 -2 2]);  
    hold on;  
  
    x=[0 0];  
    y=[0 -2];  
    hndlList(1)=plot(x,y,'LineWidth',5,'EraseMode','background');  
    hndlList(2)=plot(0,0,'.','MarkerSize',25,'EraseMode','back');  
    set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1]);  
    set(gca,'UserData',hndlList);  
  
    sys=[0 0 0 2 0 0];  
    x0=[];  
  
end
```



## EK C. Kullanılan Parametreler İçin Matlab Dosyası

a)

```

%%%%%%%%%%%%%%Parametrelerim%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gamma=.1; %gama değeri
Ts = 3; %Model için belirlenen yerleşim süresi
z = .707; % Model için belirlenen sönüm oranı
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
omega=4/(Ts*z);
am=[2*z*omega omega^2]

```

b)

```

%%%%%%%%%%%%%%Parametrelerim%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gamma=.01; %gama değeri
Ts = 3; %Model için belirlenen yerleşim süresi
z = .707; % Model için belirlenen sönüm oranı
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
omega=4/(Ts*z);
am=[2*z*omega omega^2]

```

c)

%%%%%%%%%%%%Parametrelerim%%%%%%%%%%%%

clear all

clc

%%

gamma=.001; %gama değeri

Ts = 3; %Model için belirlenen yerleşim süresi

z = .707; % Model için belirlenen sönüm oranı

%%

omega=4/(Ts\*z);

am=[2\*z\*omega omega^2]

## **EK D. Labview Bilgileri**

Labview; bir program geliştirme aracıdır. Visual Basic, C, Delphi vb araçlardan farkı bu tür yazılımlarda satır satır kod yazmakla uğraşırken Labview size programlamayı grafiksel olarak yapmanıza imkân tanımaktadır. Grafiksel programlama kısaca “G programlama” olarak da adlandırılmaktadır. Grafiksel programlama blokların birbirlerine bağlanmasıyla çalışan bu yazılım aracında tek yapılması gereken kutuları taşıyıp algoritmayı kurmaktır.

Yazılımı eğlenceli bir şekilde öğrenmeyi de sağlayan Labview aynı zamanda gerek GPIB, VISA, SERI PORT, PARALEL PORT, SOUND gerekse kendi veri yakalama kartlarından (DAQ) veri alıp kontrol etmenize de yardımcı olmaktadır. Diğer yazılımlarda olduğu gibi Labviewde de yaptığınız algoritmayı koşturup, breakpoint noktaları koyup nerelerde hata yaptığınızı rahatlıkla görebilmekteyiz. Yani adım adım algoritmanızı kontrol etmemizi kolaylaştırmaktadır. Veri alma, veri işleme, analiz yapıp bunları görüntüleme, işlevlerinin yanında bunlardan bağımsız programlar yapma imkânı tanıyan Labview programlarınıza görsellik katarak kullanılabilirliğini arttırmaktadır.

Labview genel amaçlı programlama sistemidir, fakat özellikle cihaz kontrolleri ve data erişimi konusunda fonksiyon kütüphaneleri ve geliştirme araçları da mevcuttur. Labview programları Virtual Instruments (VI) (Sanal Cihaz) olarak adlandırılır. Çünkü gerek görünümleri gerekse işlevleri gerçek bir cihazın bilgisayar ortamında taklidinden ibarettir. Bir VI interaktif kullanıcı arayüzü, kaynak kodları içeren veri akış diyagramı ve yüksek seviye VI olarak adlandırılmalarını sağlayan simge bağlantıları içerir.

Bir VI yapısı şöyle özetlenebilir:

- İnteraktif Kullanıcı Arayüzü: Ön Panel (Front Panel)  
Oluşturacağımız sanal cihazın ön Panelinde, düğmeler, göstergeler, grafikler, kontrol tuşları, text girişleri, Nümerik girişler vb işlevleri yerine getirecek araçlar kullanılır.
- Oluşturulan VI'ı grafiksel programlamayı yapacağımız bölüm olan Blok Diyagramı kaynak kodları inceleyeceğimiz yer olacaktır.
- VI'lar modüler ve hiyerarşiktir. Mesela bir VI oluşturup diğer VI içinde kullanmamız mümkündür. İşte Ana VI içerisinde kullanılacak diğer VI dosyalar Sub VI olarak adlandırılır. İşte bu sub VI mantığı sayesinde modüler programlar geliştirip önceki programlarınıza rahatlıkla da ekleyebilirsiniz.

Çalışmamızda oluşturduğumuz ön paneller Şekil D.1, Şekil D.2 ve Şekil D.3 ve sistemin genel görünümü Şekil D.4 ile gösterilmektedir.

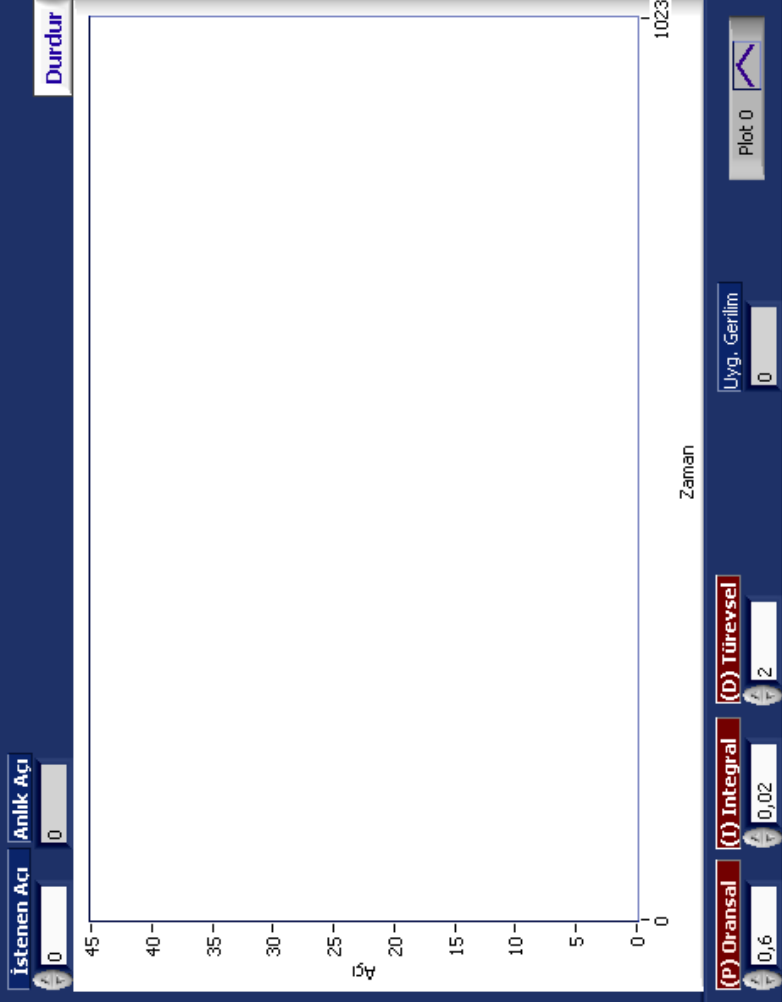
## ASILI SARKAÇ GERİ BESLEMELİ KONTROLÖRSÜZ SİSTEM CEVABI



Bu uygulama Advantech 1710HG DAQ kartı ile yapılmıştır. Bu kart sürücülere olmaksızın yazılım çalışmayacaktır. DAQ IN ve OUT kanalları D10 ve A00 olarak kullanılmaktadır.  
2007 - Ahmet Küçükler

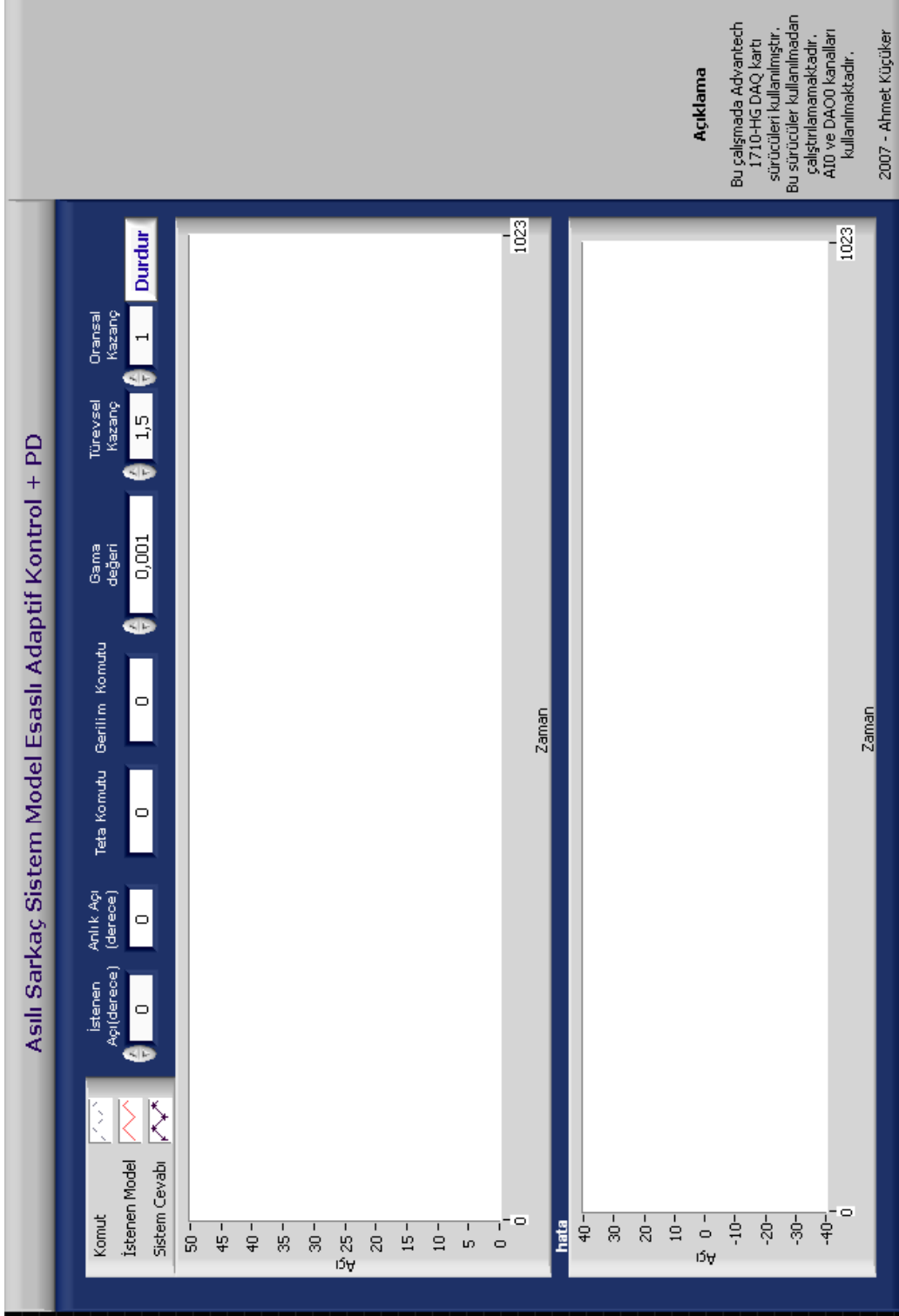
Şekil D.1. Geri beslemeli kontrolörsüz sistem ön panel

## ASILI SARKAÇ SİSTEM PID KONTROL

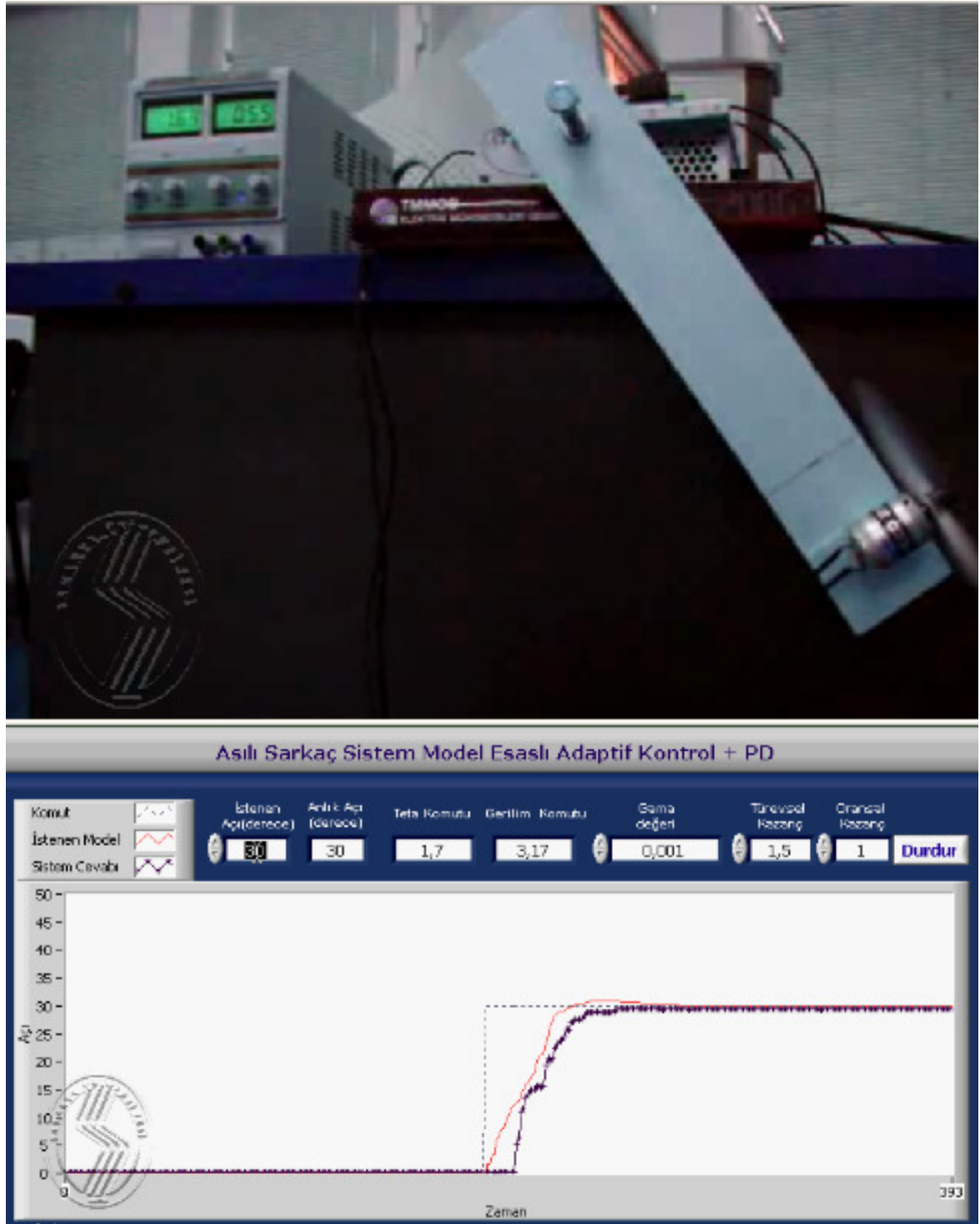


Bu uygulama Advantech 1710HG DAQ kartı ile yapılmıştır. Bu kart sürücülerini olmaksızın yazılım çalışmayacaktır. DAQ IN ve OUT kanalları D10 VE A00 olarak kullanılmaktadır.  
2007 - Ahmet Küçüker

Şekil D.2. PID kontrol ön paneli



Şekil D.3. MEAK ve MEAK+PD kontrol ön paneli



Şekil D.4. Sistemin genel görüntüsü



## ÖZGEÇMİŞ

1982'de Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2000 yılında Anadolu Lisesinden mezun olarak web tasarım kurslarına katıldı. 2001 yılında Sakarya Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. Aynı yılın yaz döneminde kişisel ve kurumsal web tasarımları hazırladı. 2002-2003 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezi Donanım Bölümünde part-time çalıştı. 2003 yılı yaz döneminde Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri Elektrik Bölümünde staj yaptı. 2004 yılında M.E.B onaylı Bilgisayar Programcılığı Sertifikası aldı. 2004 yılında mikrodenetleyici kursuna katılarak C programlama dili ile mikrodenetleyici kontrolü alanında birçok uygulamalarda bulundu. Yine aynı yaz döneminde ASELSAN'da yaptığı stajda G-programlama dili üzerine çalıştı. GPIB (General Purpose Interface Bus) bağlantısına sahip cihazların bilgisayardan kontrolünü ve birbirleriyle iletişimini sağladı. 2005 yılında DC motor konum kontrol kartları ve hız kontrol kartları üzerine tasarım çalışması ve Microdenetleyicili PID kontrollü Fırın tasarımı üzerine bitirme çalışmasıyla lisans öğrenimini tamamladı. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve bu göreve halen devam etmektedir.