

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**DOĞRUSAL OLMAYAN TEK BOYUTLU MANYETİK  
LEVİTASYON SİSTEMİNİN MODEL TABANLI KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUHAMMET EMRE SANCİ**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2016**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**



**DOĞRUSAL OLMAYAN TEK BOYUTLU MANYETİK  
LEVİTASYON SİSTEMİNİN MODEL TABANLI KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUHAMMET EMRE SANCI**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2016**


## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Muhammet Emre Sancı** tarafından hazırlanan “**Doğrusal Olmayan Tek Boyutlu Manyetik Levitasyon Sisteminin Model Tabanlı Kontrolü**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12.07.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

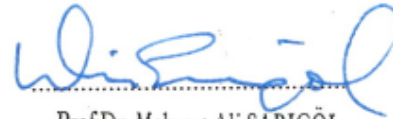
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof Dr.Serdar İplikçi  
Pamukkale Üniversitesi  
Üye  
Yrd.Doç.Dr Selami Beyhan  
Pamukkale Üniversitesi  
Üye  
Yrd.Doç.Dr .Savaş Şahin  
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03.08.2016. tarih ve 28/21.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof.Dr. Mehmet Ali SARIGÖL

MÜDÜR

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

MUHAMMET EMRE SANCI



## ÖZET

**DOĞRUSAL OLMAYAN TEK BOYUTLU  
MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMİNİN  
MODEL TABANLI KONTROLÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MUHAMMET EMRE SANCI  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
(TEZ DANIŞMANI:PROF.DR SERDAR İPLİKÇİ)**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2016**

Sürtünmesiz yataklar, manyetik alanla çalışan yüksek hızlı yolcu trenleri, maglev asansörler, rüzgâr tüneli kalıplarının kaldırılması,indüksiyon fırınların dökme metallerinin kaldırılması gibi bir çok mühendislik uygulaması günümüzün manyetik levitasyon sistemlerinin örnekleridir.

Bu tez çalışmasında bu tür bir sistemin temel ve basit bir tasarımına ait benzetim ,uygulama ve modelleme çalışmaları,sistemin teorik modellemesi sistematik olarak anlatılmış, MATLAB® Simulink paket programı ile modellenerek sistem için gerekli parametreler sunulmuştur. Küre şeklinde kalıcı mıknatıs bu amaçla elektromıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alan ile kontrol edilmektedir. Bu kontrolün amacı yer çekimi, elektromıknatıs akımı ve bozucu etkenlere karşı kalıcı küre mıknatısın kararlı bir durumda askıda havada tutulmasıdır.

Askıda tutulan küre mıknatısın düşey pozisyonu doğrusal bir hall etkisi algılayıcısı kullanılarak ölçülmüştür. Doğrusal olmayan bir sistem olan maglev sistemi bu nedenle uygun bir çalışma noktası için lineerleştirilmiş ve giriş sinyallerindeki küçük değişimleri izlemesi için parametreleri iyi ayarlanmış PID kontrolör, Lineer olmayan Kayan Kip Kontrolör ve Lineer Olmayan Gözetleyici Tabanlı Durum geri Beslemeli Kontrolör tasarlanmış ve deney sonuçları incelenmiştir. HILINK:Kontrol ve benzetim kartına Matlab/Simulink kullanılarak yüklenen bu kontrolörler ile küre mıknatıs, elektromıknatıs akımı ile kararlı bir şekilde askıda tutulmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER:Manyetik Levitasyon,  
Model Tabanlı Kontrol,Manyetik Askı sistemi**

## **ABSTRACT**

### **MODEL BASED CONTROL OF NON LINEAR ONE DIMENSIONAL MAGNETIC LEVITATION SYSTEM**

**MSC THESIS**

**MUHAMMET EMRE SANCI**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF.DR.SERDAR IPLIKÇI)**

**DENİZLİ, JULY 2016**

Anti-fiction bearings, magnetic field, running high-speed passenger trains, maglev elevators, removal of wind tunnel mold, many engineering applications, such as the lifting up of metal cast of induction furnaces are examples of magnetic levitation system for today.

In this study the foundations of such a system and the simulation of a simple design, implementation and modeling studies, theoretical modeling of the system is described systematically with the usage of MATLAB by modeling systems with Simulink software package. A spherical permanent magnet is controlled by the magnetic field produced by the electromagnet for this purpose. The purpose of this control holding sphere of the permanent magnet in the air against gravity, electromagnetic current and various disturbance effects in a stable situation.

Vertical position of the air suspended magnet sphere was measured using a linear Hall effect sensor. Maglev system which is a non-linear system, for a linearized suitable working point and with the well-tuned parameters PID controller with the purpose of tracking small variations in the input signal, Nonlinear Sliding Mode Controller and Nonlinear Observer-based state feedback controller is designed and test results were analyzed.

**KEYWORDS: Magnetic Levitation, Model Based Control, Maglev Systems**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ABSTRACT .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
TABLO LİSTESİ .....	viii
SEMBOL LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	x
<b>1. Giriş .....</b>	<b>1</b>
1.1 Manyetik Askı Sisteminin Kullanım Alanları .....	2
1.1.1 Manyetik Yataklar .....	2
1.1.1.1 Pasif Manyetik Yataklar .....	3
1.1.1.2 Aktif Manyetik Yataklar .....	3
1.1.2 Yarı iletken Levha Taşımacılığı .....	4
1.1.3 Fotolitografi .....	4
1.1.4 Teleoperasyon .....	5
1.1.5 Rüzgar Tuneli .....	6
1.1.6 Rüzgar Türbini .....	7
1.1.7 Maglev Trenleri .....	8
1.1.7.1 Elektromanyetik süspansiyon sistemi (EMS) .....	9
1.1.7.2 Elektrodinamik süspansiyon sistemi (EDS).....	9
<b>2. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ .....</b>	<b>11</b>
2.1 Doğrusal Ve Doğrusal olmayan sistemler .....	11
2.1.1 Doğrusal Sistemler.....	11
2.1.2 Doğrusal Olmayan Sistemler .....	11
2.2 Klasik Ve Modern Kontrol.....	11
2.2.1 Klasik Kontrol.....	12
2.2.1.1 PID (Orantı-İntegral-Türev)Kontrol .....	12
2.2.2 Modern Kontrol .....	13
2.2.2.1 Kayan Kipli Kontrol.....	14
2.2.2.2 Durum Gözetleyici Kontrol.....	15
2.3 Manyetik Askı Sisteminin Doğrusal Olmayan Durum Denklemleri .	17
2.4 Manyetik Askı Sisteminin Doğrusallaştırmış Durum Denklemleri ..	20
2.5 Manyetik Askı Sisteminin Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı .....	24
2.6 Manyetik Askı Sisteminin PID Kontrolü .....	26
2.7 Manyetik Askı Sisteminin Durum Gözetleyici Tabanlı Kontrolü.....	31
<b>3. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN ELEKTROMEKANİK YAPISI ....</b>	<b>36</b>
3.1 Elektromıknatıs .....	37
3.2 Manyetik Küre.....	39
3.3 HILINK:Gerçek Zamanlı Matlab/Simulink Donanımına Benzetim .....	40
Kontrol Kartı .....	40
3.4 Hall Etkisi Algılayıcısı .....	41
<b>4. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN VE UYGULANAN KONTROL</b>	
<b>METODLARININ BENZETİMİ .....</b>	<b>44</b>
4.1 Manyetik Askı Sistemi Benzetim Çalışması .....	46
4.2 Manyetik Askı Sistemi PID Benzetim Çalışması.....	47

4.3	Manyetik Askı Sistemi Kayan Kipli Kontrol Benzetim Çalışması....	48
4.4	Manyetik Askı Sistemi Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol Benzetim Çalışması .....	50
<b>5.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>52</b>
5.1	MANYETİK ASKI SİSTEMİNE UYGULANAN KONTROL METOTLARININ SONUÇLARI.....	52
5.1.1	Manyetik Askı Sistemi PID Çalışmaları Sonuçları .....	52
5.1.2	Manyetik Askı Sistemi Kayan Kipli Kontrol Çalışmaları Sonuçları .....	56
5.1.3	Manyetik Askı Sistemi Durum Geribeslemeli Gözetleyici Temelli Kontrol Çalışmaları sonuçları.....	62
<b>6.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>67</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>70</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1:Pasif manyetik yatak uygulaması.....	3
Şekil 1.2: Bir rotorun aktif elektromanyetik yatak uygulamasının prensip şekli.	4
Şekil 1.3.:Fotolitografi çalışma prensibi. ....	5
Şekil 1.4:İki serbestlik dereceli Manyetik Teleoperasyon Sistemi .....	6
Şekil 1.5: Manyetik Teleoperasyon Sisteminin çalışma şekli.....	6
Şekil 1.6: Tohoku University 0.3 m Manyetik Rüzgar Tüneli(solda)ve NASA Langley Manyetik Rüzgar Tuneli(sağda).....	6
Şekil 1.7:Manyetik Askılı Rüzgar Türbini Yapısı .....	7
Şekil 1.8:1 kW manyetik askılı rüzgar türbini .....	8
Şekil 1.9:Magnetik Levitasyon Yöntemli Trenler.....	9
Şekil 1.10:Şangayda işletmede olan bir maglev treni .....	10
Şekil 1.11:EDS maglev treninin çalışma prensibi detaylı gösterim.....	10
Şekil 2.1: PID kontrolör Blok diyagramı .....	12
Şekil 2.2:Kayma yüzeyi ve Çatırtı.....	14
Şekil 2.3:Kayan Kipli Kontrolör Blok Diyagramı.....	15
Şekil 2.4:Durum Gözlemleyici Kontrolör Blok Diyagramı .....	17
Şekil 2.5:Manyetik Levitasyon Sistemin Elektriksel Modeli. ....	18
Şekil 3.1:Zeltom Manyetik Levitasyon sistemi ve Manyetik Küre.....	33
Şekil 3.2: Elektromıknatısta Akıma Bağlı Kutup ve Alan Çizgileri.....	34
Şekil 3.3:Tez Çalışmasında Kullanılan Zeltom Manyetik LevitasyonSistemi Elektromıknatısı.....	35
Şekil 3.4:Tez çalışmasında kullanılan neodyum mıknatıs küre .....	36
Şekil 3.5:HILINK Gerçek Zamanlı Matlab/Simulink BenzetimKontrolKartı..	37
Şekil 3.6: Hall Etkisi Algılayıcıda Manyetik Alana Bağlı Gerilim Oluşumu.....	38
Şekil 3.7:Günlük yaşamda kullanılan bir hall etkisi sensörü(TLE4905L).....	39
Şekil 4. 1:Manyetik Askı Sistemi Matlab/Simulink Benzetimi.....	45
Şekil 4.2:Kontrol Metodu uygulanmamış Maglev Sistemi Konum Değişimi Grafığı .....	46
Şekil 4.3:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi.....	47
Şekil 4.4:Manyetik Askı Sistemi Durum Uzay Modeli ile PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi .....	47
Şekil 4.5:Bölüm 2.2.2.2’de modellenen Kayan Kip Kontrolör Simulink benzetimi.....	48
Şekil 4.6:Anahtarlama Yüzeyi(Switching Surface)Benzetimi.....	48
Şekil 4.7: Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol için Manyetik Levitasyon Sistemi Benzetimi.....	49
Şekil 4.8: Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol Benzetimi. ....	49
Şekil 4.9: Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol Benzetimi.....	50
Şekil 5.1:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi Konum Değişimi Grafığı(h=20mm). ....	52
Şekil 5.2:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi İvme DeğişimiGrafığı(h=20mm).....	52
Şekil 5.3:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi Akım Değişimi Grafığı(h=20mm). ....	53

Şekil 5.4:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulaması Konum Değişimi Grafiği(h=20mm).....	54
Şekil 5.5:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulaması İvme Değişimi Grafiği(h=20mm).....	54
Şekil 5.6:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulaması Akım Değişimi Grafiği(h=20mm).)	54
Şekil 5.7: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için sistem uygulaması yakınlaştırılmış $z_1$ (konum) değişim grafiği .....	55
Şekil 5.8: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için sistem Uygulaması $z_1$ (konum) değişim grafiği.....	56
Şekil 5.9: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_1$ (konum)değişim grafiği. ....	56
Şekil 5.10: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için Sistem uygulaması yakınlaştırılmış $z_2$ (ivme) değişim grafiği.....	56
Şekil 5.11: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için Sistem uygulaması yakınlaştırılmış $z_2$ (ivme) değişim grafiği.....	57
Şekil 5.12: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_2$ (ivme)değişim grafiği.....	57
Şekil 5.13: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için sistem uygulaması yakınlaştırılmış $z_3$ (akım)değişim grafiği.....	57
Şekil 5.14: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için sistem uygulaması $z_3$ (akım)değişim grafiği.....	58
Şekil 5.15: $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_3$ (akım)değişim grafiği.....	58
Şekil 5.16: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için yakınlaştırılmış için sistem uygulaması $z_1$ (konum) değişim grafiği.....	58
Şekil 5.17: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için sistem uygulaması $z_1$ (konum) değişim grafiği.....	59
Şekil 5.18: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_1$ (konum)değişim grafiği.....	59
Şekil 5.19: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için sistem uygulaması yakınlaştırılmış $z_2$ (ivme) değişim grafiği.....	59
Şekil 5.20: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için sistem uygulaması $z_2$ (ivme) değişim grafiği.....	60
Şekil 5.21: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_2$ (ivme)değişim grafiği.....	60
Şekil 5.22: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için yakınlaştırılmış $z_3$ (akım)değişim grafiği... ..	60
Şekil 5.23: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için sistem uygulaması $z_3$ (akım) değişim grafiği.....	61
Şekil 5.24: $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$ Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon $z_3$ (konum)değişim grafiği.i.....	61
Şekil 5.25: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması yakınlaştırılmış konum değişim grafiği.....	62
Şekil 5.26: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması konum değişim grafiği.....	62
Şekil 5.27: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi Matlab/Simulink simülasyon uygulaması konum değişim grafiği.....	63

Şekil 5.28: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması ivme değişim grafiği. ....	63
Şekil 5.29: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması ivme değişim grafiği .....	63
Şekil 5.30: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi Matlab/Simulink simulasyon uygulaması ivme değişim grafiği.....	64
Şekil 5.31: Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi uygulaması akım değişim grafiği.....	64
Şekil 5.32::Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması akım değişim grafiği.....	64
Şekil 5.33::Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem Matlab/Simulink simulasyon uygulaması akım değişim grafiği.....	65

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Sistem Parametreleri ve Cevabına PID Katsayıları.....	13
Tablo 4.1: Magnetik Levitasyon Sistemi Benzetiminde Kullanılan Parametre değerleri.....	40

## SEMBOL LİSTESİ

$u_e$	:	Küreyi dengede tutmak için gerekli bobin gerilimi
$R$	:	Bobin Direnci
$F$	:	Çekim kuvveti
$i(t)$	:	Elektromıknatıstan akan bobin akımı
$h(t)$	:	Küre ile elektromıknatıs arasındaki mesafe
$U(t)$	:	Uygulanan kaynak gerilimi
$m$	:	Kürenin kütlesi
$g$	:	Yerçekimi ivmesi
$L$	:	Bobin endüktansı
$K$	:	Elektromıknatıs katsayısı
$x_1(t)$	:	Konum
$x_2(t)$	:	Hız
$x_3(t)$	:	Akım
$K_p$	:	Oransal kazanç
$K_i$	:	İntegral kazanç
$K_D$	:	Türev kazanç
$u(t)$	:	Kontrol İşareti
$L_g$	:	Gözetleyici Kazancı
$\rho(z,u)$	:	Girişe bağlı anahtarlama yüzeyi
$\hat{x}$	:	Gözetleyicinin durum vektörü
$\hat{y}$	:	Sistemin tahmin edilen çıkışı
$O$	:	Gözlemlenebilirlik matrisi
$S$	:	Sistemin durum uzay gösterilimi kontrol edilebilirlik matrisi
$\Phi_o(s)$	:	Gözetleyicinin karakteristik polinomu
$\bar{S}$	:	Sistemin kontroledilebilirkanonik form kontrol edilebilirlik matrisi
$\Phi(s)$	:	sisteminin karakteristik polinomu
$\Phi_d(s)$	:	Kapalı çevrim sisteminin istenilen karakteristik polinomu
$e$	:	Gözetleme hatası
$C_o$	:	kontrol edilebilirlik matrisi
$\Sigma$	:	Sistem
$w_n$	:	Doğal Frekans
$\zeta$	:	Sönümlenme Oranı
$J$	:	Maliyet Fonksiyonu

## ÖNSÖZ

Uzun ve zorlu bir süreç olan eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Prof.Dr. Serdar İplikçi ve her zaman yanımda olan, sevgi ve desteğini üzerimden esirgemeyerek bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan annem Nesrin ve babam Suat'a tüm kalbimle sevgi, saygı ve minnetlerimi sunarım.

## 1. Giriş

Dünyanın geçmişten bugüne değişmeyen yegane kanunu olan yer çekimi kanuna göre serbest bırakılan cisimler en kısa sürede bu kanun gereği oluşan kuvvet sonucu yere düşer, bu kuvvet yerçekimi kuvvetidir ve yatay olarak hareket eden cisimlere dik olarak etki ederek bir sürtünme kuvvetinin doğmasına sebep olur. Bir çok bilim alanında olduğu gibi Kontrol Biliminde de karşılaşılan temel sorunlardan biri sürtünme ve vantilasyon sonucu meydana gelen ve sistemin çalışma performansını düşüren kayıplardır. Günümüzde, süper iletken teknolojisi bu gibi kayıpları en aza indirmek için kullanılan geliştirilmiş etkili teknolojidir, kullanışlı olan bu teknoloji buna rağmen oldukça maliyetlidir. Bundan dolayı, yüksek performanslı ve daha düşük maliyetli sistem arayışı doğmuştur ve bunun sonucunda manyetik levitasyon (maglev) sistemlerinin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır.

Herhangi ferromanyetik nesneyi veya ferromanyetik nesne ile birleştirilmiş herhangi bir objeyi desteksiz yardımsız olarak elektro mıknatıslarla manyetik alanlar oluşturup bu manyetik alanları kullanarak, mekanik temas olmadansankide sürtünme yokmuş gibidenilebilecek şekilde temassız biçimde havada askıya almaya, dengede tutmayı sağlayan sistemler manyetik askı sistemleridir. Yerçekimi etkisine karşı manyetik alanlar bu sistemlerde kullanılmaktadır. Bir elektromıknatıs tarafından yerçekimine karşı elektro manyetik alan oluşturarak bu alan yardımıyla elektromanyetik askı sistemi (MAS) yerçekimine karşı çekme kuvvetine göre manyetik süspansiyon sistemi (MSS) ve itme kuvvetine göre manyetik levitasyon sistemi (MLS) olarak adlandırılırlar (Jayawant, B, 1981).

Ferromanyetik cismi kendisine çeken bir elektromıknatıs içeren maglev sistemlerinin çalışma yöntemi, cisim ile mıknatıs arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı çekim kuvveti oluşturan manyetik alanın, cismi elektromıknatısın demir çekirdeğine yapıştırmadan hemen önce bobinin yüklenmesini kesip veya cisim düşüşteyken bobini tekrar yükleyip cismin dengede kalmasını sağlamaktır yani geri beslemesiz bir düzen ile ferromanyetik özellikli nesne denge noktasından aşağıda kalırsa, aşağıya düşecek, yukarıya kaçarsa elektromıknatısa yapışacaktır,

dengedeysen en ufak bir bozucu etki geldiğinde de denge noktasından uzaklaşacaktır bu davranıştaki sistem kararsızdır. Bundan ötürü cismi el ile denge noktasında tutmak imkansızdır bu amacı gerçekleştirmek için bobininyüklenip, yüklenmeyeceğine karar verebilecek bir kontrolsistemi kullanılmalıdır. Ancak sistemdeki doğrusal olmayan dinamikler dolayısıyla sistemi matematiksel olarak modelleyen karmaşık diferansiyeldenklemlerle etkin bir kontrol sistemi geliştirebilmek için bu sistemlerin çeşitli çalışma noktalarında doğrusallaştırılarak , geri beslemeli kontrolörlerin bu modelleredayanarak gerçekleştirilmesi sıklıkla uygulanan bir yöntem olmuştur.

İşte, havada serbest halde bırakılan cismi dikeyde temassız askıda tutabilen maglev sistemleri gün geçtikçe daha çok dikkat çeker hale gelerek ve kendisine endüstride Manyetik askı sistemleri sürtünmesiz dişli yatağı, tasarımı, titreşim izolasyonlu masa tasarımı ,manyetik olarak askıda kalan rüzgâr türbinleri, çipüretim tezgahlarının kontrolü amacıyla geliştirilmiş hızlı ve hassas konumlandırma sistemleri ve hızlı tren tasarımı gibi bir çok uygulama alanı bulmuştur. Bugüne baktığımızda manyetik askı sistemleri halen inanılmaz bir hızla gelişmekte olup insanlığa ve doğaya bir çok katkı sağlamaya devam etmektedir. Ayrıca, süper iletkenler ile ilgili gelişmelerle de yeni ürünlerin geliştirilmesi büyük bir ivme kazanmasıyla devam etmektedir.

## **1.1 Manyetik Askı Sisteminin Kullanım Alanları**

### **1.1.1 Manyetik Yataklar**

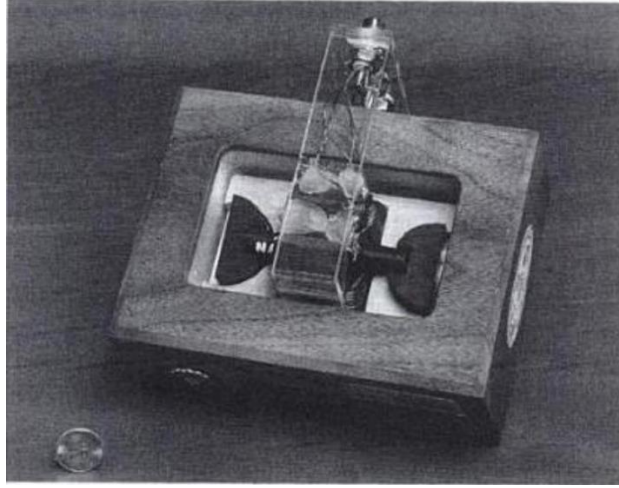
Manyetik yatak; metal bir mil sisteminin manyetik alan içinde, boşlukta asılı durumdayken serbest bir şekilde yatay veya dikey eksenleriboyunca dönebildiği ferromanyetik mil sistemidir. Yataklarda meydana gelen manyetik etkiler, sistemdeki stator ile sürekli olarak etki alınarak milin boşluk içerisinde merkezde kalması ve radyal olarak havada askıda kalması sağlanmaktadır. Stator mili manyetik olarak çekme ve itmesi sonucu oluşan elektromanyetik alanın düzenlenmesini ve döngüyü sağlayan elektronik servo devresi kapalı olsa dahi milin normal durumda eksen olarak dengede kalmasını sağlayabilmektedir. Mekaniksel sürtünme ve yağlanmaya olmamasından dolayı, sessiz çalışma ve temizlik gibi çeşitli avantajlara



sahiptirler. Manyetik yatakların ömürleri uzun olduğu için ekipmanlarda aşırı tasarruf sağlanmasına neden olur. (Sambaş ve Güllü, 2006)

### 1.1.1.1 Pasif Manyetik Yataklar

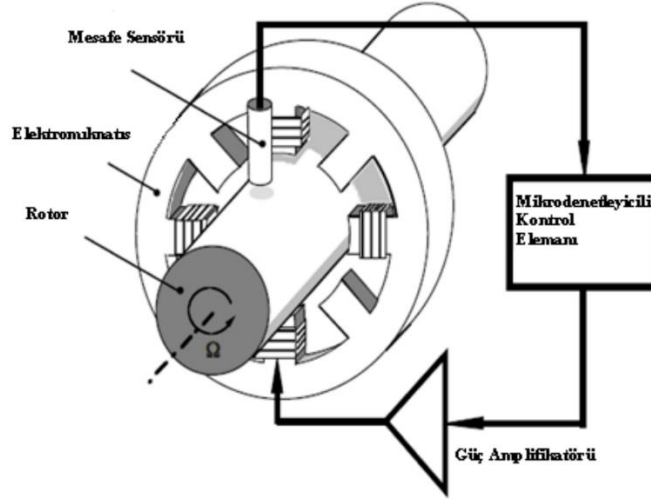
Birbirini etkileyen iki manyetik parçadan oluşur. Manyetik yatağı oluşturan parçalar kalıcı mıknatıs olup sabit veya hareketli olabilirler. Pasif manyetik yatakları oluşturmada kullanılan mıknatısları çeşitli geometrik şekillerde yapmak mümkündür (Sambaş ve Güllü, 2006).



**Şekil 1.1:** Pasif manyetik yatak uygulaması,  $YBa_2Cu_3O_7$ (50.000-120.000 rpm).

### 1.1.1.2 Aktif Manyetik Yataklar

Rotoru hiçbir mekanik temas olmaksızın manyetik olarak asılı duran ve bu nedenle çok az bir kaybı olan, yüksek devirli hızlardakullanılabilen, yağlanması gerekmeyen, fazla bakım gerektirmeyen ve yüksek güvenilirlik oranı olan, elektromıknatıslarla oluşturulan manyetik düzenlere aktif manyetik yatak denir. Aktif manyetik yataklarda stator sabit bir elektromıknatıstan ibarettir. Statorun yapısı bir elektrik motorunun statoruna benzerdir(Sarı, 2006).



**Şekil 1.2:** Bir rotorun aktif elektromanyetik yatak uygulamasının prensip şekli.

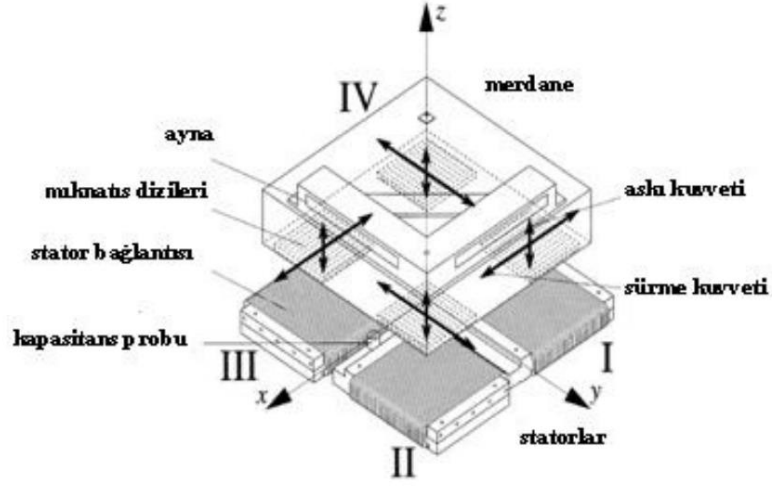
### 1.1.2 Yarı iletken Levha Taşımacılığı

Manyetik askı sistemleri tozsuz bulundurmaları ve temassız olması sayesinde üretim esnasında yarıiletken levhaların taşınması için idealdirler. Dış kaynaktan aktarılan manyetik enerji sayesinde taşıyıcı platform doğrusal olarak temassız hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sistemde iki adet havada taşıyıcı, iki adet askıda tutan elektromanyetizma ve bir adet itici mevcuttur (Shameli, 2008).

### 1.1.3 Fotolitografi

Manyetik askı sistemi, fotolitografi basamaklarında kullanım içinde uygundur. İşlem aşamaları boyunca manyetik askı sistemi, normal bir düzlemde küçük yer değiştirmeler sağlamak üzere küçük dönüşler ve küçük adımlar ile ilerlemeyi sağlar.

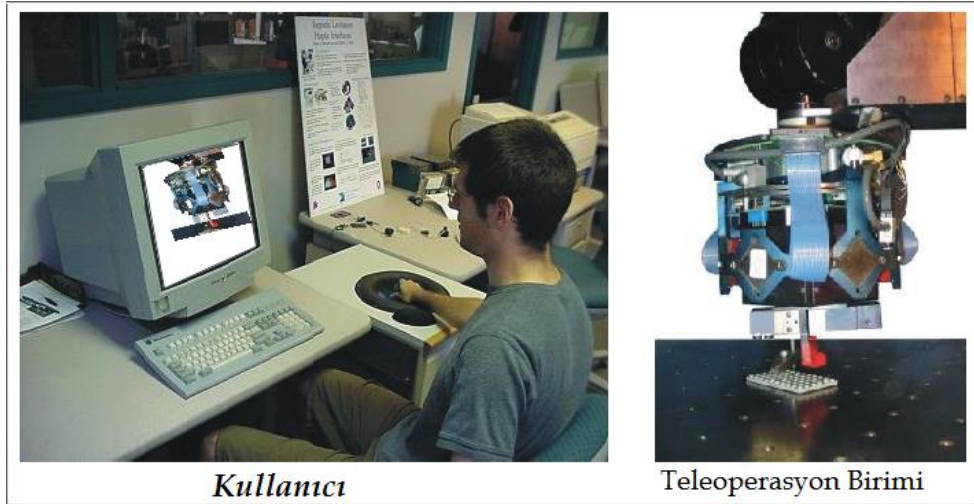
Şekil 1.3'te 50(mm) x 50(mm)'ye 2D düzleminde manyetik askı sistemi ile yüksek hassasiyet baskı işlemi yapılmıştır (Shameli, 2006).



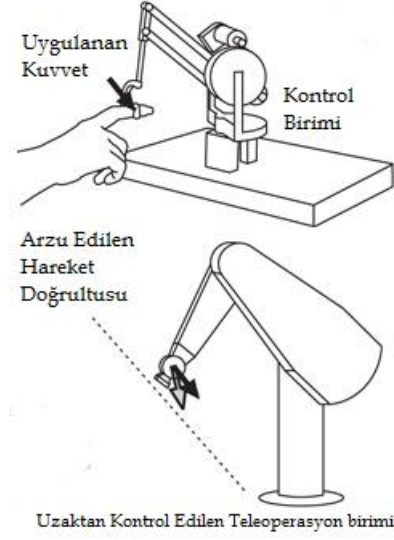
Şekil 1. 3:Fotolitografi çalışma prensibi.

#### 1.1.4 Teleoperasyon

Tehlikeli biyolojik laboratuvarlar, Nükleer reaktörler, kimyasal tesisler gibi çevresel tehlikelerin olduğu çalışma alanlarında ve mini cerrahi operasyonlarda manyetik askı sistemi ile çalışan Teleoperasyon sistemleri ileri teknoloji ile uygulanabilmektedir (Shameli, 2006).



Şekil 1.4:İki serbestlik dereceli Manyetik Teleoperasyon Sistemi.



**Şekil 1.5:** Manyetik Teleoperasyon Sisteminin çalışma şekli.

### 1.1.5 RüzgarTuneli

Manyetik askılı rüzgar tünellerinde, büyük açıda saldırı testi, dijital sistem kontrolü, savrulma kontrolü, sistem hata tolerans testleri yapılabilmektedir. Büyük ölçekli tesislerin tasarım çalışmaları başlamış olup hala devam etmektedir (Shameli, 2006).

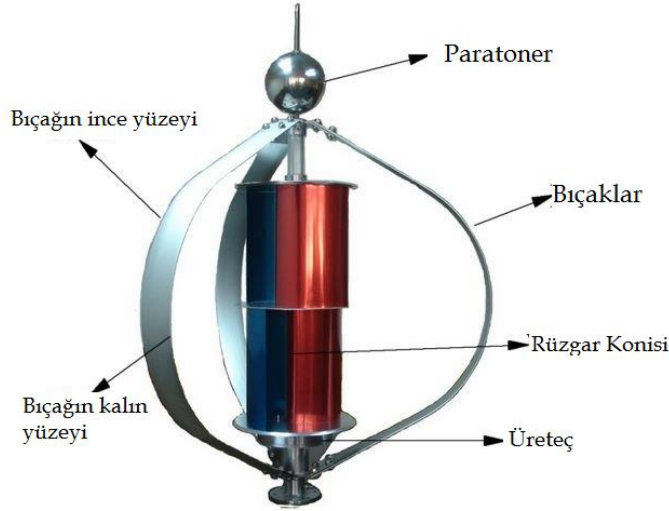


**Şekil 1.6:** TohokuUniversity 0.3 m Manyetik Rüzgar Tüneli(solda)ve NASA Langley Manyetik Rüzgar Tuneli(sağda).

### 1.1.6 Rüzgar Türbini

Verimi arttırmak amacıyla manyetik askı sistemli rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. Elektrik üretim seviyeleri maksimumdur. İlki Pekin'de WindPowerAsia fuarında tanıtılmıştır. Rüzgar Türbininde daimi mıknatıs kullanılarak dikey duran bıçakları kaldırmak için manyetik kuvvet üretilir ve makinenin tabanı üzerinde havada asılı tutulurlar. Bu türbinler hiçbirelektrik harcamaması sebebiyle çalışması boyunca ek elektrik kaynağı gerektirmez. Türbinkanatları daimi mıknatıs ile manyetik kuvvet ürettiğinden rulmana gerek yoktur. Sürtünme olmadığından enerji kaybı minimumdur. Bunun sonucunda bakım maliyetleri önemli miktarda düşer, jeneratör ömrü uzar. Bu tasarım ile türbin kanatları ve tabanarasındaki sürtünme önemli ölçüde azaltılabilir ve maksimum güç çıkışı üretilir.

(<http://www.scribd.com/doc/30914921/Maglev-Wind-Turbine>)



Şekil 1.7:Manyetik Askılı Rüzgar Türbini Yapısı



**Şekil 1.8:**1 kW manyetik askılı rüzgar türbini.

### **1.1.7 Maglev Trenleri**

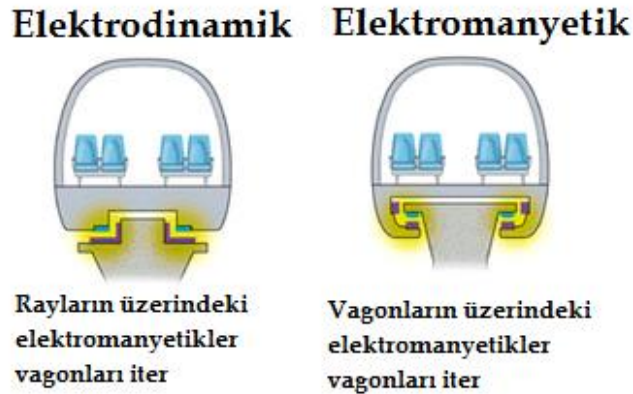
Maglev kavramı; iki mıknatısın aynı kutuplarının birinin diğerini itmesi prensibine göre çalışan ve şu anda en güncel olan hızlı trenlerin adıdır. Uygun olarak alt alta konumlandırılmış iki mıknatıstan biri manyetik itme kuvvetinin etkisiyle diğerinin üzerinde hiçbir şeye değmeden havada askıda kalabilir. Temel çalışma ilkesi maglev trenleri için budur. Maglev trenlerin altında mıknatıslar yerleştirilmiştir. Buna paralel olarak maglev trenler için özel olan tren raylarında da elektromıknatıslar yerleştirilir. Bir telin üzerinden elektrik akımı geçirilerek oluşturulan manyetik alana sahip mıknatıslar elektromıknatıstır. Tellerden akım geçmediği durumda manyetik etki oluşmaz ya da akımın yönünün kontrolüyle mıknatısın kutupları değiştirilebilir. Bu mıknatıslar sayesinde tren, raylar üzerinde 1-10 cm arasında bir yükseklikte ilerler. Raylarla temas olmadığı için sürtünme yok denecek kadar azdır. Trenin şekli de havayla sürtünmeyi en aza indirecek şekilde tasarlanır (Erdem, 2007).

### 1.1.7.1 Elektromanyetik süspansiyon sistemi (EMS)

EMS, elektromanyetik süspansiyon sistemidir. EMS sistemleri günümüzde, bir çelik ray üzerinde geri bildirimli bir kontrol sistemi vasıtasıyla tren sabit bir yükseklikte havada askıda tutulur. Elektromanyetik süspansiyon sistemi (EMS) çekici kuvveti araç üzerine konumlanan elektromıknatıslar kullanarak oluşturulmuş yolundaki ferromanyetik malzemeden yapılmış raylarla olan etkileşim dolayısıyla kızak üzerinde kayar gibi hareket eder (Erdem, 2007).

### 1.1.7.2 Elektrodinamik süspansiyon sistemi (EDS)

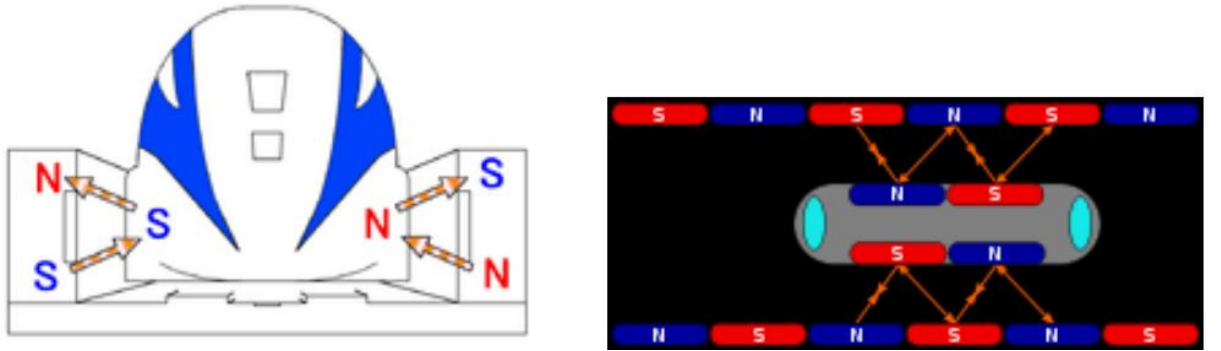
EDS, elektrodinamik süspansiyon sistemidir. Elektrodinamik süspansiyon sisteminde sadece tren değil demiryolundada manyetik alanlar oluşturulur ve bunun sonucunda tren havada askıda kalır. Trenin üzerindeki manyetik alan süper iletken mıknatıslar vasıtasıyla veya kalıcı mıknatıslar kullanılarak, treni iten kuvvet ise yol içindeki elektromıknatısların kutupları trene ileri doğrultuda hareket ettirecek şekilde dinamik olarak değiştirilmesi sonucu tren en yüksek hızı ulaştıracak şekilde kontrol edilir (Erdem, 2007).



Şekil 1.9: Magnetik Levitasyon Yöntemli Trenler.



Şekil 1.10:Şangayda işletmede olan bir maglev treni.



Şekil 1.11:EDS maglev treninin çalışma prensibi detaylı gösterim.



## 2. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ

### 2.1 Doğrusal Ve Doğrusal olmayan sistemler

Sistemler iki tipe sınıflandırılabilir: Doğrusal ve Doğrusal olmayan sistemler. Günlük yaşamda çoğu sistem doğrusal olmayan sistemler arasında yer alır.

#### 2.1.1 Doğrusal Sistemler

Doğrusal (Lineer) sistem lineer işlemlerde kullanım temelli matematiksel bir modeldir, doğrusal olmayan sistemlerden daha basit özellikler ve karakteristikler gösterirler. Doğrusal sistemler süper pozisyon ve homojenlik özelliklerini taşır. Doğrusal sistemler otomatik kontrol teorisi, sinyal işleme ve telekomünikasyon alanında önemli uygulamalarda yer bulurlar.

#### 2.1.2 Doğrusal Olmayan Sistemler

Doğrusal olmayan sistem süper pozisyon (Süper pozisyon eğer  $x_1(t)$  girişine karşılık gelen  $y_1(t)$  tepkisi ise ve  $x_2(t)$  girişine karşılık gelen  $y_2(t)$  tepkisi ise, iki girişin net tepkisi bu iki girişin tepkileri toplamıdır.) ve homojenlik (homojenlik belirli bir faktörle orantılanmış girişin aynı faktörle orantılanmış çıkış üretmesidir) uygulanamayan sistemlerdir. Bu yüzden bu sistemlere çözüm üretmek için kullanılan yöntem onları lineerizasyonla doğrusal sistemlere dönüştürmektir; ancak bu metot sadece belirli aralıklarda kullanılabilir.

### 2.2 Klasik Ve Modern Kontrol

Kontrol sistemleri iki tipe sınıflandırılabilir bunlar klasik kontrol ve modern kontroldür. Her biri uygulandıkları alanlar üzerinde farklı avantajlara sahiptir.

## 2.2.1 Klasik Kontrol

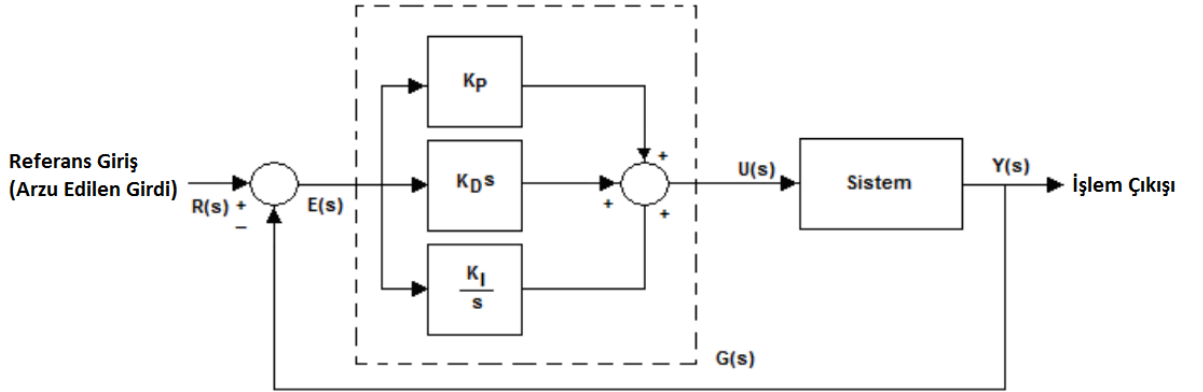
Klasik kontrolün kullanım alanı tek giriş ve tek çıkış(SISO) sistemlerle sınırlıdır ve kullanılan metotlar doğrusal sistemlerde frekans tepkisi ölçümüne dayanır. Lineer sistemler bir transfer fonksiyonu modeli ile tanımlanır. Klasik kontrol teorisi kullanılarak en yaygın tasarlanan kontrolcüler PID kontrolcülerdir(uygulamaların %90'ı bu kontrolcüyü kullanır).

### 2.2.1.1 PID (Orantı-İntegral-Türev)Kontrol

PID günümüzde endüstride en yaygın olarak kullanılan otomatik kontrol yöntemidir. Bir PID kontrolör çıkış ve arzu edilen giriş arasındaki hatayı düzeltir veya hesaplamalar yaparak bu hatayı ayarlar veya sistemin çıkışını ayarlayacak olan çıkış düzeltmesini verir. Bir PID kontrol genel hali zaman domaininde 2.1'deki gibidir.

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

Burada  $K_p$  oransal kazanç,  $K_i$  integral kazanç,  $K_D$  türev kazançtır.



Şekil 2.1: PID kontrolör Blok diyagramı .

PID kontrolörün S domanindeki transfer formu 2.2'deki şekildedir :

$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_i}{s} \quad (2.2)$$

Çıkış bilgisi ve Referans bilgisi arasındaki fark bilgisi hata bilgisi olarak oluşturulur. PID transfer fonksiyonuyla belirlenen kontrol işareti bu hata bilgisi kullanılarak oluşturulur ve sisteme uygulanır bunun sonucunda sisteme uygun kazanç parametreleri ile, kısa oturma zamanlı düşük yukarı ve aşağı taşmalı, düşük yükselme zamanlı ve yok edilmiş kararlı hal hatası ile denge konumuna getirilir. PID katsayılarının sistem parametrelerine cevabı aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

**Tablo 2.1 : Sistem Parametreleri ve Cevabına PID Katsayıları**

	<b>Kararlı Hal Hatası</b>	<b>Yükselme Zamanı</b>	<b>Aşma</b>	<b>Oturma Zamanı</b>
$K_p$	Azalır	Süre Azalır	Aşım Artar	Küçük bir değişim
$K_i$	Ortadan Kalkar	Süre Azalır	Aşım Artar	Artar
$K_D$	Küçük bir değişim	Küçük bir değişim	Aşım Azalır	Azalır

“Control TutorialforMatlab”,

<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>

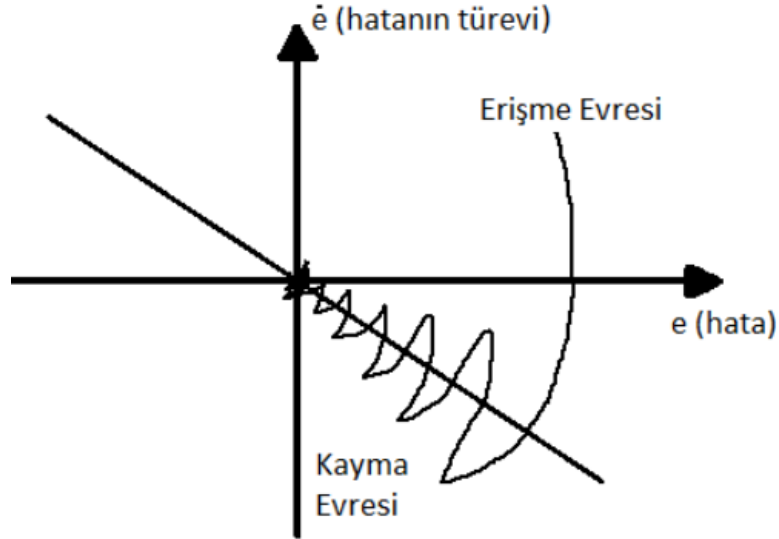
### 2.2.2 Modern Kontrol

Modern kontrol durum uzay denklemleri ile ilgilenir ve metodları zaman tepkisi ölçümüne dayanır. Bu şekilde kontrol edilen sistemler çoklu giriş ve çoklu çıkış(MIMO)sistemleri kapsar ve magnetiklevitasyon sistemi gibi Lineer olmayan sistemler üzerinde çalışır. Adaptif Kontrol ve Robust kontrol bunlara örnek olarak verilebilir.

### 2.2.2.1 Kayan Kipli Kontrol

Temeli Lyapunov kararlılık koşulları üzerine kurulu disturbans ve sistem parametrelerindeki değişimlere karşı değişken yapıli kontrol sistemlerinde önemli miktarda dayanıklılık sağlayan bir yaklaşımdır doğrusal veya doğrusal olmayan sistem tasarımında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu yaklaşım geri beslemeli sistem parazitlerine karşı olan gürbüzlüğüyle çalışmacıların dikkatini çekmekte ve bu sebepten ötürü otomotivde motor kontrol sistemleri,robotik sistemler, ve manyetik askı sistemleri gibi çok çeşitli uygulama alanlarında başarılı biçimde uygulanmıştır ( Shkolnikov, I. A., Shtessel,2000),( Camacho, O., Smith,2000),( Guldner, J., Utkin,1995).

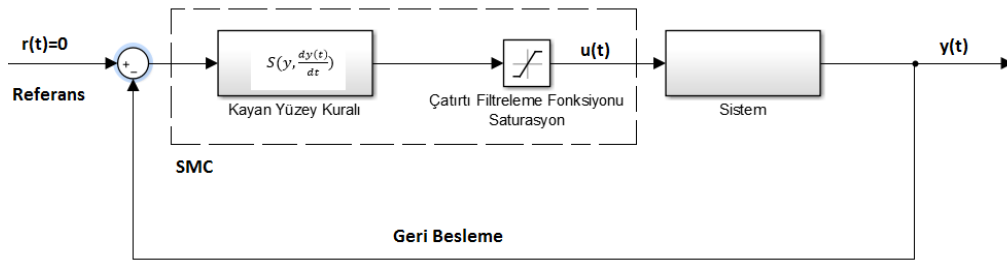
Durum uzay değişkenlerinin kararlı koşullaraulaşmak için etrafında dalgalandıkları bir eksen olan kayma yüzeyi eğiminin, kayan kipi tasarlamak için öncelikle bilinmesi gerekir. Burada amaç seçilen kontrol değişkeninin referans ve ölçülen değerleri arasındaki fark ile oluşan hatanın zamana bağlı türevlerini sıfır yapmak veya durum uzay değişkenlerini tanımlanan denge konumuna ulaştırmaktır.



Şekil 2.2:Kayma yüzeyi ve Çatırtı

Sistemin kararlılığını koruyabilmek için hata veya durum değişkenleri işletim süresince kayma yüzeyi üzerinde tutulmaya çalışılırken kontrol kuralının sürekli genlik ve yön değiştiren kontrol sinyali üretmesi sonucu uygulamalarda çatırtı (İng. chattering) denilen istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Çatırtı, kontrol edilen

sistemde yorulmalara sebep olarak sistemin ömrünü ciddi oranda kısaltmaktadır. Ayrıca, sistemin istenildiği şekilde kontrolünün sağlanabilmesi için belirtilen değişken genlik ve yöndeki akım her zaman eyleticilere sağlanamamaktadır. Çatırtının azaltılması için çeşitli önerilerde bulunulmuş olup, belirtilen öneriler; çatırtı ve kontrol kararlılığı arasında bir uzlaşma oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bir başka deyişle sistemin kararlılık marjından bir ölçüde feragat edilerek çatırtının şiddeti azaltılmaya çalışılmaktadır. Buda, çatırtının hissedilir miktarda sönümlenmesine karşın, kontrol sisteminin gürbüzlüğü oldukça azaltılmaktadır. Çatırtıyı enaza indirirken sistem kararlılığından fedakarlık etmemek için kayma yüzeyi eğiminin kontrol sisteminin bulunduğu konuma göre işletim süresince değiştirilmesi işlemi uygulanmaktadır. Ancak, belirtilen yaklaşım yüksek işlem hızları gerektirmesi sonucu özellikle düşük çalışma frekanslı uygulamalarda gerçekleştirilememektedir(Tokat, S.,2003),(Damiano, A., Gatto,2004).



Şekil 2.3:Kayan Kipli Kontrolör Blok Diyagramı

### 2.2.2.2 Durum Gözetleyici Kontrol

Gözetleyici bir sistemin giriş ve çıkış verilerinden, ölçümlerinden sistemin iç durumuna ait tahminler sağlayan bir sistemdir ve sistemin gerçek zamanlı simülasyonu, gözetleyiciden türetilmiş tahmin edilen çıkış ve sistemin gerçek çıkışı arasındaki fark ile sistemi süren aynı girişten oluşmaktadır.

Gözetleyicinin durum vektörü  $\hat{x}$  ile gösterilirse gözetleyicinin durum uzay tanımı aşağıdaki şekilde olur:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - L_g(y - \hat{y}) \quad (2.3)$$

Burada  $L_g$  gözetleyici kazancıdır ve  $\hat{y} = C\hat{x} + Du$  sistemin tahmin edilen çıkışıdır. Gözetleyici tasarlanırken gözetleyici kazancı  $L_g$  öyle seçilmelidir ki geri besleme matrisi  $A - CL_g$  asimptotik olarak kararlı yani bütün özdeğerleri negatif gerçel kısımlı olmalı böylelikle varsayım hatası  $e(t)$  herhangi bir başlangıç koşulu altında  $e(t_0)$  zamanla sıfır'a ulaşır. Bu kararlılık koşulu eğer  $(A,C)$  matrisleri gözetlenebilir sağlanır. Gözetleyici özdeğerlerinin istenen şekilde kompleks sol yarı düzlemde yerleştirilmesi ve asimptotik olarak kararlılığın sağlanması için  $(A^T C^T)$  matrisleri kontrol edilebilir olmalıdır yani bu matris çifti sistemin gözetlenebilirlik matrisleri  $(A,C)$ 'ye eşit olmalıdır (V.Radisavljevic,2014).

Gözetleyici tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri olarak bahsedilen olan kontrol edilebilirliğe değinilirse, sistemin arzu edilen ilk durumundan, arzu edilen son durumuna kadar aldığı her durum değişkeninden bir giriş bulunabiliyorsa bu sistem kontrol edilebilirdir denir aksi durumdaki sistemler içinde kontrol edilemez sistem denir. n. Dereceden bir sistemin kontrol edilip edilemediğini kontrol edilebilirlik matrisi  $C_o$  'nin sıralaması'nı(rank) kullanarak belirleyebiliriz, bu matris 2.4'te gösterildiği gibi fullrank ise sistem için kontrol edilebilirdir diyebiliriz(V.Radisavljevic,2014).

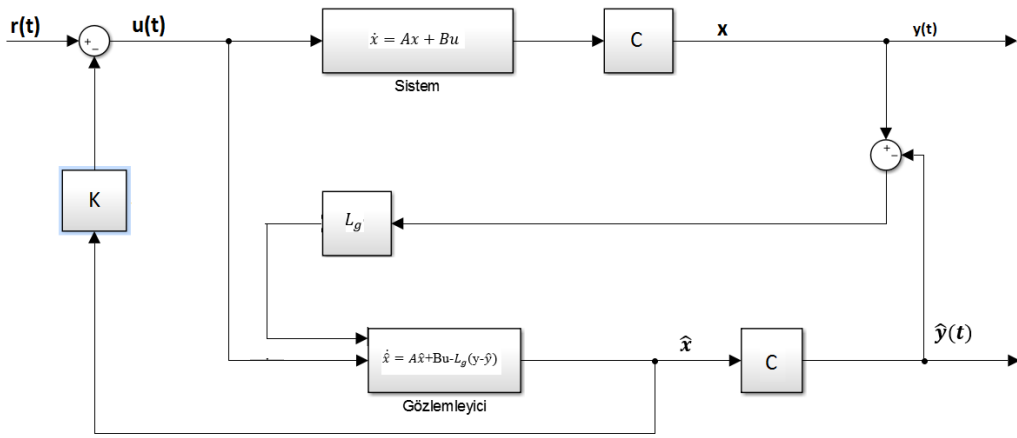
$$C_o = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2.4)$$

Bir gözetleyici kontrolörün tasarımı geri besleme durumlarının ayarlanabilir kazançlardan oluşmasına dayanır bir çok zaman bu donanımsal olarak sağlansada pratik uygulamada durum değişkenlerinin bazıları donanımsal olarak elde edilemeyebilir işte bir gözetleyici sistemden bu ulaşılamayan durum değişkenlerinin hesaplanmasında kullanılır. n.Dereceden bir sistem eğer gözlemlenebilirlik matrisi  $O$  2.5'teki gibi fullrank ise gözetlenebilirdir(V.Radisavljevic,2014).

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bütün bu koşullar sağlandığında gözetleyici öz değerleri sistemin öz değerlerinden yaklaşık 10 kez hızlı olarak seçilmelidir buda gözlemcinin öz

değerlerinin en küçük reel kısmının, kapalı çevrim sistemin öz değerlerinin gerçek kısmından 10 kez daha büyük olarak seçilmesiyle sağlanır. Teorik olarak gözlemci kapalı çevrim öz değerlerinin sol kompleks düzlemde çok uzağa yerleştirilmesiyle istenilen hızda olması sağlanabilir fakat çok hızlı gözlemciler istenilen bir sonuç olmayan gürültü oluşturur. Bu yüzden pratikte kapalı çevrim gözlemleyici öz değerleri kapalı çevrim sistem öz değerlerinden 5-6 kez hızlı olarak seçilir. Bu noktada dikkat edilmelidir kikusursuzgeribeslemeli kontrol kullanılabilirse ,sistem-gözlemci konfigürasyonunun kapalı çevrim sistemi öz değerlerinin muhafaza edebilecek şekilde olmasını mümkün olacaktır(V.Radisavljevic,2014).



**Şekil 2.4:** Durum Gözlemleyici Kontrolör Blok Diyagramı

### 2.3 Manyetik Askı Sisteminin Doğrusal Olmayan Durum Denklemleri

Lineer differansiyel denklemlerle sistemleri tanımlanan farklı yolları vardır örneğin temsili Durum-Uzay denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{d(x)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (2.6)$$

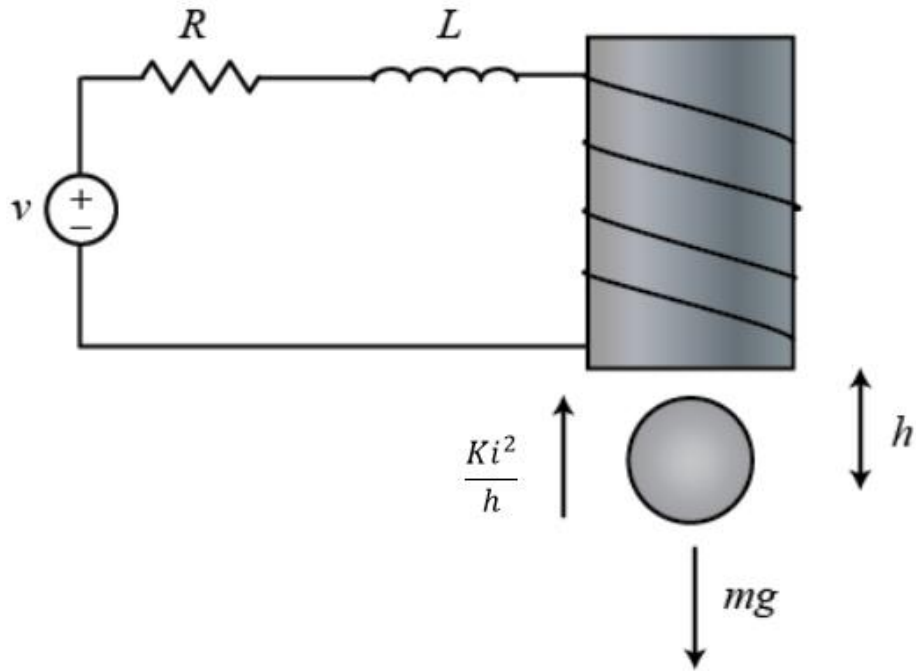
$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Fw(t) \quad (2.7)$$

Yukarıdaki temsili denklemlerde  $x$ , durumu temsil eden ( $n \times 1$ ) bir durum vektörü,  $u$  kaynağı ifade eden ( $p \times 1$ ) giriş vektörü ve  $w$  ise bozucu etken ve gürültüyü ifade etmekte olan ( $v \times 1$ ) bozucu vektörüdür.  $y$  ise çıkışı ifade eder ( $q \times 1$ ) bir çıkış vektörüdür.

$A(n \times n)$ ,  $B(n \times p)$ ,  $C(q \times n)$ ,  $D(q \times p)$ ,  $E(n \times v)$  ve  $F(q \times v)$  lik matrisler durum, giriş çıkış ve bozucu etken değişken değerleri arasındaki ilişkileri, bağıntıları belirleyen katsayı matrisleridir.

Analiz ve sentezi zor olması sebebiyle doğrusal olmayan sistemler mümkün oldukça doğrusallaştırılmalıdır. Durum uzayı gösterimi tek girişli sistemlerle kullanılabilir gibi çok giriş ve çıkışlı sistemlerle de kullanılabilir.

Manyetik Askı Sisteminin durum uzayı gösterimi tek girişli tek çıkışlı bir sistem modelidir. Sistemin elektriksel yapısı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 2.5:**Manyetik Levitasyon Sistemin Elektriksel Modeli.

Elektromıknatis tarafından askıda tutulan demir küreye uygulanan kuvvet için Kuvvet Denklemi yazılırsa:

$$F = \frac{Ki^2(t)}{h(t)} \quad (2.8)$$



Burada;

F; Çekim kuvvetini, (N)

i(t); Elektromıknatıstan akan bobin akımını, (A)

K; Elektromıknatıs katsayısını, (Nm/A<sup>2</sup>)

h(t); Küre ile elektromıknatıs arasındaki mesafeyi (m)

göstermektedir.

Newton'un kuvvet ve Kirchooff'un gerilim yasaları kullanılarak sisteme ilişkin diferansiyel denklemler aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir:

$$m \frac{d^2 h(t)}{dt} = mg - \frac{Ki^2(t)}{h(t)} \quad (2.9)$$

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Burada;

h(t); Topun düşey konumunu, (m)

i(t); Elektromıknatıstan akan bobin akımını, (A)

U(t); Uygulanan kaynak gerilimini, (V)

m; Kürenin kütesini, (Kg)

g; Yerçekimi ivmesini, (m/s<sup>2</sup>)

L; Bobin endüktansını, (H)

R; Bobin direncini, ( $\Omega$ )

K; Elektromıknatıs katsayısını (Nm/A<sup>2</sup>)

göstermektedir.

Durum değişkenleri belirlenirken her zaman sistemin bağımsız enerji depolayan elementlerini göz önüne almakta fayda vardır burada sistemin durum değişkenleri sırasıyla konum, hız ve akımdır ve matematiksel olarak aşağıda gösterilen şekilde tanımlanırlar.

$$x_1(t) = h(t) \quad (2.11)$$

$$x_2(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (2.12)$$

$$x_3(t) = i(t) \quad (2.13)$$

Bu durumda sisteme ait durum değişkenleride kullanılarak sistemin differansiyel denklemleri yazılırsa :

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \quad (2.14)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = g - \frac{Kx_3(t)}{mx_1(t)} \quad (2.15)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{R}{L}x_3(t) + \frac{1}{L}u(t) \quad (2.16)$$

#### 2.4 Manyetik Askı Sisteminin Doğrusallaştırılmış Durum Denklemleri

Fiziksel sistemler ele alındığında bir çok eleman ve sürücünün karakteristik olarak doğrusal olmadığı görülür.Uygulamada bazı sistemler için doğrusalsızlığın ılımlı veya sadece belirli çalışma bölgelerinin dışında etkin olduğu görülür. Bu sistemlerin belirli çalışma bölgeleri içinde doğrusal sistem olarak modellenmesi, yeterli doğruluk oranına sahip analitik sonuçlar verebilir. Ancak doğrusalsızlığının mertebesi yüksek olan bir çok fiziksel sistem bulunmaktadır.

2.9 denkleminde verilmiş olan durum denklemi doğrusal değildir. Bu tür sistemler için türetilen doğrusal model sadece doğrusallaştırmayışleminin yapıldığı çalışma noktası ve çok sınırlı çalışma bölgesi içinde geçerlidir. Ancak burada ödemli olan doğrusallaştırılmış sistemin bu belirli çalışma noktası etrafındaki modelinde

zamanla değişen elemanların bulunabilmesidir.Doğrusallaştırma için bir yöntem şu şekilde verilebilir (Kuo.B,199).

Doğrusal olmayan sistemin, doğrusal olmayan denklemleri bir Taylor serisine açılır. Açılımda bulunan birinci mertebedendaha fazla mertebeli terimler atılır veböylece doğrusal olmayan denklemin nominal nokta etrafındaki doğrusal yaklaşığı elde edilir.

Doğrusal olmayan bir sistem için durum denklemi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), r(t)] \quad (2.17)$$

Burada  $x(t)$ ,  $(nx1)$  boyutlu bir durum vektörü,  $r(t)$ ,  $(px1)$  boyutlu bir girişvektörü ve  $f[x(t), r(t)]$  ise  $(nx1)$  boyutlu genelde durum ve giriş vektörlerininbir vektörel fonksiyonudur.

Belirli bir başlangıç durumunda nominal  $r_0(t)$  girişine karşın nominal çalışma yörüngesini  $x_0(t)$  olarak ifade edelim. Denklem 2.17gösterilen doğrusal olmayan durum denklemi  $x(t) = x_0(t)$  etrafında bir Taylor serisine açılımı yapıp yüksekmeriteden terimlerin tümü yok edilirse,  $i = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere

Aşağıda verilen denklem elde edilir.

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_0, r_0) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \right|_{x_0 r_0} (x_j - x_{0j}) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \right|_{x_0 r_0} (r_j - r_{0j}) \quad (2.18)$$

Ayrıca fark değerleri Denklem 2.19 ve Denklem 2.20 olarak

tanımlandığında Denklem 2.20 ilişkisi sağlanır.

$$\Delta x_i = x_i - x_{0i} \quad (2.19)$$

$$\Delta r_j = r_j - r_{0j} \quad (2.20)$$

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{0i} \quad (2.21)$$

Denklem (2.18)'te  $\dot{x}_{0i} = f_i (x_0, r_0)$  olması sebebi ile Denklem 2.22 şu

şekilde yazılabilir.

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x,r)}{\partial x_j} \right|_{x_0 r_0} (\Delta x_j) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x,r)}{\partial r_j} \right|_{x_0 r_0} (\Delta r_j) \quad (2.22)$$

Denklem 2.22 vektör-matris biçiminde yazılınca Denklem 2.23 elde edilir.

$$\Delta \dot{x} = A^* \Delta x - B^* \Delta r \quad (2.23)$$

Burada

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

ve

$$B^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_p} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial r_p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_p}{\partial r_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial r_p} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

olarak tanımlanır.

Sistem  $h_0(t) = x_{01}$  sabit denge noktası etrafında doğrusallaştırıldığında, denge konumunda hız ve ivme teriminin sıfır olacağı denklemler aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$x_{02}(t) = \frac{dx_{01}(t)}{dt} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{d^2h_0(t)}{dt^2} = 0 \quad (2.27)$$

$i(t)$ 'nin denge konumundaki nominal değeri için 2.27 numaralı eşitlik, 2.9 eşitliğinde yerine konursa eşitlik 2.28'teki akımın denge durumu için değeri bulunabilir.

$$i_0(t) = x_{03}(t) = \sqrt{\frac{mgx_{01}}{K}} \quad (2.28)$$

Tasarlanan sistem için eşitlik 2.22'deki doğrusallaştırılmış durum denklemleri eşitlik 2.25'teki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{\Delta x}(t) = A^* \Delta x(t) + B^* \Delta u(t) \quad (2.29)$$

Bu durumda doğrusallaştırılmış durum denklemlerindeki  $A^*$  ve  $B^*$  matrisleri 2.30 ve 2.31 eşitliklerindeki biçimde elde edilir.

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2Kx_{03}^2}{mx_{01}^2} & 0 & \frac{-2Kx_{03}}{mx_{01}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

## 2.5 Manyetik Askı Sisteminin Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı

Yukarıda elde edilen  $x_{01}, x_{02}, x_{03}$  durumları arzu edilen sabit değerler olan  $x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}$  elde edilmek üzere kontrol tasarımında kullanılması amaçlanarak hesaplanmıştır. Kordinatların doğrusal olmayan aşağıdaki dönüşümü düşünülürse:

$$z_1 = x_{01} - x_{1d} \quad (2.32)$$

$$z_2 = x_{02} \quad (2.33)$$

$$z_3 = g - \frac{K x_{03}^2}{m x_{01}^2} \quad (2.34)$$

Dikkat edilirse eğer  $z_1, z_2, z_3, t \rightarrow \infty$  iken sifıra götürülürse,  $x_1$  arzu edilen  $x_{1d}$  ye,  $x_2$  değeri 0'a yakınsarken  $x_3$  istenilen  $x_{3d} = \sqrt{\frac{mg}{K}} x_1$  değerine yakınsayacaktır(N.F Al-Muthairi, M.Zribi, 2004).

Yeni koordinatlarda sistemin modeli aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (2.35)$$

$$\dot{z}_2 = z_3 \quad (2.36)$$

$$\dot{z}_3 = f(z) + g(z)u \quad (2.37)$$

$$f(z) = 2(g - z_3) \left( \left( 1 - \frac{2K}{L(z_1 + x_{1d})} \right) \frac{z_2}{z_1 + x_{1d}} + \frac{R}{L} \right), \quad (2.38)$$

$$g(z) = \frac{-2}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{K}{m} (g - z_3)} \quad (2.39)$$

$f(z)$  ve  $g(z)$ 'nin orijinal koordinatlarda aşağıda belirtilen fonksiyonlara karşılık geldiğine dikkat edilmelidir.

$$f_1(x) = \frac{2K}{m} \left( \left( 1 - \frac{2K}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \frac{x_3^2}{x_1^2} \right), \quad (2.40)$$

$$g_1(x) = -\frac{2Kx_{03}}{Lmx_{01}^2}, \quad (2.41)$$

Burada  $f_1(x) = f(z)$  ve  $g_1(x) = g(z)$  dir (N.F Al-Muthairi, M.Zribi, 2004).

Sistemin çıkışı aşağıdaki gibi olsun

$$y = z_1 = x_{01} - x_{1d} \quad (2.42)$$

Modellenen

(2.32), (2.33), (2.34), (2.35), (2.36), (2.37), (2.38), (2.39), (2.40), (2.41), (2.42) denklemleri kullanılarak manyetik levitasyon için aşağıdaki denklemlerle KayanKipli Kontrolör tasarlanmıştır (N.F Al-Muthairi, M.Zribi, 2004).

Aşağıdaki gibi gösterilebilen doğrusallaştırılmış geri beslemeli kontrolör :

$$u = -\frac{1}{g} (f + z_1 c_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3) \quad (2.43)$$

$z_1, z_2$  ve  $z_3$  'ün,  $t \rightarrow \infty$  iken asimptotik olarak sifıra yakınsamasını sağlar (H. Sira-Ramírez, O. Llanes-Santiago, 1996).

$c_1, c_2$  ve  $c_3$  öyle pozitif reel skaler büyüklükler olsun ki  $\rho_2(s) = s^3 + c_3 s^2 + c_2 s + c_1 = 0$  polinomu Hurwitz Polinomu olsun.

Girişe bağlı anahtarlama yüzeyi (switching surface)  $\rho(z, u)$ :

$$\rho(z, u) = u + g + (f + c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3), \quad (2.44)$$

ve  $W_2$  yeterince büyük pozitif artan fonksiyon olursa, aşağıdaki tasarım

$$u = -\frac{1}{g} (f + z_1 c_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3) + v \quad (2.45)$$

kontrol şemasına aşağıdaki parametre ile

$$\dot{v} = -W_2 \text{sign}\left(u + \frac{1}{g}(f + z_1 c_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3)\right) \quad (2.46)$$

kayan kipli kontrolör tasarımının başlangıcında dönüşümleri tanımlanan manyetik levitasyon sistemine uygulandığında,  $t \rightarrow \infty$  iken  $z_1, z_2$  ve  $z_3$  'ün, asimptotik olarak 0'a yakınsamasını sağlar.

$\rho(z,u)$  sınırlı bir sürede sifıra götürüldüğü için çıkış  $y = z_1$  kayan yüzey( $\rho(x,u)$ ) üzerinde 3.dereceden diferansiyel denklem  $y^{(3)} + c_3 \ddot{y} + c_2 \dot{y} + c_1 y = 0$  tarafından kontrol edilir. Bu yüzden çıkış  $y(t) = z_1, t \rightarrow \infty$  iken asimptotik olarak sifıra yakınsayacaktır çünkü  $c_1, c_2$  ve  $c_3$  öyle pozitif skalerler olarak seçilmişlerdir ki  $\rho_2(s) = s^3 + c_3 s^2 + c_2 s + c_1$  Hurwitz polinomudur.  $t \rightarrow \infty$  iken  $z_1$  sifıra yakınsadığı için  $z_2$  ve  $z_3$  de sifıra yakınsar (N.F Al-Muthairi, M.Zribi, 2004).

(2.32), (2.33), (2.34) denklemleri kullanılarak  $x_{01}, x_{02}$  ve  $x_{03}$  ,  $t \rightarrow \infty$  iken istenilen değerlere yakınsarlar bunun sonucu olarak yukarıda tasarımı yapılmış olan dinamik kayan mod kontrolörün  $x_{01}, x_{02}$  ve  $x_{03}$  durumlarını,  $t \rightarrow \infty$  iken asimptotik olarak istenilen değerlere yakınsaması sağlanmış olur.

Tasaralanan kontrolcü sistemin orijinal koordinatlarında yazılırsa:

$$u = -\frac{1}{g_1} \left( f_1 + c_1(x_{01} - x_{1d}) + c_2 x_{02} + c_3 \left( g - \frac{K}{m} \left( \frac{x_{03}}{x_{01}} \right)^2 \right) \right) + v \quad (2.47)$$

ve

$$\dot{v} = -W_2 \text{sign} \left( u + \frac{1}{g_1} \left[ f_1 + c_1(x_{01} - x_{1d}) + c_2 x_{02} + c_3 \left( g - \frac{K}{m} \left( \frac{x_{03}}{x_{01}} \right)^2 \right) \right] \right) \quad (2.48)$$

şeklindedir.

## 2.6 Manyetik Askı Sisteminin PID Kontrolü

Denklem 2.1'deki PID kontrol işaretindeki türev teriminin sayısal olarak karşılığı denklem 2.49'daki şekilde yazılabilir.



$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{[e(n)-e(n-1)]}{T_s} \quad (2.49)$$

Yine denklemin 2.1'deki integral terimine sayısal karşılık olarak

$$\int_0^t e(t)dt = T_s \sum_{n=0}^N e(n) \quad (2.50)$$

Yazılabilir.

Sonuç olarak denklem 2.1 PID kontrol işareti sayısal olarak denklem 2.51 veya 2.52 şeklinde yazılabilir.

$$u(n) = K_p e(n) + K_I T_s \sum_{n=0}^N e(n) + K_D \frac{[e(n)-e(n-1)]}{T_s} \quad (2.51)$$

$$u(n) = K(e(n) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{n=0}^N e(n) + \frac{T_D}{T_S} [e(n) - e(n - 1)]) \quad (2.52)$$

Burada

$$K=K_p \quad (2.53)$$

$$K_I = \frac{K}{T_I} \quad (2.54)$$

$$K_D = K T_D \quad (2.55)$$

değerlerine karşılık gelmektedir.

Yukarıdaki denklemlerle en genel tanımı yapılmış olan PID kontrolörün kazanç parametreleri Manyetik Levitasyon Sistemi için LQR yaklaşım kullanılarak aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi yapılmıştır (V. Kumar, J. Jerome ,2013).Bu yaklaşımda, hata, hata oranı, hatanın integrali PID regülatörün optimum kontrolcü kazançlarını elde etmek için durum değişkeni olarak düşünülmektedir.

$$x_1 = \int_0^t e(t)dt \quad (2.56) \quad x_2 = e(t)$$

$$(2.57)$$

$$x_3 = \frac{de(t)}{dt} \quad (2.58)$$

Şekil 2.1'den

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} = \frac{-E(s)}{U(s)}$$

Durum geri besleyici regülör'de,harici ayar noktaları kontrolör tasarımına etkide bulunmaz,böylelikle referans giriş  $r(t)=0$  etkilenmemiş olur.Denklem (2.59) aşağıdaki gibi olur bunun sonucu olarak.

$$[s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2]E(s) = -KU(s) \quad (2.59)$$

Ters Laplace Transformu uygulanırsa

$$\ddot{e} + 2\zeta w_n \dot{e} + w_n^2 e = -Ku \quad (2.60)$$

Böylelikle yukardaki gibi olan sistemin durum uzay gösterimi formu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -w_n^2 & -2\zeta w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} u \quad (2.61)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -w_n^2 & -2\zeta w_n \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

LQR formülasyon ile sistemin optimal performansını elde etmek için,aşağıdaki quadratic maliyet fonksiyonu minimize edilmeli.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (2.64)$$

Yukarıdaki maliyet fonksiyonunun minimizasyonu aşağıdaki optimum kontrol girişini verir.

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Fx(t) \quad (2.65)$$

Aşağıda verilen sürekli cebirsel Riccati denkleminin simetrik pozitif kesin çözümüyle bulunan P :

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (2.66)$$

Ağırlık matrisi Q simetrik pozitif ve ağırlık faktörü R pozitif sabit bir sayıdır. Genellikle ağırlık matrisi Q,R'yi sabit tutmak üzere değişik böylesiyle doğrusal kvadratik regülatörden optimal kontrol sinyali elde edilir. Buna karşılık gelen durum geri besleme kazanç matrisi:

$$F = R^{-1}B^T P = R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} = R^{-1}K \begin{bmatrix} P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} = -[K_i \quad K_p \quad K_d] \quad (2.67)$$

$$u(t) = -Fx(t) = -[-K_i \quad -K_p \quad -K_d] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \\ = K_i \int e(t)dt + K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.68)$$

Simetrik pozitif P matrisi'nin 3.satırı PID kontrolör kazancı terimleri şeklinde denklemden elde edilebilir.

$$P_{13} = \frac{K_i}{R^{-1}K} P_{23} = \frac{K_p}{R^{-1}K} P_{33} = \frac{K_d}{R^{-1}K} \quad (2.69)$$

2.62'deki denklemlerle tanımlanan sistemin kapalı çevrim sistemi durum geri besleme kazanç matrisi(2.67) ile birlikte:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -R^{-1}K^2 P_{13} & -w_n^2 - R^{-1}K^2 P_{23} & -2\zeta w_n - R^{-1}K^2 P_{E3} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

Kapalı çevrim sistemine karşılık gelen karakteristik polinomu:

$$\Delta(s) = |sI - A_c| = 0 \quad (2.71)$$

$$s^3 + s^2(2\zeta w_n + R^{-1}K^2P_{33}) + s(w_n^2 + R^{-1}K^2P_{23}) + R^{-1}K^2P_{13} = 0 \quad (2.72)$$

İstenilen Doğal frekans ve sönümlenme oranı olarak kapalı çevrim sisteminin karakteristik polinomu yazılırsa:

$$s^3 + s^2(2 + m)\zeta w_n + s(w_n^2 + 2mw_n^2\zeta^2) + mw_n^3\zeta = 0 \quad (2.73)$$

Denklem 2.72 ve 2.73'deki sabitler eşitlenirse:

$$\left. \begin{aligned} (2\zeta w_n + R^{-1}K^2P_{33}) &= (2 + m)\zeta w_n \\ (w_n^2 + R^{-1}K^2P_{23}) &= (w_n^2 + 2mw_n^2\zeta^2) \\ R^{-1}K^2P_{13} &= mw_n^3\zeta \end{aligned} \right\} (2.74)$$

P matrisinin 3.satırı denklem 2.75'deki gibi açık çevrim işleminin karakteristiği ve kapalı çevrim sistemi dinamikleri olarak çözümlenirse:

$$\left. \begin{aligned} P_{13} &= \frac{mw_n^3\zeta}{R^{-1}K^2} \\ P_{23} &= \frac{(w_n^2 + 2mw_n^2\zeta^2) - w_n^2}{R^{-1}K^2} \\ P_{33} &= \frac{(2+m)\zeta w_n - (2\zeta w_n)}{R^{-1}K^2} \end{aligned} \right\} (2.75)$$

Aşağıdaki cebirsel Ricatti denklemi çözülerek P matrisinin kalan elemanları bulunabilir, P matrisinin bilinen üçüncü elemanlarının yardımıyla da P ve Q matrisleri elde edilebilir:

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= P_{13}w_n^2 + P_{13}P_{23}R^{-1}K^2 \\ P_{12} &= 2\zeta w_n P_{13} + P_{13}P_{23}R^{-1}K^2 \\ P_{22} &= 2\zeta w_n P_{23} + P_{23}P_{33}R^{-1}K^2 + P_{33}w_n^2 - P_{13} \end{aligned} \right\} (2.76)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= P_{13}^2 R^{-1}K^2 \\ Q_2 &= P_{23}^2 R^{-1}K^2 - 2(P_{12} - P_{23}w_n^2) \\ Q_3 &= P_{33}R^{-1}K^2 + 2(P_{23} - 2\zeta w_n P_{33}) \end{aligned} \right\} (2.77)$$

## 2.7 Manyetik Askı Sisteminin Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrolü

Aşağıdaki zamanla değişen doğrusal sistemi doğrusal geri besleme kuralı ile düşünelim.

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ u = -Kx \end{cases} \quad (2.78)$$

Burada  $x$  durum vektörü,  $u$  sistem girişi,  $y$  sistem çıkışı,  $\hat{y}$  ölçülen çıkış,  $K$  gözetleyicisiz olarak  $\Sigma$  sisteminin doğrusal geri besleme kontrolörü için tasarlanmış olan kararlılaştırıcı doğrusal durum geri besleme matrisidir.  $\Sigma$  sisteminin kararlılığını sağlamak için ölçülen geri besleme sistemi Luenberger gözetleyicisi ile genişletilirse.

$$\Omega \begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L_g C(x - \hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ u = -K\hat{x} \end{cases} \quad (2.79)$$

Burada  $\hat{x}$  gözetleyici durumu,  $L_g$  gözetleyici geri besleme matrisidir.

Gözetleyici ve sistem çıkışları arasındaki elde edilen fark burada bize bir hata sinyali verir.

$$y - \hat{y} = C(x - \hat{x}) = Ce \quad (2.80)$$

2.79'de  $e$  gözetleme hatasıdır ve teorik olarak sistem kararlılığa ulaştığında sıfıra gider ve gözetleyici için geri besleme sinyali olarak kullanılabilir.

Gözetleyici Tabanlı Kontrolde kararlılık ile ilgili problemlerin aşılabilmesi için 2.78 ve 2.79 ile tanımlanmış olan sistemler için  $K$  ve  $L_g$  kazançlarının uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Durum uzay matrisleri denklem 2.6 ve 2.7 verilmiş olan sistem için doğrusal durum geri besleme tasarlanacak olursa:

$$u = r - Kx \quad (2.81)$$

Burada r referans sinyali olmak üzere kontrol kuralı denklem 2.80 deki gibi olur ve bu durumda kapalı çevrim sistemi:

$$\dot{x} = (A - BK)x + Br \quad (2.82)$$

denklem 2.82 da gösterildiği gibi elde edilir. Durum değişkenleri uygun doğrusal

$z = Tx$  dönüşümüyle kontrol edilebilir kanonik forma dönüştürülürse.

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u \quad (2.83)$$

$$\bar{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & \cdots & a_n \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

$$\bar{B} = TB = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$\bar{C} = CT^{-1} \quad (2.86)$$

gerekli olan T transformasyonu;

$$T = S^{-1}\bar{S} \quad (2.87)$$

burada

$$S = (B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B) \quad (2.88)$$

S, Sistemin durum uzay gösterilimi kontrol edilebilirlik matrisi ve

$$\bar{S} = (\bar{B} \ \bar{A}\bar{B} \ \bar{A}^2\bar{B} \ \dots \ \bar{A}^{n-1}\bar{B}) \quad (2.89)$$

$\bar{S}$ , sistemin kontroledilebilir kanonik form kontrol edilebilirlik matrisidir.

$\Sigma$  sisteminin karakteristik polinomu  $\phi(s)$ :

$$\phi(s) = \det(sI - A) = s^n + a_n s^{n-1} + a_2 s^{n-1} + \dots + a_n \quad (2.90)$$

şeklindedir.

Yeni durum vektörü  $z$ 'nin durum geri besleme matrisi:

$$\bar{K} = KT^{-1} \quad (2.91)$$

olur.

$$\bar{K} = (k_1 k_2 k_3 \dots k_n) \quad (2.92)$$

Sistem bir boyutlu olduğu için 2.70 formunda olmak zorundadır.

Sistemin kapalı çevirim karakteristik polinomu  $\tilde{A} = (\bar{A} - \bar{B}\bar{K})$  ve  $\phi_c(s)$ :

$$\phi_c(s) = \det(sI - \tilde{A}) = s^n + (a_1 + l_1)s^{n-1} + (a_{n-1} + l_{n-1})s + (a_n + l_n) \quad (2.93)$$

Olur.

Kapalı çevrim sisteminin istenilen karakteristik polinomu  $\phi_d(s)$ :

$$\phi_d(s) = s^n + \bar{a}_1 s^{n-1} + \bar{a}_2 s^{n-2} + \dots + \bar{a}_0 \quad (2.94)$$

bu durum için:

$$k_1 = \bar{a}_1 - a_1, \bar{a}_2 - a_2, \dots, k_n = \bar{a}_n - a_n \quad (2.95)$$

olur ve geri besleme matrisi  $\bar{K}$ 'nin değeri:

$$\bar{K} = (\bar{a}_1 - a_1, \bar{a}_2 - a_2, \dots, \bar{a}_n - a_n) \quad (2.96)$$

bulunur. Sonuç olarak durum geri besleme orijinal durum uzay gösterimi koordinatlarında yazılırsa:

$$K = \bar{K}T = \bar{K}\bar{S}S^{-1} \quad (2.97)$$

2.97’de gösterilen denklemlerle  $\Sigma$  sistemi için uygun durum geri besleme matrisi tasarlanmış olur. Cayley-Hamilton teoremi ve 2.97 denklemleri kullanılarak 2.98’deki Ackermann’ın formülü elde edilir ve durum geri besleme tasarımında alternatif bir hesaplama yöntemi olarak kullanılabilir.

$$K=[0 \ 0 \ \dots \ 1]S^{-1}\phi_d(A) \quad (2.98)$$

Sistemin kopyası olarak da nitelendirebileceğimiz gözetleyici gerçek durumların kestirimini yapar, sifıra yakınsaması arzu edilen bu kestirim hatası tamamen sistem tarafından belirlenir ve değiştirilemez. Durum geri besleme tasarımı sisteminin bütün durum değişkenlerinin bilinmesini gerektirir eğer durum değişkenleri hesaplanamıyor yada elde edilemiyorsa bir durum kestirici yani gözetleyici tasarlamak gerekir, gözetleyici geri besleme hatasını da hesaba katar.  $\Omega$  ile belirttiğimiz gözetleyicinin öz değerleri veya kutupları olarak adlandırılan  $(A - L_g C)$  parametresi sistemin kestirimi ne kadar hızlı yapacağını yani durum denklemlerinin ne kadar hızlı yeniden oluşturulacağını belirler.  $L_g$  gözetleyici kazancının belirlenmesi problemi durum geri besleme kazancı  $K$ ’nın belirlenmesi ile benzerdir.

Bunu görmek için gözetleyicinin karakteristik polinomu  $\phi_o(s)$  yazılırsa:

$$\phi_o(s) = \det(sI - A + L_g C) \quad (2.99)$$

Karakteristik polinom  $(A - L_g C)$  matris determinantının ve transpozunun aynı olmasından dolayı aynı zamanda:

$$\phi_o(s) = \det(sI - A^T + L_g^T C^T) \quad (2.100)$$

elde edilir. Kolaylıkla görülebilir ki ancak ve ancak  $(A^T, C^T)$  kontrol edilebilirse  $(A, C)$  gözetlenebilir. Sonuç olarak durum geri besleme kazancını hesaplamak için kullanılan aynı yöntemler  $L_g^T$  hesaplaması içinde kullanılabilir dolayısıyla Ackermann’ın formülü:

$$L_g^T = [0 \ 0 \ \dots \ 1]S^{-1}\phi_{do}(A^T) \quad (2.101)$$

formunu alır,  $\phi_{do}$  burada gözetleyicinin istenen karakteristik polinomu,  $S$  sistemin kontrol edilebilirlik matrisidir. Her iki tarafında transpozu alınır:



$$L_g = \phi_{do}(A)O^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

Ackermann'ın formülü gözetleyici formunda elde edilmiş olur, burada  $O(=S^T)$  sistemin gözetlenebilirlik matrisidir.

Oluşturulan sistemin yeni kapalı çevrim Durum-Uzay denklemleri yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0 & A - L_g C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (2.103)$$

2.103'den anlaşılacağı üzere gerçekte sistem-gözlemci konfigürasyonu kapalı çevrim öz değerleri, orijinal sistem öz değerleri ve gerçek gözlemci gözlemci öz değerleri birbirinden ayrıktır. Bunun sonucu olarak sistem ve gözetleyici için istenilen öz değerler birbirinden bağımsız olarak  $K$  ve  $L_g$  kazançları kullanılarak yerleştirilebilir.

$K$  ve  $L_g$  kazançları yerleştirilirken kullanılan bazı metodlar:

- LQG Kontrol:  $K$  ve  $L_g$  kazançları iki ayrılmış Riccati denkleminin çözülmesi ve quadratik denklemleri optimize etmek üzere seçilir.
- $H_\infty$  Kontrol:  $K$  ve  $L_g$  kazançları kapalı çevrim sisteminin  $\zeta$  indüklenmiş normunu optimize etmek için seçilir ve iki birleşik Riccati denklemini çözmeyi gerektirir.
- Multi objektif yaklaşım ve karışık LQG/ $H_\infty$ .

### 3. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN ELEKTROMEKANİK YAPISI

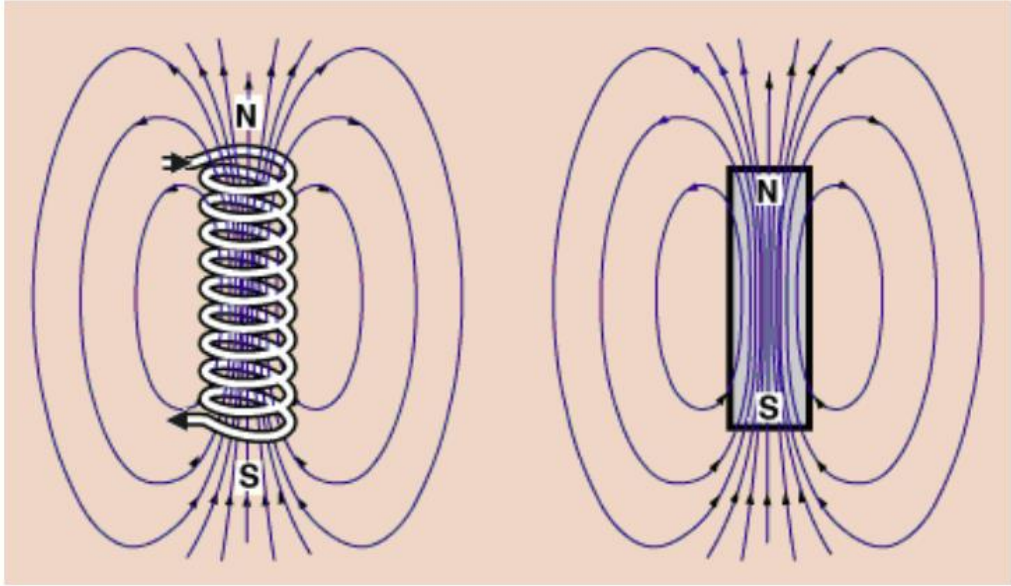
Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan manyetik levitasyon sisteminin bileşenleri olan elektro mıknatıs, manyetik küre, hall etkisi algılayıcısı ve tez çalışmasında kullanılan Zeltom Manyetik Levitasyon sistemi ile sistemin kontrol çalışmalarında kullanılan HILINK:Gerçek Zamanlı Matlab/Simulink Donanımıyla Benzetim Kontrol Kartı ilgili gerekli bilgilere değinilmiştir.



**Şekil 3.1:**Zeltom Manyetik Levitasyon sistemi ve Manyetik Küre

### 3.1 Elektromıknatıs

Elektrik akımının etkisiyle mıknatıslık özelliği kazanabilen magnetik maddelerde (demir çivi), iletken tel (bakır) ve üreteç yani elektrik akımı kaynağı kullanılarak elde edilirler, iletken tel bumagnetik madde (demir çivi) üzerine sarılır ve iletken telin açıkta kalan uçları üretecin kutuplarına bağlanır. İletken telden elektrik akımı geçirildiğinde magnetik madde yani demir çivi mıknatıslık özelliği gösterir.Magnetik madde üzerine sarmal bir şekilde sarılan telden geçirilen bu elektrik akımı, demir çubuğun bir ucunda çekme, diğer ucunda ise itme kuvveti meydana getirir. Bu tipik olarak bir mıknatısın gösterdiği özelliktir dolayısıyla elektrik akımı yoluyla elde edilen mıknatıslara “elektromıknatıs” denir.Elektromıknatıslar doğal mıknatısların bütün özelliklerini taşırlar. Doğal mıknatısgibi N ve S olmak üzere iki kutbu vardır ve bu kutuplar arasında manyetik alan kuvvet çizgileri yani manyetik alan oluşur. Manyetik alan kuvvet çizgileri doğal mıknatıslardaki gibi N’den S’ye doğrudur.



Şekil 3.2:Elektromıknatısta Akıma Bağlı Kutup ve Alan Çizgileri.

İletkenden geçen akım yönüne göre elektromıknatısın kutuplarının yönü değişir. Elektromıknatısta meydana gelen alan çizgileri Şekil 3.1'tegösterilmiştir (Carl R.,2015).

Elektromıknatısın bağlı olduğu üretcin kutupları değiştirilirse elektromıknatısın kutuplarının değişmesi sonucu manyetik alanın yönü de değişir.Elektromıknatısın manyetik alanının çekim gücünü arttırmak için magnetik maddeye sarılmış olan iletken telin (bobinin) sarım sayısı veya elektrik akımının şiddeti arttırılmalıdır.

Elektromıknatısın kutupları SAĞ EL KURALI ile bulunur. Sağ elkuralında;

Sağ elin dört parmağı akım yönünü gösterirse, sağ elin baş parmağımanyetik alan yönünü gösterir (Manyetik alan N'den S'ye doğrudur).Sağ elin başparmağı akım yönünü gösterirse (Akım yönü, çizilen elektromıknatıs şekline göre değişkenlik gösterebilir), sağ elin dört parmağının kapanma yönü manyetik alan yönünü gösterir (Manyetik alan N'den S'ye doğrudur).

Bu tez çalışmasında kullanılan elektromıknatıs 15 mHferrit çekirdekli bobin ve 2.54 cm yarı çaplı 40g ağırlıklı baryum-stronyummıknatıs kullanılarak oluşturulmuştur.



### Şekil 3.3: Tez Çalışmasında Kullanılan Zeltom Manyetik Levitasyon Sistemi Elektromıknatısı

#### 3.2 Manyetik Küre

Demir, nikel, kobalt, dispozyum, goddinyum, çelik gibi manyetik özellik gösteren maddelere ferromanyetik madde denir. Bu maddeler sabit mıknatıs yapımında bu sebepten ötürü kullanılırlar. Bunlar zayıf manyetik alanlarda dahi paralel olarak birbirlerine doğrulamaya çalışan atomik manyetik dipoller bulundurulur. Bu tip maddeler manyetik alana tabii tutulduğunda manyetik alan yönünde çok şiddetli olarak mıknatıslanırlar. Ferromanyetik maddeler mıknatıs tarafından kuvvetli olarak çekilirler ve şekilleri çubuk ise asıldıklarında çubuğun uzun eksenini paralel olarak alan doğrultusunda bir moment etkisinde kalır.

Sürekli manyetik dipolmomenti olmayan maddelere diamanyetik maddeler denir. Bu maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve mıknatıslanması mıknatıslayan alanla zıt yönlüdür dolayısıyla kuvvetli bir mıknatıs tarafından hafifçe itilirler. Gümüş, kurşun, Bakır, antimon, bizmut v.b. metaller ve bütün yarı metaller ve organik maddelerin çoğu diamanyetik özelliklidirler. Bu maddeler çubuk şekline sahipken manyetik alana tabii tutulduklarında uzun eksenleri manyetik alanla dik olana kadar bir moment etkisi altında kalırlar.

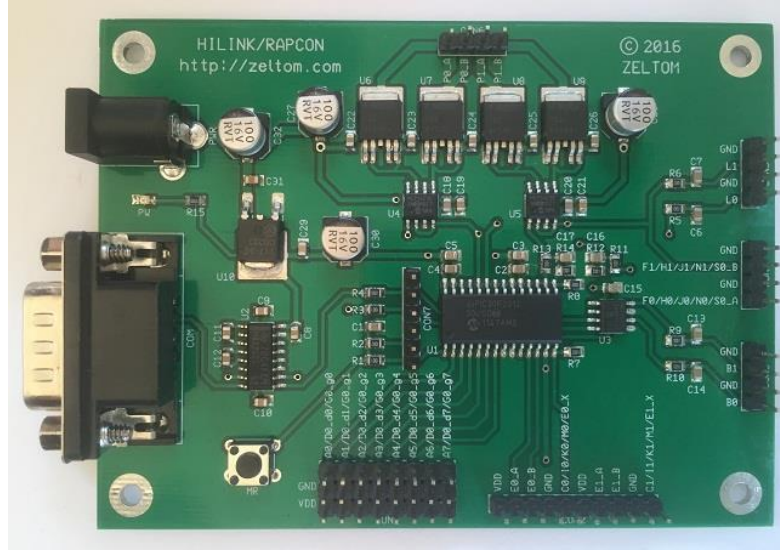
Tez çalışmasında Ni kaplanmış neodyum 30.2g ağırlığında küre mıknatıs kullanılmıştır.



**Şekil 3.4:** Tez çalışmasında kullanılan neodyum mıknatıs küre

### **3.3 HILINK:Gerçek ZamanlıMatlab/Simulink Donanımla Benzetim Kontrol Kartı**

Amerika'daki Zeltom Şirketi tarafından yapılan bu kart fiziksel sistemler ve gerçek zamanlı kontrol sistemlerinin Matlab/Simulink için donanımla benzetim uygulamalarını gerçek zamanlı olarak gerçeklemek üzere endüstriyel ve eğitim amaçlı geniş kullanım alanı olan bir platformdur. Bu platform 8 x 12 bit analog giriş, 2 x 16 bit yakalayıcı giriş, 2 x 16 bit enkoder giriş, 1 x 8 bit dijital giriş, 2 x 12 bit analog çıkış, 2 x 16 bit frekans çıkışı, 2 x 16 bit tetikleyici çıkış ve 1 x 8 bit dijital çıkış içermektedir bunlara ek olarak. Harici ağır yükleri sürmek için 5 Amper kapasiteli iki H-Köprüsüde bulundurmaktadır. Kart arayüzü seri port(RS232) üzerinden Matlab/Simulink kullanarak bilgisayar ile iletişim sağlamakta ve 3.8 KHz örnekleme oranına sahiptir. Bu platform ile birlikte Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target uygulamaları için Analog giriş, dijital giriş, enkoder giriş, yakalama giriş, analog çıkış, frekans çıkış, dijital çıkış ve tetikleme çıkış blokları için oluşturulmuş Zeltom Şirketi tarafından temin edilen simulink kütüphanesi kullanılmaktadır.



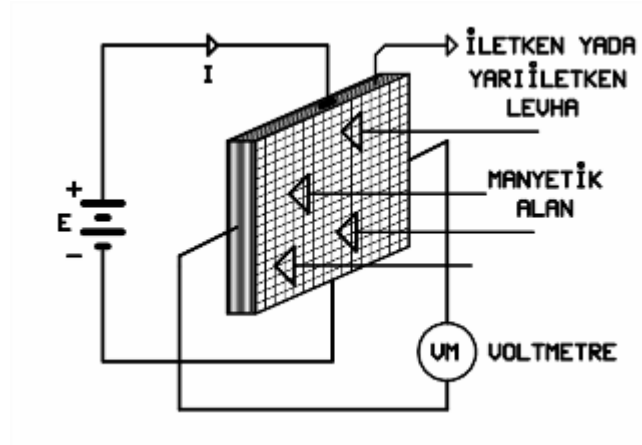
Şekil 3.5:HILINK Gerçek Zamanlı Matlab/Simulink Benzetim Kontrol Kartı.

### 3.4 Hall Etkisi Algılayıcısı

1879'da Edwin Hall tarafından keşfedilen manyetik alan içerisinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken doğrultusunda gerilim (Hall gerilimi) meydana gelmesi olayına Hall etkisi denir ve bu etkiye dayalı olarak çalışan algılayıcılara Hall etkisi algılayıcısı denmektedir. Gerilimin doğrultusu iletken üzerinden geçen akımın ve manyetik alanın yönüne diktir.

İki sürekli mıknatıs arasında iletken dikey olarak monte edilir. Hall elemanları besleme voltajı uygulanan iletkenin elektronları besleme akımı ve mıknatıslara karşı dikey olarak saparlar ve bir tarafta elektron fazlalığı oluşurken öteki tarafta ise iki uçta potansiyel farkı oluşturacak şekilde elektron azlığı olur. Oluşan gerilim, akım ve manyetik alan yoğunluğu ile orantılıdır. Sabit akımda ise çıkış manyetik alan yoğunluğu ile orantılı olacaktır. Hall etkisi algılayıcıda manyetik alana bağlı olarak gerilim oluşacaktır böylelikle. Buna ek olarak oluşan bu gerilim yeterince büyüklükte olmadığı için kullanımdan önce güçlendirilir.

<http://www.ilkerguven.com/elektrik/hall-effect-alan-etkili-sensor.html>



**Şekil 3.6:**Hall Etkisi Algılayıcıda Manyetik Alana Bağlı GerilimOluşumu.

Endüstrideki yaygın kullanım alanları;manyetik kod okuma,akım algılama, motor kontrol,seviyesi ve akış algılama,pozisyonalgılama,enkoder,metaldedektörü,titreşimalgılama,anahtarlama,sıvı basınç-ağırlık olarak sayılabilir.

Bu tez çalışmasında 4.5V-5.5V gerilim aralığı ve 5.6 mA çalışma akımlı 50V/T hassaslıktabesleme gerilimi ile girişi çıkışı doğrudan orantılı çıkış gerilimi  $50 \cdot T + 2.5$  V olan Halletkisisensörü kullanılmıştır.





**Şekil 3.7:**Günlük yaşamda kullanılan bir hall etkisi sensörü(TLE4905L)

## 4. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN VE UYGULANAN KONTROL METODLARININ BENZETİMİ

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan manyetik levitasyon sisteminin kontrolü için daha önce 2.5,2.6 ve 2.7 numaralı bölümlerde matematiksel olarak modellenmiş olan kontrol metodlarının Matlab/Simulink benzetimleri anlatılmış elde edilen sonuçlar ise daha sonraki bölümde gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları yapılırken kullanılan parametreler aşağıdaki tabloda gösterilmiş olup Zeltom Kullanıcı El Kitabındaki değerler kullanılmıştır. Bu çalışmalar yapılırken farklı konumlarda sistemin kararlılığının sağlanması ve manyetik kürenin dengede tutulması amaçlanarak bütün simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Tablo 4.1: Magnetik Levitasyon Sistemi Benzetiminde Kullanılan Parametre değerleri.

$R = 1.7 \Omega$ ,	$L = 15.03 \times 10^{-3} \text{H}$	$m = 41.30 \times 10^{-3} \text{kg}$
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	$k = 3.10 \times 10^{-6} \text{kg m}^5/\text{s}^2/\text{A}$	$\alpha = 2.48 \text{ V}$
$\beta = 4.25 \times 10^{-4} \text{Vm}^2$	$\gamma = 0.31 \text{ V/A}$	$u_e = 1.79 \text{ V}$
$x = 2.00 \times 10^{-2} \text{m}$	$x_{2e} = 0.00 \text{ m/s}$	$x_{3e} = 1.05 \text{ A}$
$z = 2.00 \times 10^{-2} \text{m}$	$y_e = 3.87 \text{ V}$	$w_e = 0.00 \text{ V}$

Şekil 3.1 de sistem modeli görülen elektromanyetik askı sistemi, havada asılı halde tutulacak olan bir küre mıknatıs ,bir bobin (elektromıknatıs) ve bir Hall-effect algılayıcıdan (sistem çıkışı) oluşmaktadır. Burada  $R$  bobin direncini ( $\Omega$ ),  $L$  bobin endüktansını (H),  $i$  bobin akımını (A),  $f$  bobinin küre mıknatısa uyguladığı kuvveti ( $\text{m/s}^2$ ),  $m$  küre mıknatısın kütlesini (Kg),  $g$  yerçekimi katsayısını ( $\text{m/s}^2$ ),  $d$  bobinin altı ile küre mıknatıs arasındaki uzaklığı (m), ve  $e$  Hall-effect algılayıcının ürettiği çıkış gerilimini (V) ifade etmektedir. Tabloda belirtilen  $k$  sistemin geometrik yapısına bağlı olarak oluşan bir parametredir. Simülasyon benzetim çalışmalarında herhangi bir gerilim saturasyon veya sınırlama işlemi kullanılmamıştır.

Sistem çıkışı olan Hall-effect çıkış gerilimi:

$$e = \frac{\beta}{d^2} + \gamma i + \alpha \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlanabilir (Smaili ve Mrad 2008). Burada  $\gamma$ ,  $\beta$  ve  $\alpha$  parametreleri Hall-effect algılayıcıya ve sistemin geometrik özelliklerine bağlıdır ve gürültü ihmal edilmiştir.

Burada  $y=e$  olarak kabul edilirse:

$$y = \frac{\beta}{x_1^2} + \gamma x_3 + \alpha \quad (4.2)$$

Pozisyon bilgisi denklem 4.2 şeklinde elde edilir (Zeltom 2015).

Sistemin 2.30 ve 2.31'de elde edilen durum matrisleri tablo 4.1 de belirtilen parametre değerleri kullanılarak oluştururlursa:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1.4709 \times 10^3 & 0 & -9.3716 \\ 0 & 0 & -113.2450 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 66.2252 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Hall etkisi algılayıcısındaki gerilime karşılık denge durumu gerilimler arasındaki fark kullanıldığında elde edilen pozisyon bilgisiyle C ve D matrisleri denklem 4.5 ve 4.6 daki gibidir:

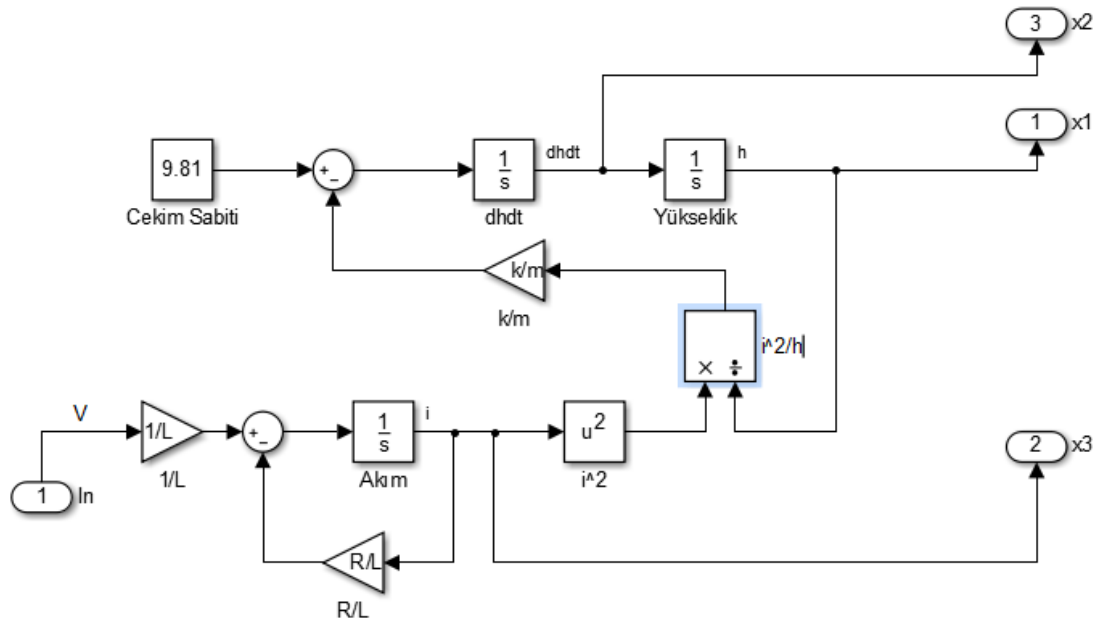
$$C = \begin{bmatrix} -106.1254 \\ 0 \\ 0.3100 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$D = [1 \ 0] \quad (4.6)$$

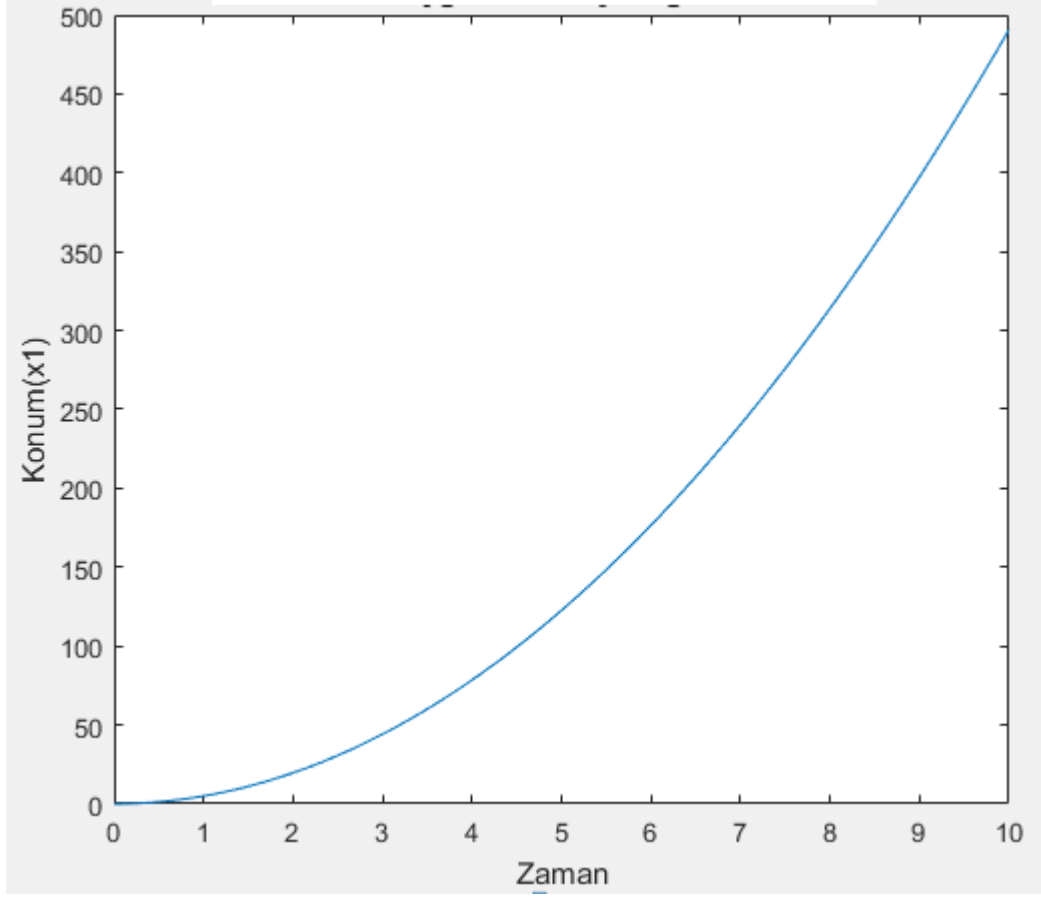
#### 4.1 Manyetik Askı Sistemi Benzetim Çalışması

Bölüm 2.4'te doğrusallaştırılmış durum denklemleri gösterilen manyetik askı sisteminin Matlab/Simulinkbenzetimi şekil 4.1'de gösterildiği gibi yapılmıştır.

Benzetimi şekil 4.1'de gösterilen Matlab/Simulink blokları kullanılarak oluşturulan manyetik askı sistemi daha sonraki bölümlerdeki kontrol metodlarıuygulanırken sistem bloğu haline getirilerek kullanılmıştır.



Şekil 4. 1:Manyetik Askı Sistemi Matlab/SimulinkBenzetimi .

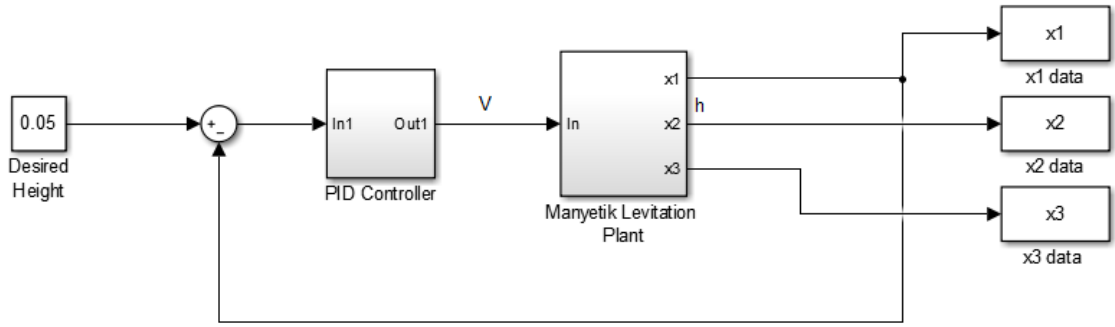


**Şekil 4.2:**Kontrol Metodu uygulanmamış Maglev Sistemi Konum Değişimi Grafiği

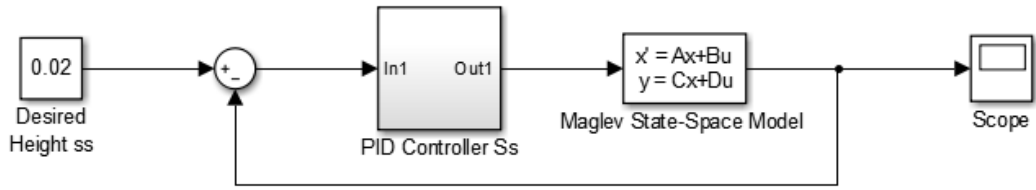
Sistemin yüksek kararsızlığı yapılan benzetim simülasyonunda da gözükmektedir.

#### **4.2 Manyetik Askı Sistemi PID Benzetim Çalışması**

PID çalışması yapılırken sadece oluşturulan manyetik levitasyonMatlab/Simulink benzetim çalışması sırasında sadece blok sistemi ile değil sistemin doğrusallaştırılmış durum matrisleri kullanılarak Matlab'da transfer fonksiyonu elde edilmiş ve bu fonksiyon üzerinden model benzetim simülasyonları yapılmıştır.Yapılan iki farklı modellemeye farklı parametrelerle de sistemin denge halinde tutulabileceği anlaşılmıştır.



Şekil 4.3:Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi.

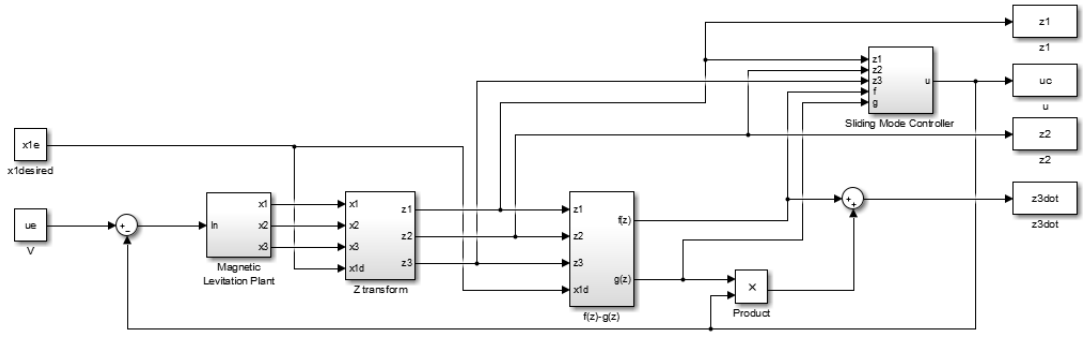


Şekil 4.4:Manyetik Askı Sistemi Durum Uzay Modeli ile PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi.

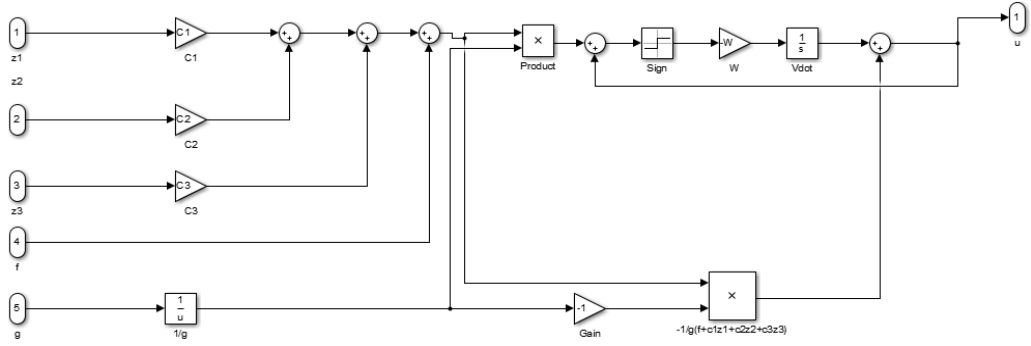
Denge konumu daha yakınlştırılarak seçildiğindeyse Simulink Blokları ile tasarlanmış Şekil 4.1'deki sistem üzerinde PID kontrol yöntemi ile sistemin kararlılığı sağlanamadığı için sistem denklem 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 kullanılarak Matlab/SimulinkState Space bloğu ile sistemin Durum-Uzay modeli üzerinden sistem simülasyonu yapılmıştır.

### 4.3 Manyetik Askı Sistemi Kayan Kipli Kontrol Benzetim Çalışması

Bu bölümde daha önce 2.5 numaralı başlık altında matematiksel olarak tasarlanmış olan Manyetik Askı Sisteminin Kayan Kipli Kontrolünün Matlab/Simulink benzetim simülasyonugösterilmiştir.Bu benzetim çalışmasında da daha önce belirtilen durum denklemlerine göre sistemin  $h=11\text{mm}$  denge konumundaki kontrolü sağlanarak mıknatıs küre hızı ve hız değişimi olan ivme değerinin 0 olması amaçlanmıştır.



**Şekil 4.5:**Bölüm 2.2.2.2’de modellenen Kayan Kip Kontrolör Simulink benzetimi.



**Şekil 4.6:**Anahtarlama Yüzeyi(SwitchingSurface)Benzetimi.

Simulasyonlar yapılırken farklı  $c_1, c_2, c_3$  değerleri için elde edilen konum ve ivme değişimi sonuçları bir sonraki bölümde gösterilmiştir, kullanılan değerler için mıknatıs kürenin hız ve hız değişiminin sifıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.  $c_1, c_2, c_3$  sabitlerinin değerleri sistem kutupları ve buldukları bölgeler dikkate alınarak kararsızlığı giderecek şekilde seçilmiştir.

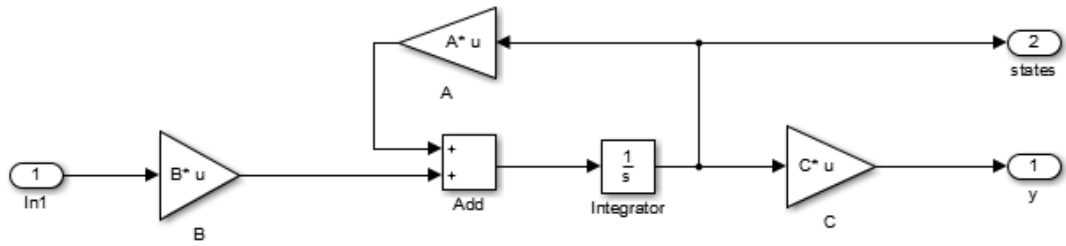
#### 4.4 Manyetik Askı Sistemi Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol Benzetim Çalışması

Kararsız olan sistemin açık çevrim kutupları  $-113.2450$  ve  $\pm 38.3523j$ 'tedir bu sistemi stabilize etmek için sistem kutupları  $-10$  ve  $50 \pm 50j$  'ye yerleştirilmelidir bunu elde etmek için  $-100$  de ek bir kutup seçilmiştir bölüm 2.7'de anlatılan metod kullanılarak durum geri besleme matrisi  $K$  2.76 yardımıyla hesaplanarak :

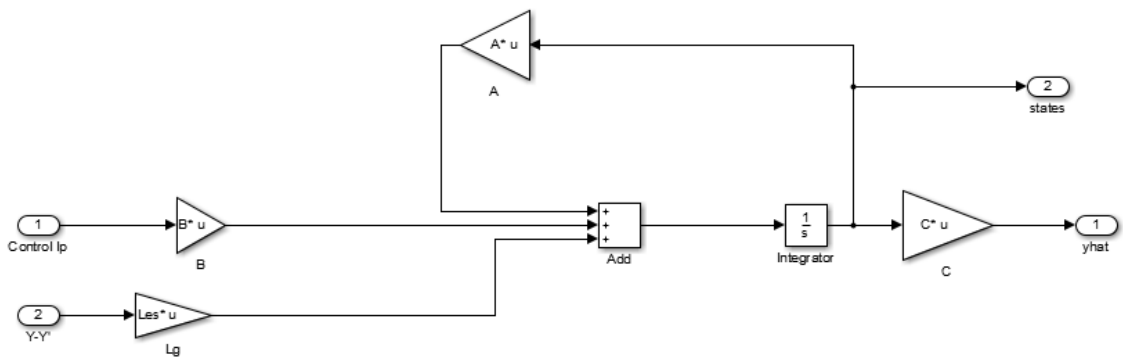
$$K = [341.2612 \quad 12.0375 \quad 0.0490]$$

olarak bulunmuştur.

Şekil 4.7'deki Manyetik levitasyon sistemi tasarımı ve Şekil 4.8'deki gözetleyici tasarımı kullanılarak Şekil 4.9'deki Durum Gözetleyici Kontrol sistemi tasarlanmıştır.

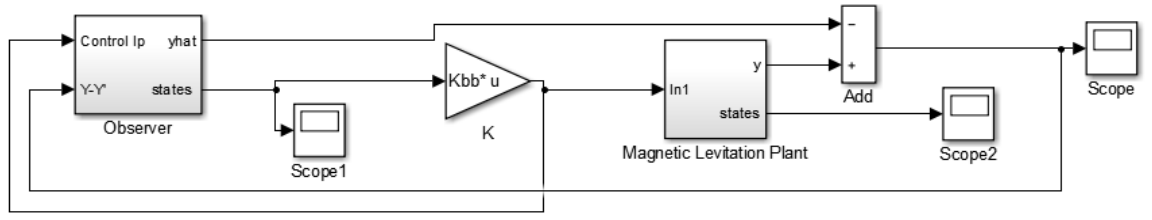


Şekil 4.7: Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol için Manyetik Levitasyon Sistemi Benzetimi.



Şekil 4.8: Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı Kontrol Benzetimi.





**Şekil 4.9:**Durum Geribeslemeli Gözetleyici Tabanlı KontrolBenzetimi.

## 5. BULGULAR

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan manyetik levitasyon sisteminin kontrolü için daha önce 4.1,4.2,4.3 ve 4.4 numaralı bölümlerdeMatlab/Simulink benzetimleri yapılmış olan kontrol metodlarının sisteme uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

### 5.1 MANYETİK ASKI SİSTEMİNE UYGULANAN KONTROL METOTLARININ SONUÇLARI

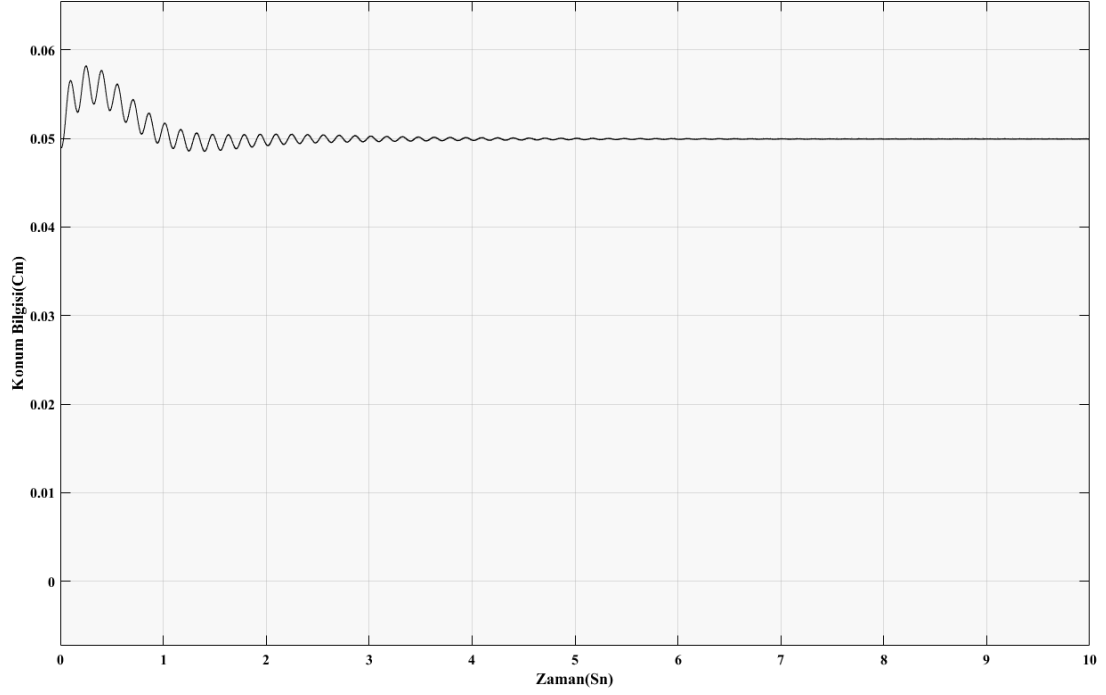
Daha önce Matlab/Simulink Benzetimi simülasyonu yapılan kontrol metotlarının bu benzetim sonuçları ve sistem uygulaması sonuçları bu bölümde karşılaştırmalı olarak gösterilerek anlatılmış, karşılaşılan olumsuzluklara bu bölümde değinilmiştir.Bütün sistem uygulamaları ve simülasyon çalışmalarında sabit referans takibi kullanılmıştır.

#### 5.1.1 Manyetik Askı Sistemi PID Benzetim Çalışması

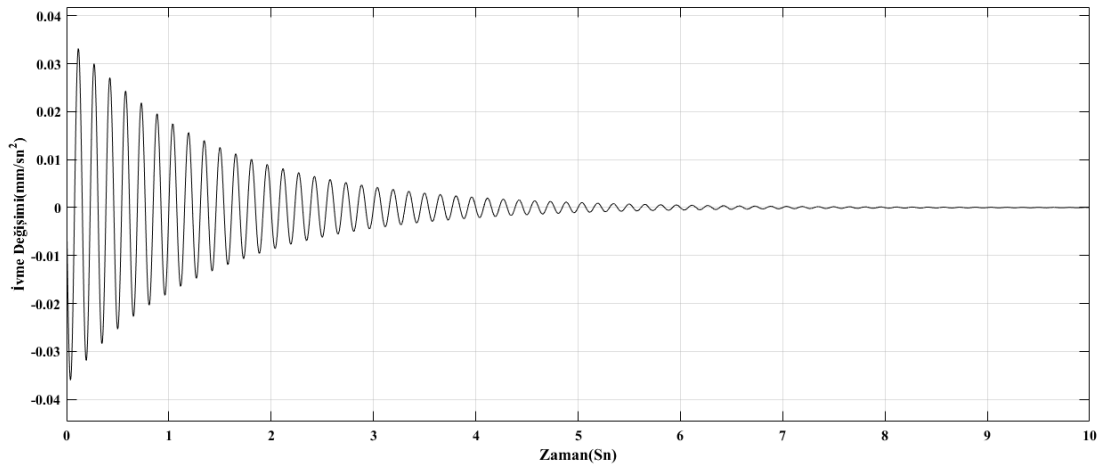
Bu bölümde sistem için bölüm 4.2 de Matlab/Simulink benzetimi simülasyon sonuçları ve sistem için gerçek zamanlı yapılan uygulama sonuçları verilerek karşılaştırılmalı olarak anlatılmıştır.

Sistemin istenildiği gibi kontrol edilebilmesi için P,I,D parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekir. Kontrolör parametreleri bölüm 4.1’de anlatılan tasarım yöntemi kullanılarak sistemin gürbüzlüğü ve kararlı duruma geçiş süresi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.Şekil 4.1’deki Manyetik Levitasyon Sistemi ile yapılan simülasyonda PID kontrolör için kapalı çevrim için istenilen  $w_n=1.4$  ve  $\zeta=0.8$  değerlerinde  $P= 28.14I= 65.8D= 5.03$ değerleri kontrolör parametreleri olarak kullanıldığındaMatlab/Simulink Benzetimi simülasyon sonuçları Şekil 5.1, 5.2,5.3 ile gösterilen grafiklerde görüldüğü gibi teorik olarak sistemin kararlılığı ve kontrolü sağlanmıştır.Sistem  $h=20$  mm denge konumuyla simülasyon gerçekleştirilmiştir,

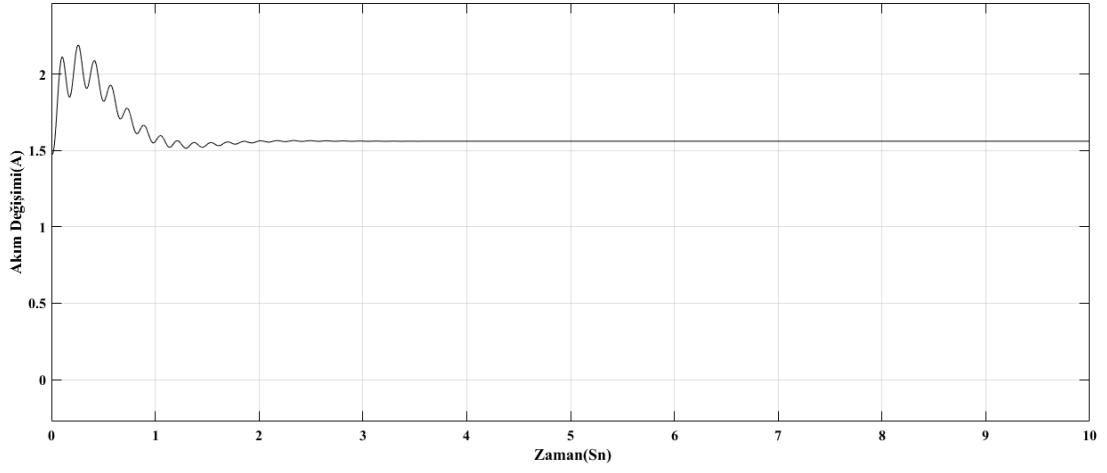
tasarım için  $h=12$  mm ve daha yakın denge konumlarıyla kontrol sağlamada Matlab/Simulink benzetimi için olumlu sonuçlar alınmadığı için sistem üzerinde gerçek zamanlı olarak denenmemiştir.



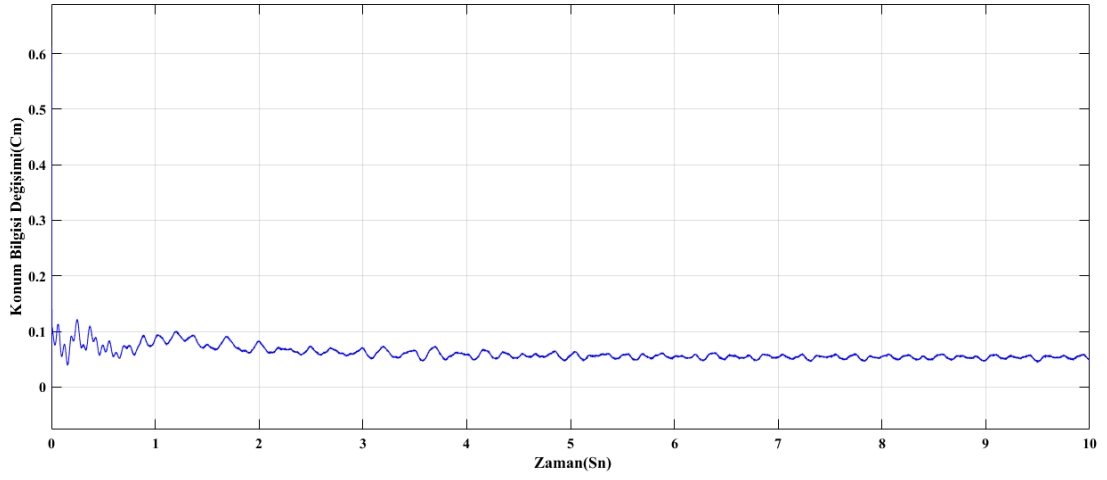
**Şekil 5.1:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi Konum Değişimi Grafiği( $h=20$ mm).



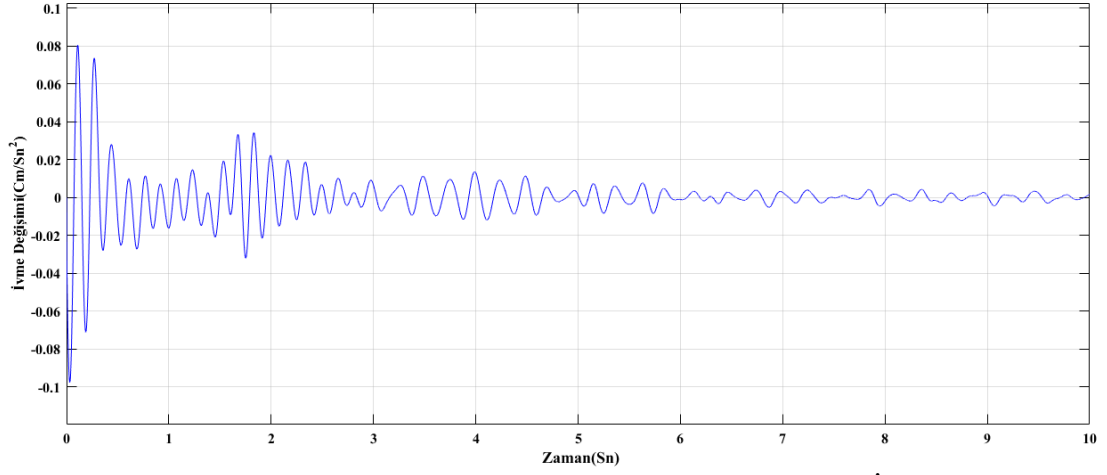
**Şekil 5.2:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi İvme Değişimi Grafiği( $h=20$ mm)



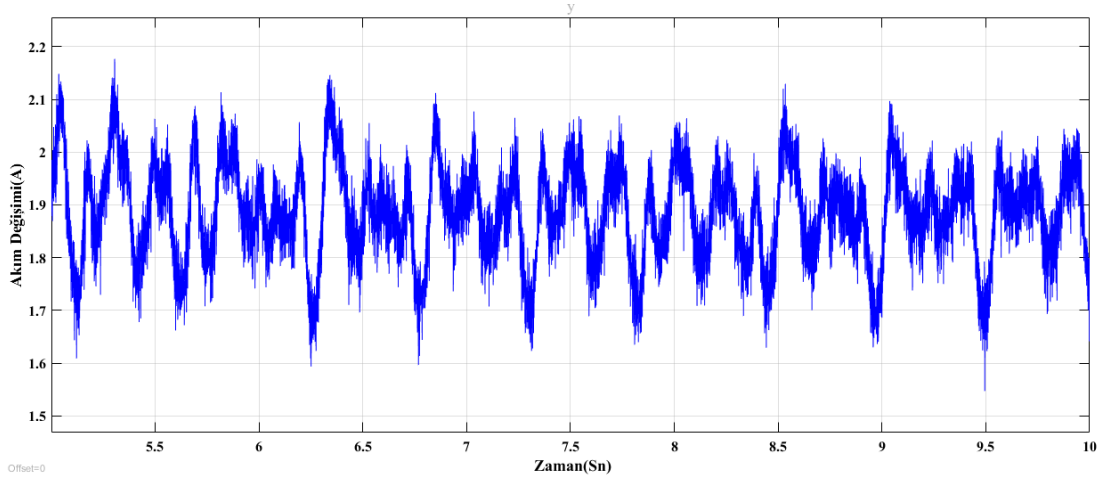
**Şekil 5.3:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol Matlab/Simulink Benzetimi Akım Değişimi Grafiği(h=20mm)



**Şekil 5.4:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulamasıKonum Değişimi Grafiği(h=20mm)



**Şekil 5.5:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulamasıİvme Değişimi Grafiği(h=20mm).

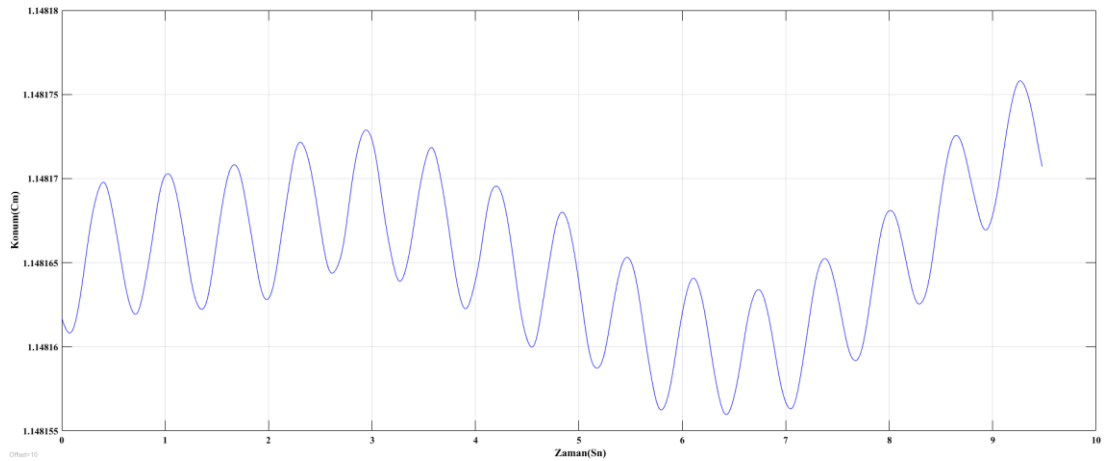


**Şekil 5.6:**Manyetik Askı Sistemi PID kontrol sistem uygulamasıAkım Değişimi Grafiği(h=20mm).

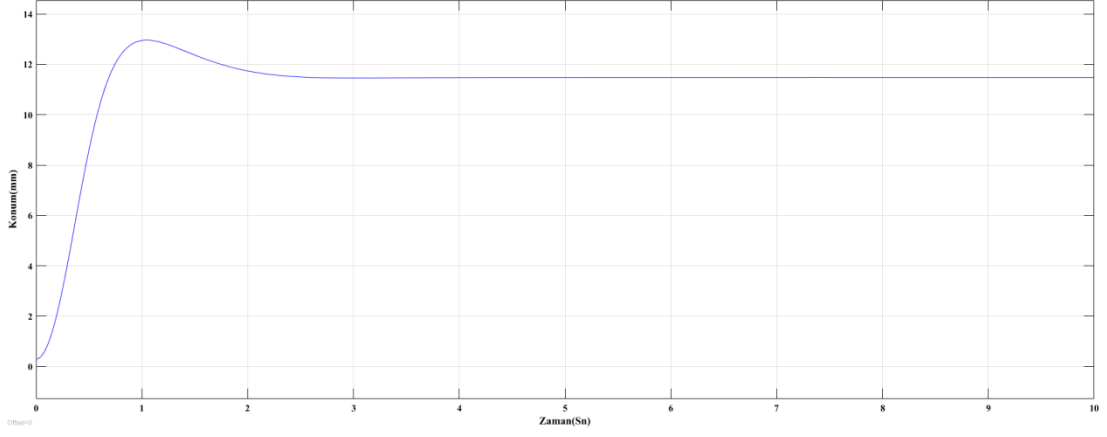
### 5.1.2 Manyetik Askı Sistemi Kayan Kipli Kontrol Çalışması Benzetimi Ve Sonuçları

Bu bölümde daha önce 4.3 numaralı başlık altında simülasyonu yapılmış olan Manyetik Askı Sisteminin Kayan Kipli Kontrolünün sistem üzerine uygulamaları elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bu benzetim çalışmasında da daha önce belirtilen durum denklemlerine göre sistemin  $h=11$  mm denge konumunda tutulması hedeflenerek sistem tepkisi mıknatıs küre hızı ve hız değişimi olan ivme değeri gözlemlenmiştir.

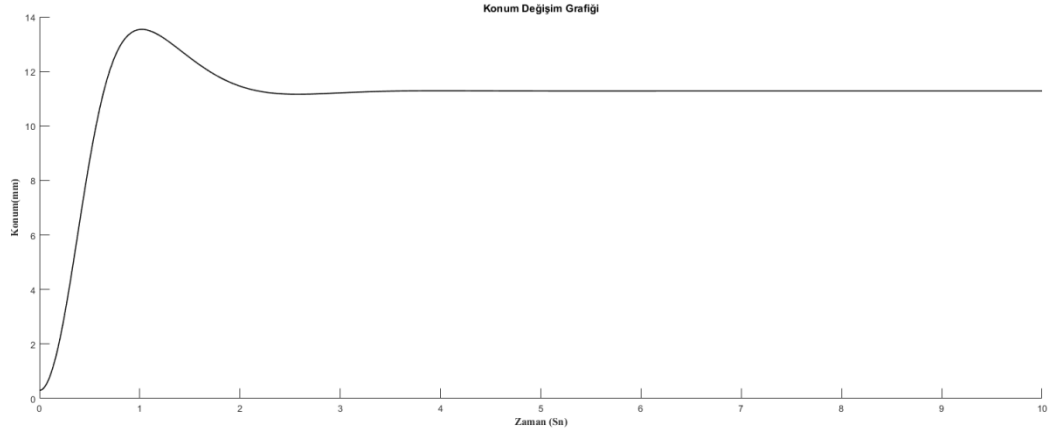
Sistem uygulamaları ve Matlab/Simulink simülasyon Benzetimi için farklı  $c_1, c_2, c_3$  değerleriyle elde edilen sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir kullanılan değerler için mıknatıs kürenin hız ve hız değişiminin simülasyonlarda gözlemlendiği gibi sifıra yakınsadığı gözlemlenmiştir. Ancak denge konumu olarak belirlenen  $h=11$  mm için simülasyon ve gerçek zamanlı uygulama çalışması farklı sonuçlar vermiştir sistem tam olarak istenilen konum olan  $h=11$  mm de değil gerçek zamanlı çalışmada  $11.148$  mm de küçük bir sapma ve osilasyonla dengede tutulabilmiştir yapılan simülasyon çalışmasına göre ise sistemin  $11.125$  mm'de dengede tutulabileceği sonucunda ulaşıldıktan sonra gerçek zamanlı olarak sistem uygulamaları denenmiştir. Önerilen Kayan kipli kontrol yöntemiyle sistem kontrol edilmiştir.



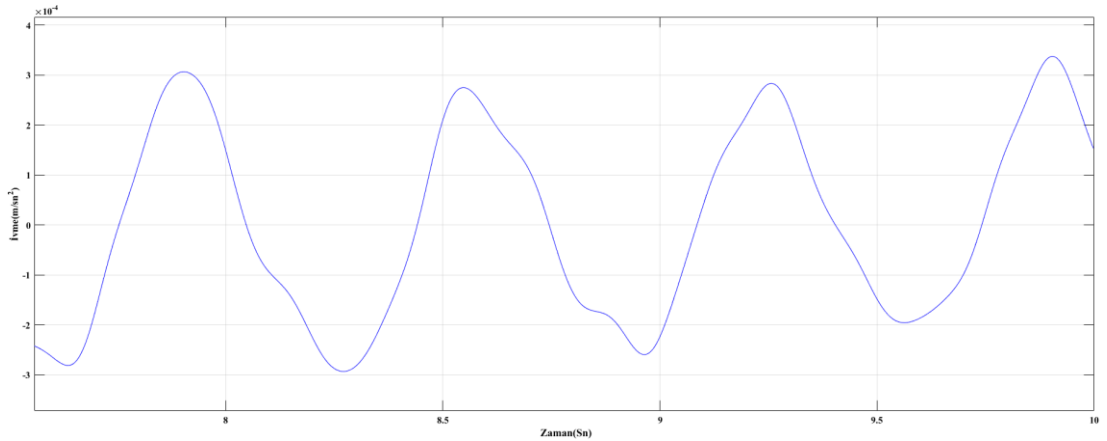
**Şekil 5.7:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3 = 44.2945$  Değerleri için sistem uygulaması yaklaşılmış  $z_1$ (konum) değişim grafiği.



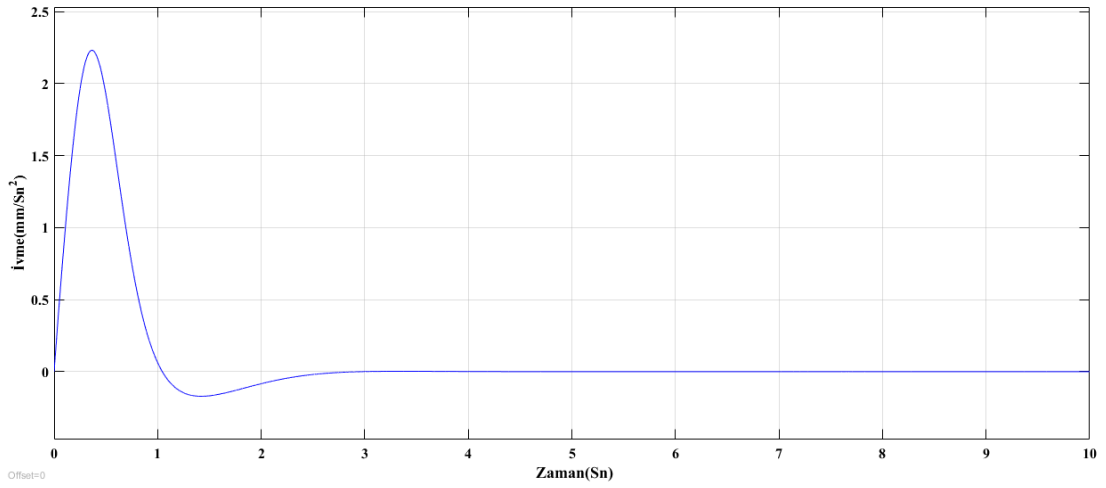
**Şekil 5.8:**  $c_1 = -44.2945$ ,  $c_2 = +160.3460$ ,  $c_3=44.2945$  Değerleri için sistem Uygulaması  $z_1$ (konum) değişim grafiği.



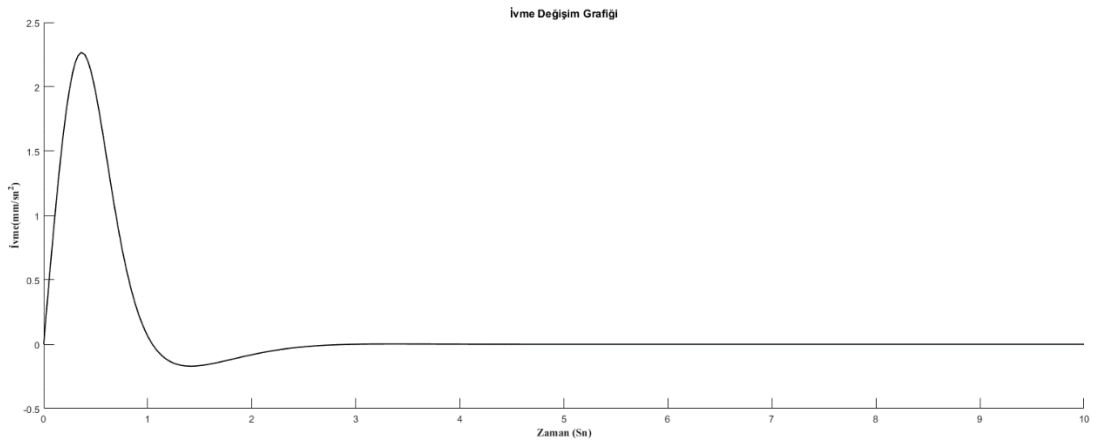
**Şekil 5.9:**  $c_1 = -44.2945$ ,  $c_2 = +160.3460$ ,  $c_3=44.2945$  Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon  $z_1$ (konum) değişim grafiği.



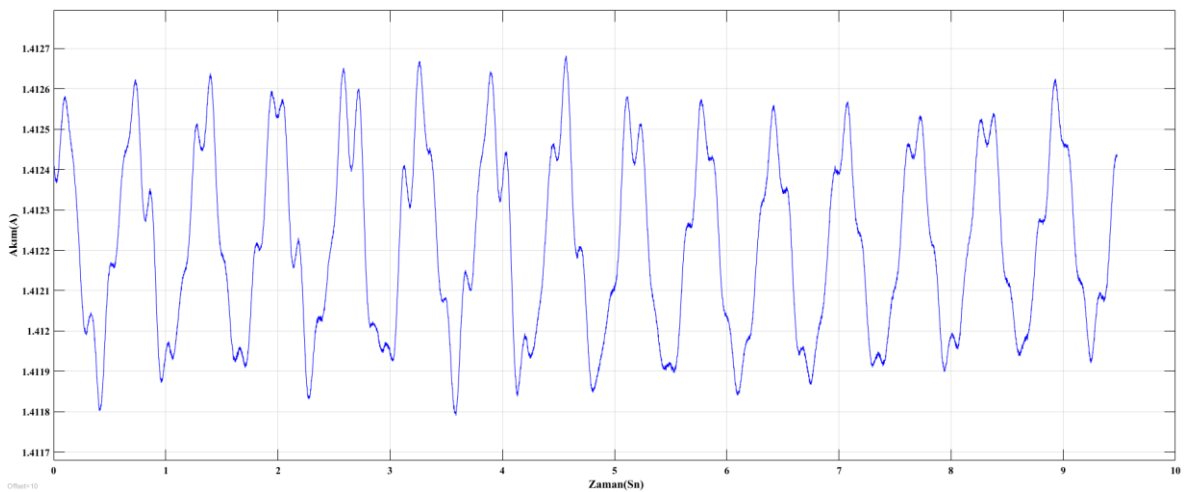
**Şekil 5.10:**  $c_1 = -44.2945$ ,  $c_2 = +160.3460$ ,  $c_3=44.2945$  Değerleri için Sistem uygulaması yakınlaştırılmış  $z_2$ (ivme) değişim grafiği.



**Şekil 5.11:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$  Değerleri için Sistem uygulaması yakınlştırılmış  $z_2$ (ivme) değişim grafiği.

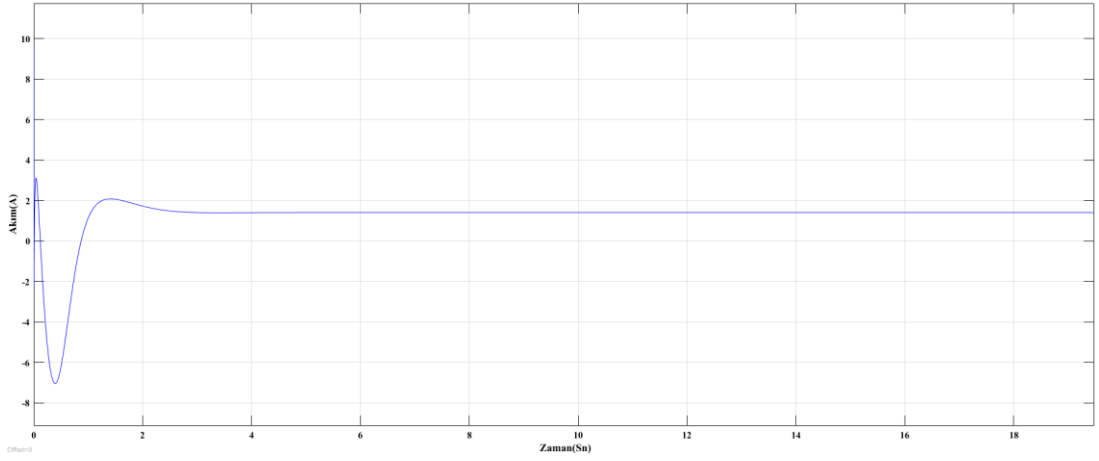


**Şekil 5.12:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$  Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simulasyon  $z_2$  (ivme)değişim grafiği.

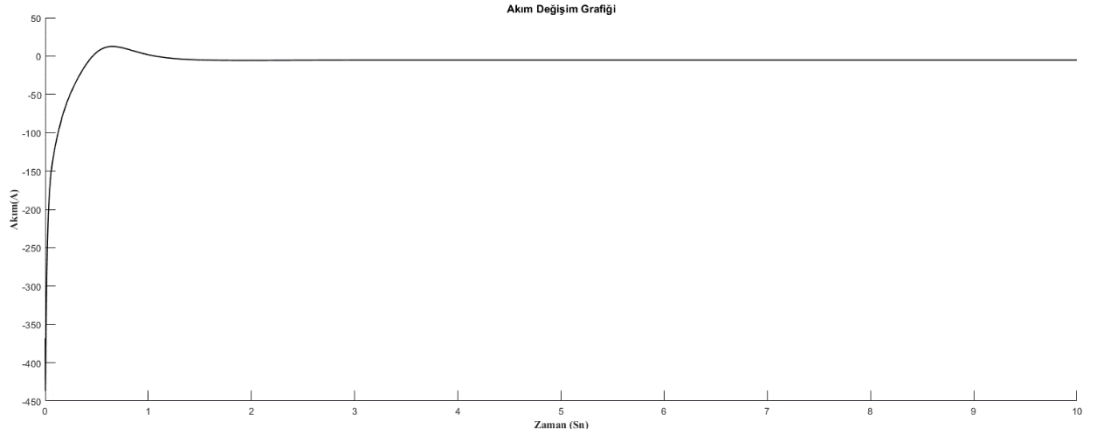


**Şekil 5.13:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$  Değerleri için sistem uygulaması yakınlştırılmış  $z_3$ (akım)değişim grafiği.

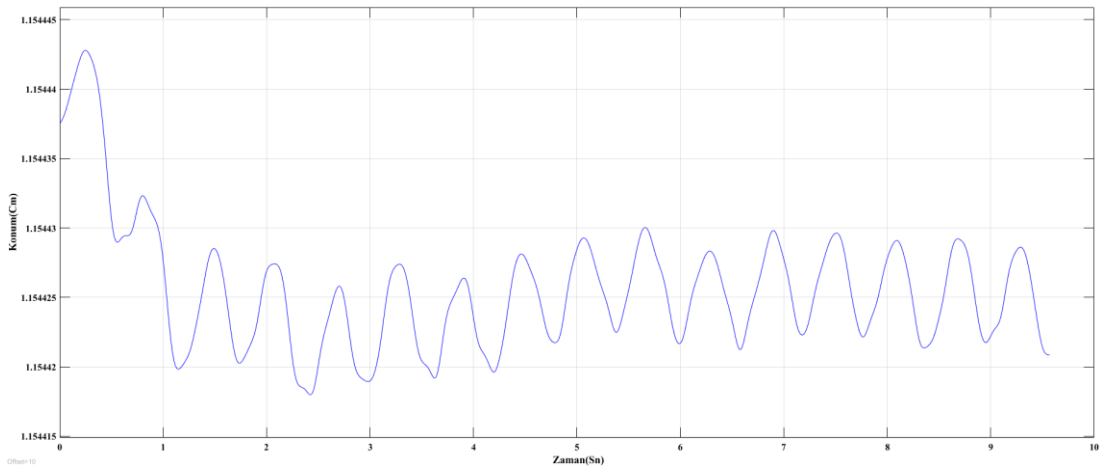




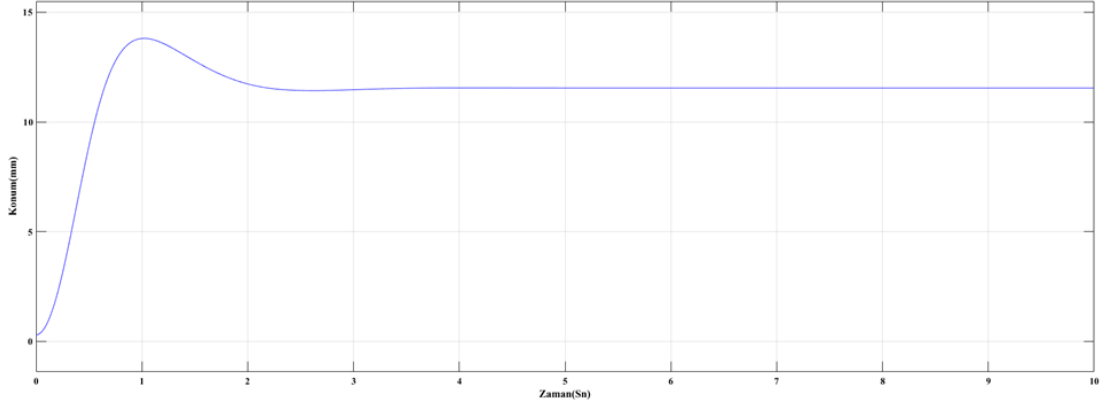
**Şekil 5.14:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$  Değerleri için sistem uygulaması  $z_3$ (akım)değişim grafiği.



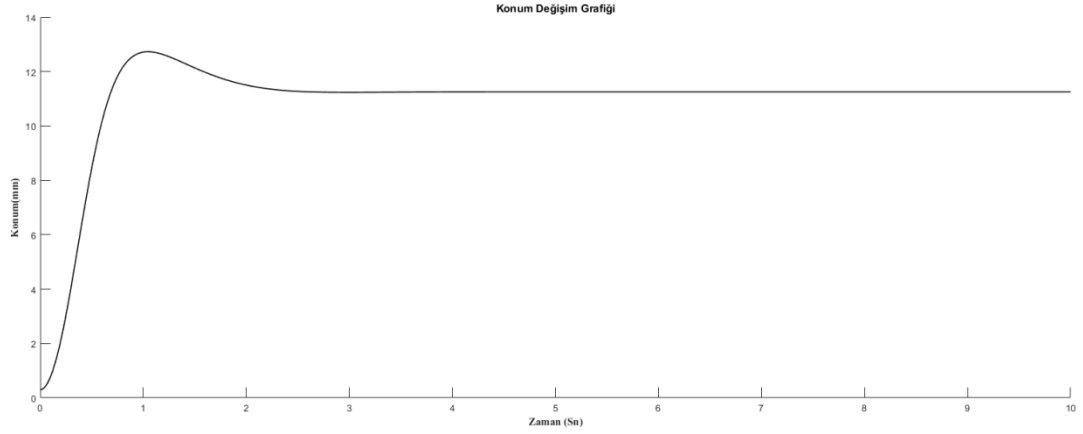
**Şekil 5.15:**  $c_1 = -44.2945, c_2 = +160.3460, c_3=44.2945$  Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyonu  $z_3$  (akım)değişim grafiği.



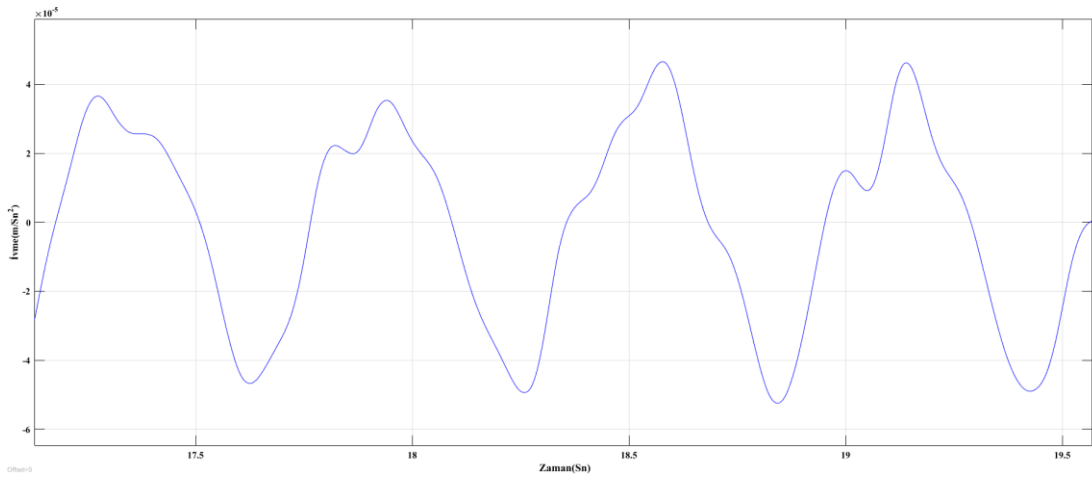
**Şekil 5.16:**  $c_1 = -38.3523, c_2 = +113.2450, c_3=38.3523$  Değerleri için yakınlaştırılmış için sistem uygulaması  $z_1$ (konum) değişim grafiği.



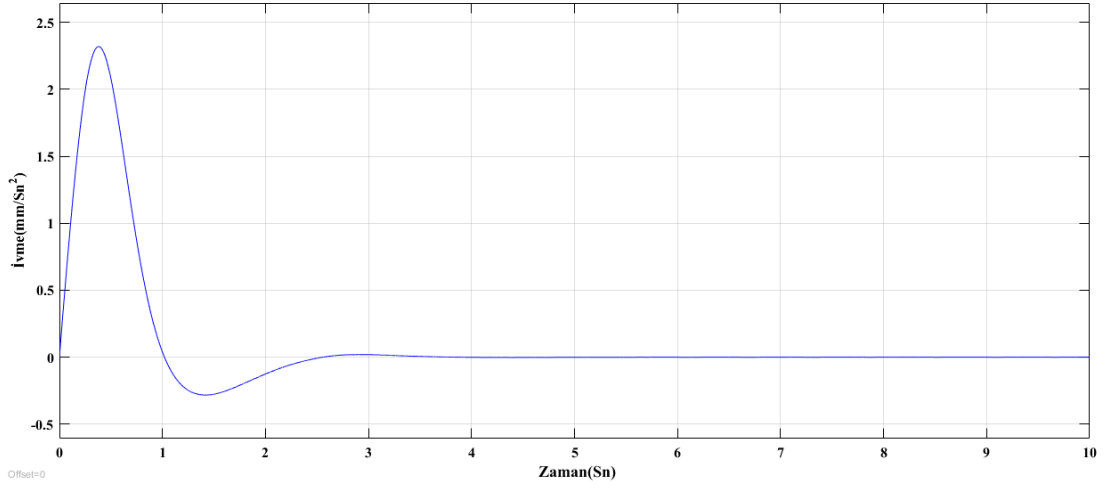
**Şekil 5.17:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için sistem uygulaması  $z_1$ (konum) değişim grafiği.



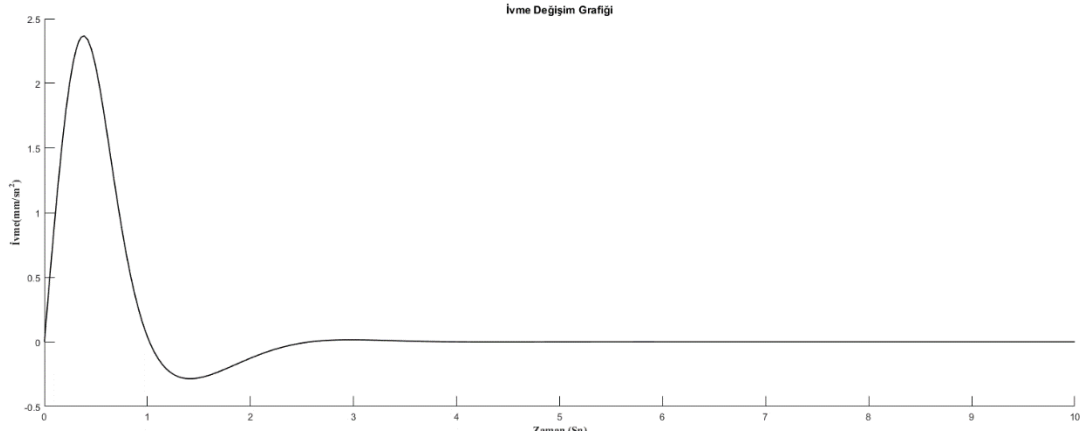
**Şekil 5.18:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için  $z_1$  Matlab/Simulink Benzetimi simülasyon(konum)değişim grafiği.



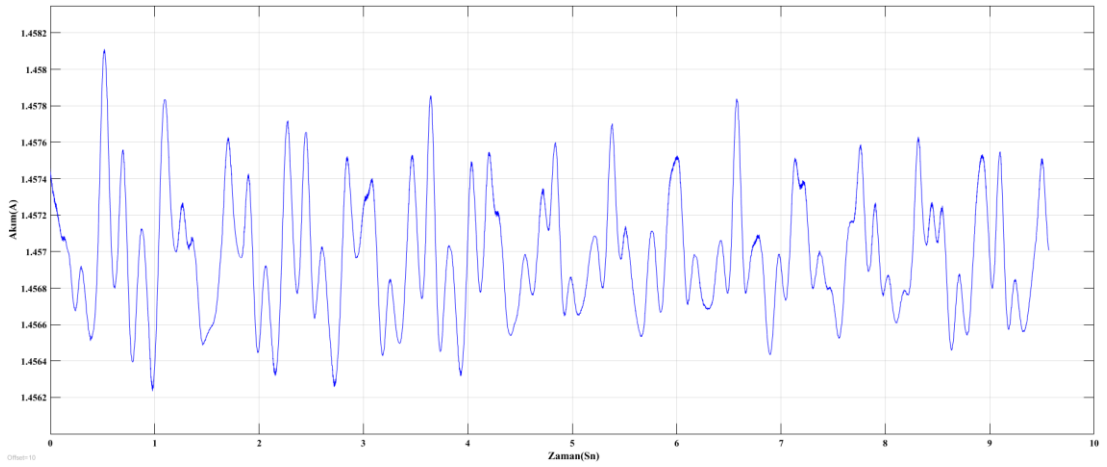
**Şekil 5.19:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için sistem uygulaması yakınlaştırılmış  $z_2$ (ivme) değişim grafiği.



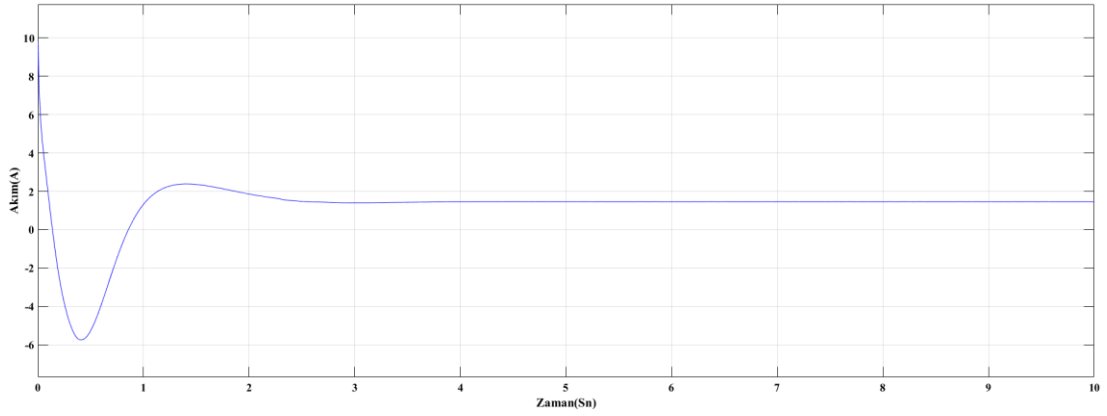
**Şekil 5.20:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için sistem uygulaması  $z_2$ (ivme) değişim grafiği.



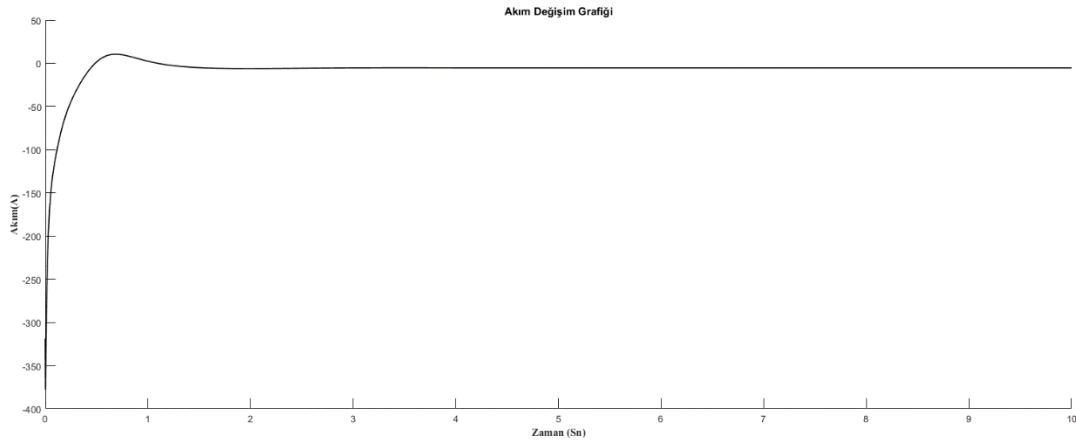
**Şekil 5.21:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için Matlab/Simulink Benzetimi simülasyonu  $z_2$ (ivme)değişim grafiği.



**Şekil 5.22:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3=38.3523$  Değerleri için yakınlştırılmış  $z_3$ (akım)değişim grafiği.



**Şekil 5.23:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3 = 38.3523$  Değerleri için sistem uygulaması  $z_3$ (akım) değişim grafiği.

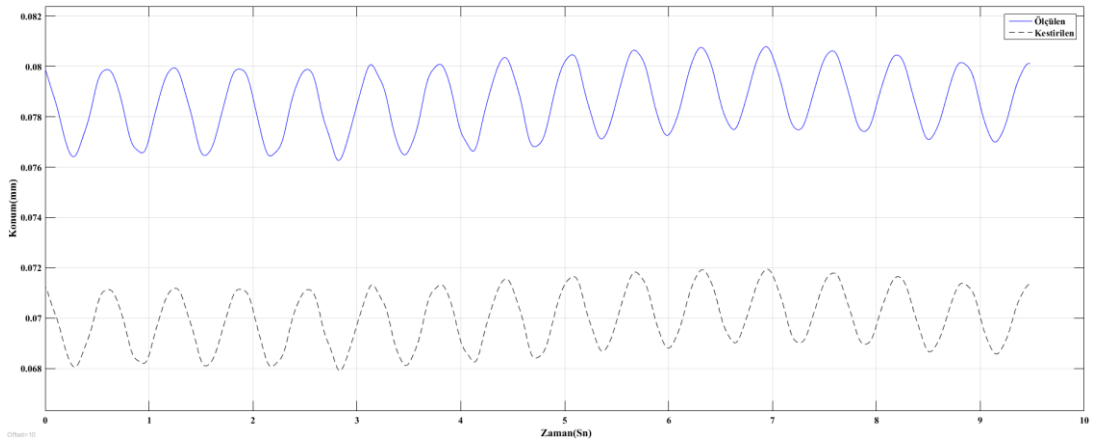


**Şekil 5.24:**  $c_1 = -38.3523$ ,  $c_2 = +113.2450$ ,  $c_3 = 38.3523$  Değerleri için  $z_3$  Matlab/Simulink Benzetimi simülasyonu (konum) değişim grafiği.

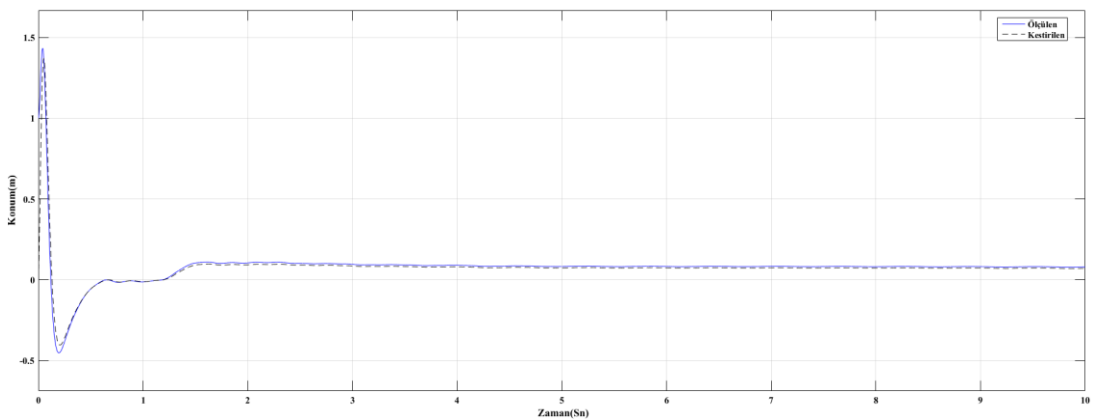
### 5.1.3 Manyetik Askı Sistemi Durum Geribeslemeli Gözetleyici Temelli Kontrol Benzetim Çalışması

Bölüm 4.4'de benzetimi yapılan durum gözetleyici tabanlı kontrol uygulaması sonuçları aşağıdaki Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32 'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar gözetleyicinin sistemi simülasyonlarda elde edilenden farklı takip ettiği gözlemlense de gözetleyicinin kestirimlerinin yeterince iyi olduğu ve sistem hatasının sıfıra yakınsayacak şekilde sistemi takip ettiği gözlemlenmiştir. Sistem kararlı halde iken manyetik küre çok küçük osilasyonlar yaparak bu kontrol metoduyla havada askıda tutulabilmiştir.

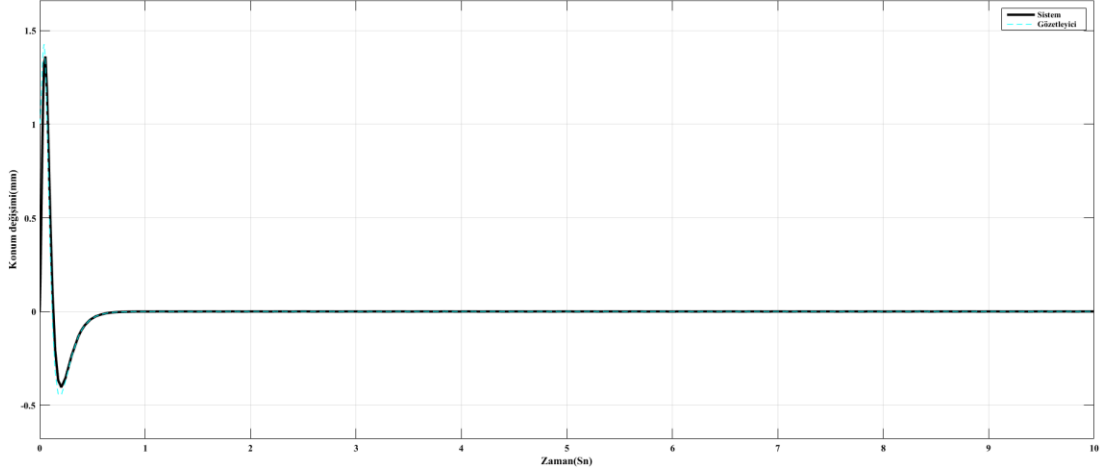
Şekil 5.26,5.27 ve 5.28 ‘ de yapılan gözlemlere göre sistemin simülasyon sonucuyla küçük farklılıklar olsada gözetleyicinin kestirimlerinin çok yakın olduğu ve sistemin Manyetik Küreyi küçük bir sapma ile 20 mm’de dengede tutabildiği ve sabit referans takibi yapılabildiği gözlemlenmiştir.Görülen herhangi bir koşulla başlayan sistemin durum değişkenlerinin sıfıra gitmesi Manyetik Levitasyon Sisteminin tamamıyla kontrol edildiği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte şekillerde görülen kestirimi yapılan ve ölçülen durum değerleri değişkenlerinin birbirine yakınsaması ve aralarındaki farkın sıfır olması tasarlanan gözetleyicinin başarılı bir şekilde sistemi takip ederek kestirim yaptığını gösterir



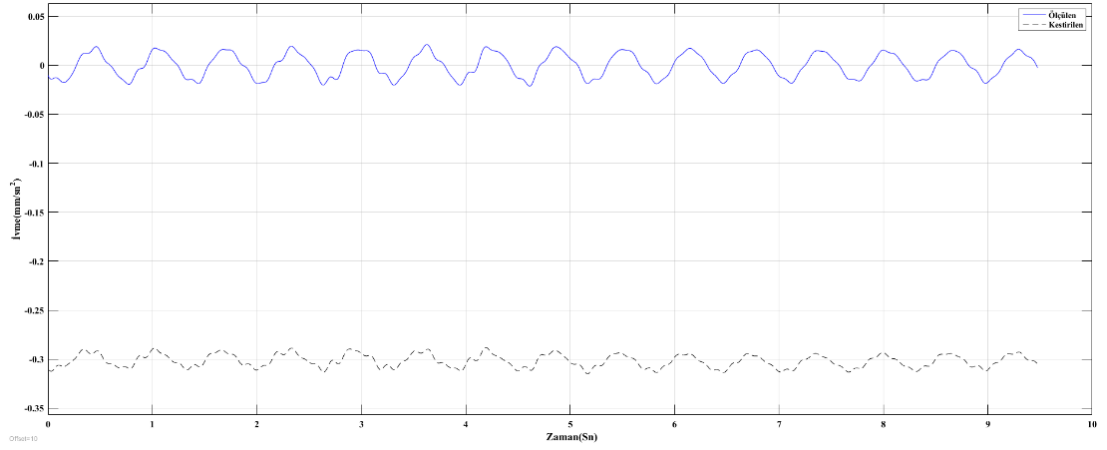
**Şekil 5.25:**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması yakınlaştırılmış konum değişim grafiği.



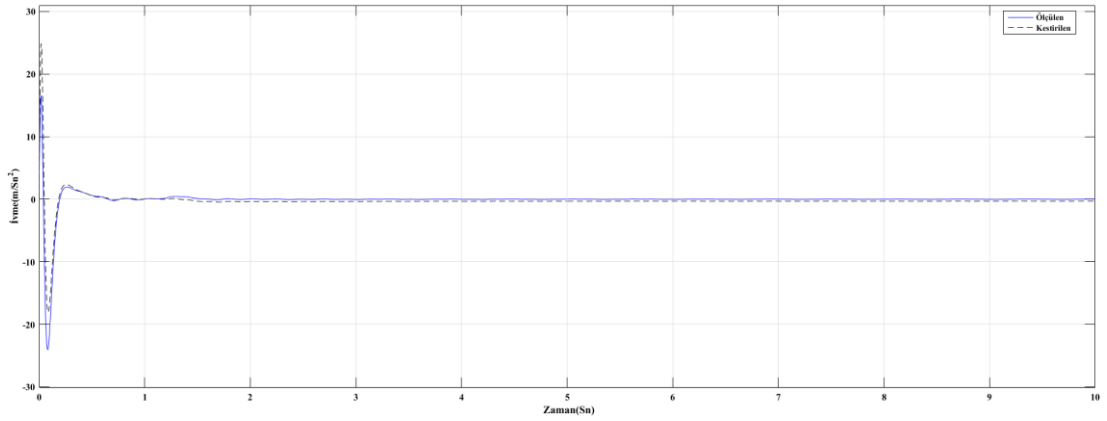
**Şekil 5.26:**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması konum değişim grafiği.



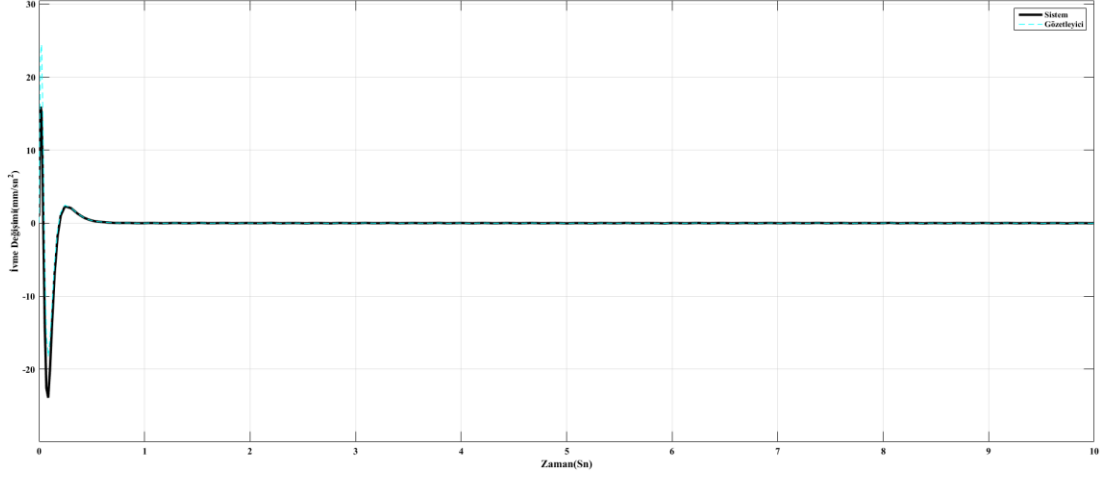
**Şekil 5.27:**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi Matlab/Simulink simülasyonu uygulaması konum değişim grafiği.



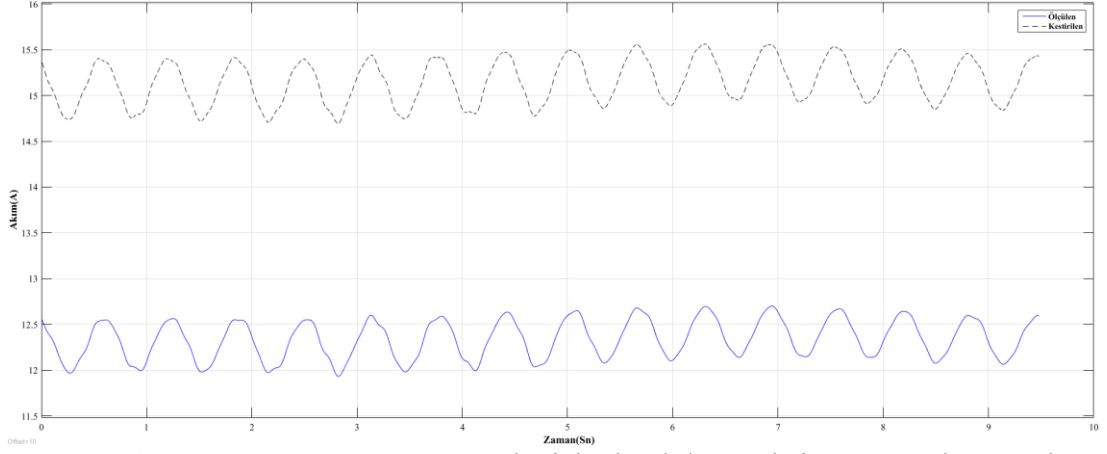
**Şekil 5.28:**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması ivme değişim grafiği.



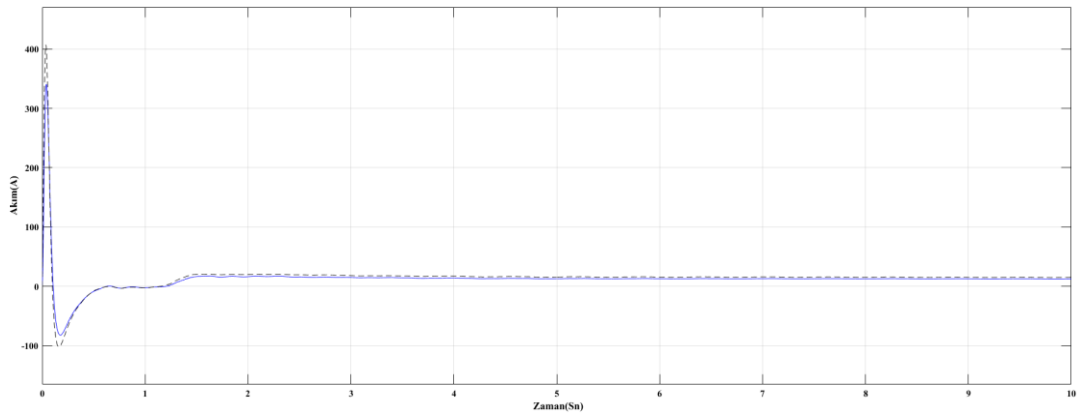
**Şekil 5.29:**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi uygulaması ivme değişim grafiği.



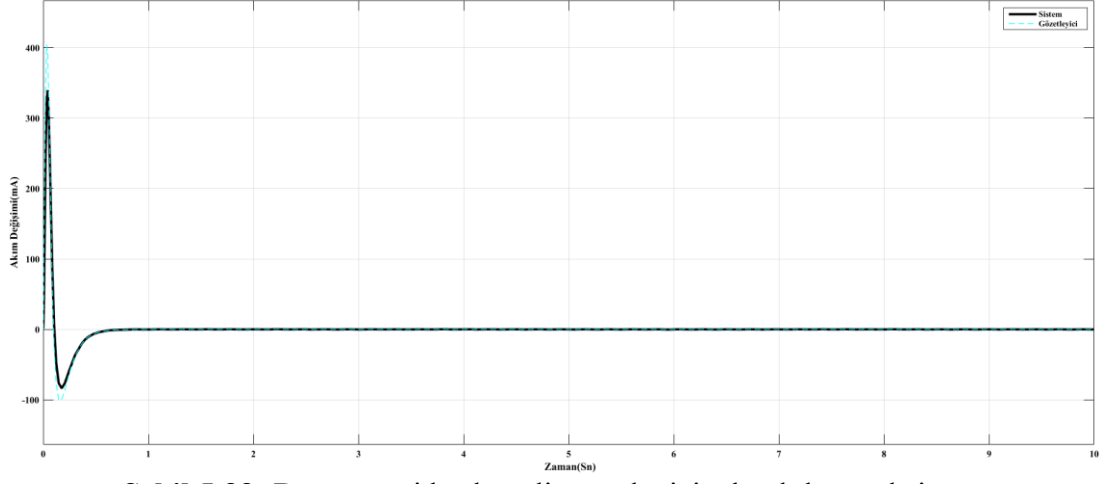
**Şekil 5.30:** Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistemi Matlab/Simulink simülasyonu ivme değişim grafiği.



**Şekil 5.31:** Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması akım değişim grafiği.



**Şekil 5.32:** Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem uygulaması akım değişim grafiği.



**Şekil 5.33::**Durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrol sistem  
Matlab/Simulinksimulasyon uygulaması akım değişim grafiği.



## 6. SONUÇLAR

Tasarlanan kontrolörler kullanılarak, kararsız, çok hızlı ve doğrusal olmayan bir sistem olan EMLS'nin kontrolü sağlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu tasarımları önerilen kontrol yöntemlerinden sabit referans takip için modellemeleri önce MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilerek Hilink kontrol kartı üzerinde EMLS'nin kontrolü sağlanmıştır. Benzetim ve uygulamada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tasarlanan manyetik sistemlerin uyumları kontrol edildikten sonra oluşturulan geribeslemeli kontrol sistemleri ile P.I.D kontrolör ve durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrolörün ve Kayan Kipli kontrolörden daha kötü bir performans gösterdiği, kayan kipli kontrolörün de kontrolörün durum geri beslemeli gözetleyici tabanlı kontrolörden daha robust ve kararlı bir performans sergilediği bununla birlikte topun sadece kayan kip kontrolör ile  $h=12$  mm noktasına yakın bir noktada dengede tutulabildiği gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemlerin MATLAB kullanılarak grafikleri oluşturulmuş ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Hem çıkış işaretinin referans işaretini izlemesi, hem kontrol işaretinin yeterliliği, hem de durum değişkenlerinin değerleri açısından gözlemler yapılmıştır.

Sistem tasarımında askıya alınacak nesnenin pozisyon bilgisini oluşturacak algılayıcı seçiminin büyük önem arz ettiği görülmüştür. Bu algılayıcının gürültüsüz ve doğrusal cevapla çalışması sistem tasarımının performansını belirlemede etkin rol oynamaktadır. Aynı şekilde kontrolör seçimi ve bu kontrolöre ait parametrelerin seçimi de başarılı bir askı düzeneği için çok önemlidir.

## 7. KAYNAKLAR

Barie W. ,Chiasson, J., “Lineer andNonlinearState-Space ControllersforMagneticLevitation”, *International Journal of SystemsScience*, Volume 27, (1996).

Camacho O., Smith C.A., “SlidingMode Control: An ApproachtoRegulate NonlinearChemicalProcess” *ISA Transactions*, 205 – 218,(2000).

Carl R.,“A solenoidand a bar magnetandtheirmagneticfields”,  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/imgmag/barsol.gif>,14.06.2015,*HyperPhysics*

*Control TutoialsforMatlab*,

<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID> , Carnegie Mellon University,11.04.2016.

Damiano, A.,Gatto, G. L., Marongiu, I., Pisano, A., “Second-OrderSliding-Mode Control of DC Drives”, *IEEE Transactions on IndustrialElectronics*, 364-373, (2004).

Erdem S., 2007, “Maglev Trenler Böyle Çalışır”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, TÜBİTAK,<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yildiztakimi/pdf/mayis07/114.pdf>, 16.05.2011

Guldner, J.,Utkin, V. I., “SlidingMode Control forGradientTrackingand Robot Navigation Using ArtificialPotentialFields,” *IEEE Transactions on RoboticsandAutomation*, 247 – 254, (1995).

Güven İ.“HallEffect(Alan Etkili Sensör)”,  
<http://www.ilkerguven.com/elektrik/hall-effect-alan-etkili-sensor.html>,14.08.2012

Sira-RamírezH.,Llanes-Santiago O,andArrietaFernandezN.,“On thestabilization of nonlinearssystemsviainput-dependentsslidingsurfaces ”, *Internat. J. RobustNonlinear Control*, 771–780,(1996).

Jayawant,B.,“ElectromagneticSuspensionandLevitationTechniques”,  
*University of Sussex, School of Engineering&AppliedSciences, Edward  
Arnold, Brighton, UK, (1981).*

KuoB.,*Otomatik Kontrol Sistemleri*,192 – 195,(1999).

N. F. Al-MuthairiAnd M. Zrıbı ,“SlıdingMode Control Of A  
MagneticLevitationSystem”,*Mathematical Problems in Engineering*,93-  
107,(2004).

Samtaş, G. ve Güllü, A., 2006, “Manyetik Yatak Sistemleri üzerine Bir  
Araştırma”,[http://mbdergi.pau.edu.tr/index.php/mbdergi/article/viewFile/245/  
229](http://mbdergi.pau.edu.tr/index.php/mbdergi/article/viewFile/245/229), (16.05.2011).

Sarı, A., “Düşük Kayıplı Manyetik Yataklamalı Volan Enerji Depolama  
Sistemlerinin H-Infinity Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek  
Teknoloji Enstitüsü*,(2006).

Shameli, E., , “Design, Implementationand Control of a MagneticLevitation  
Device”, Doktora Tezi, *University of Waterloo, MechanicalEngineering,  
Waterloo, Ontario, Canada*,(2008).

Shiao, Y.S., “Design andImplementation of a Controller for a  
MagneticLevitationSystem”, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(D)*,(2001).

Shkolnikov, I. A.,Shtessel, Y. B., Lianos, D. P., Thies, A.T, ”RobustMissile  
Autopilot Design via High-orderSlidingMode Control,” *Proceedings of AIAA  
Guidance, Navigation, and Control Conference*, Denver, USA, (2000).

Tokat, S., “Koordinat Dönüşümüne Dayalı Zamanla Değişen Kayma Yüzeyi  
Tasarım Yöntemler”i, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen  
Bilimleri Enstitüsü*, (2003).

KumarV.,JeromeJ.,“LQR based optimal tuning of PID  
controllerfortrajectorytrackingof MagneticLevitationSystem”,*International  
Conference On DesignAndManufacturing*, 254 – 264 ,( 2013).

Radisavljevic V., "Linear Observers Design And Implementation", *Conference of the American Society for Engineering Education*, (2014).

Khuen Ho W., Chieh Hang C., Cao L. S., "Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications", *Automatica*, Vol. 31, (1995).

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammet Emre Sancı

Doğum Yeri ve Tarihi : Erzurum-03.12.1986

Lisans Üniversitesi : Abant İzzet Baysal

Elektronik posta : msanci@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mekatronik Müh.

**Konferans listesi :**

- Muhammet Emre SANCI, Serdar HALİS, Yavuz KAPLAN, "Study on Surface Roughness of Carbon and Glass Fiber Filled Polytetrafluoroethylene in Turning Process" ICENS International Conference on Engineering and Natural Science, 2016

- Muhammet Emre SANCI, Serdar HALİS, Yavuz KAPLAN, "Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness in Turning of Carbon and Glass Fiber Filled Polytetrafluoroethylene" MDA The 1st International Conference on Materials Design and Applications, 2016