



**MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMLERİ İÇİN
DOĞRUSAL OLMAYAN
KONTROL YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mustafa BULUT

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet DÜMLÜ**

2022

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMLERİ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN
KONTROL YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa BULUT

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet DUMLU

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

22 / 06 / 2022

Mustafa BULUT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMLERİ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN KONTROL YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa BULUT

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet DUMLU

Manyetik Levitasyon işlemi, en temel haliyle bir manyetik kuvvet dışında herhangi bir fiziksel büyüklüğün yardımı olmadan manyetik olarak hareketi mümkün olan bir cismin kaldırılması, döndürülmesi veya ilerletilmesini sağlayan bir işlemdir. Endüstrideki en büyük problemlerden birinin sürtünme problemi olduğu varsayıma dayanarak, manyetik levitasyonda fiziksel bir temasın olmamasına bağlı olarak sürtünme probleminin de önüne geçilmiş olması bu işlemi ekonomik yönden oldukça cazip kılmaktadır. Sürtünme probleminin önüne geçmek malzeme aşınması ve ısınmaya bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonları ortadan kaldırmakla kalmayıp aynı zamanda daha hızlı ve sorunsuz çalışma koşulları da sağlamaktadır. Manyetik olarak manüple edilebilen bir cismin havada asılı kalması, havada belirli bir hızla dönmesi ve yine havada belirli bir hızla ilerlemesi beraberinde bir kontrol sistemi ihtiyacı doğurmaktadır. Bu tezde manyetik levitasyon sistemlerinden biri olan CE 152 sistemi üzerine uygulanmış olan, PID kontrol ve İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrol metotları ile kontrolcüye cevap verme süresi ve kontrol işlemi sürecindeki kararlılıkları karşılaştırılarak kontrolcü talebine uygun bir cevap önerilmektedir.

2022, 67 sayfa

Anahtar Kelimeler: Manyetik, Levitasyon, Kontrol

ABSTRACT

MS. Thesis

DEVELOPMENT OF NONLINEAR CONTROL METHODS FOR MAGNETIC LEVITATION SYSTEMS

Mustafa BULUT

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet DUMLU

Magnetic levitation process can be defined basically as; lifting, rotating or shifting of an object that can move magnetically without help of any physical magnitude other than a magnetic force. Based on the assumption that one of the biggest problems in the industry is the friction problem, the fact that the friction problem is avoided due to the absence of physical contact in magnetic levitation makes this process quite economically preferable. Preventing the friction problem not only eliminates the deformations due to material wear and heating, but also provides faster and smooth conditions. Suspension, rotation at a certain speed, motion at a certain speed of an object that can be manipulated magnetically creates the need for a control system. In this thesis the response time of the two control methods and their stability during the control process is compared by applying them on CE 152 system, which is one of the magnetic systems, and an appropriate solution is given to the controller demand is proposed. The control systems used in this study are; PID control and second order sliding mode control. In this thesis an appropriate response to the controller demand is proposed, by comparing the response time to their controller and their stability in the control process with PID Control and Second Order Sliding Mode Control methods on CE152 system, which is one of the magnetic levitation systems.

2022, 67 pages

Keywords: Magnetic, Levitation, Control

TEŞEKKÜR

Yürüttüğüm bu çalışma sırasında sabrı ve desteği için Sayın Doç. Dr. Ahmet DUMLU'ya ve değerli jüri üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa BULUT
Haziran 2022



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	7
1.2. Tezin Kapsamı	7
2. KAYNAK ÖZETLERİ	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM	20
3.1. PID Kontrolcü	40
3.2. Kayan Kipli Kontrolcü.....	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
4.1. PID Kontrolcü Bulguları	51
4.2. İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcü Bulguları	54
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Amper
A	Bobinin Yatay Kesit Alanı
A_n, B_n, C_n	Nominal Parametreler
C°	Santigrat Derece
$d(t)$	Dış Bozunumlar
D_k	Demir Bilyenin Çapı
$e(t)$	Kontrol Sistemlerinde Hata
$F(r)$	Elektiriksel Kuvvet
F_f	Sürtünme Kuvveti
F_g	Yerçekimi Kuvveti
F_m	Manyetik Kaldırma Kuvveti
F_{net}	Demir Bilyeye Etkiyen Net Kuvvet
g	Yerçekimi İvmesi Sabiti
I_{am}	Güç Yükselteci Devresindeki Maksimum Çıkış Akımı Değeri
i	Bobin Üzerinden Akan Akım
K_{AD}	Analogdan Dijitale Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti
K_{DA}	Dijitalden Analoga Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti
K_{am}	Yükselteç Devresi Kazancı
K_c	Bobin Kazanç Sabiti
K_d	Türev Bloğu Kazancı
K_f	Toplu Bobin Sabiti
K_{fv}	Hıza Bağlı Sürtünme Katsayısı
K_i	Güç Yükselteci Kazancı
K_i	İntegral Bloğu Kazancı
K_p	Oransal Blok Kazancı
K_s	Akım Sensörü Kazancı
k_s	Pozitif Bir Sabit
K_x	Pozisyon Sensörü Kazanç Sabiti
l	Bobin Uzunluğu

L	Bobin Endüktans Değeri
L_x	Endüktif Bobin ile Demir Bilye Arasındaki Mesafe (Demir Bilye Zeminde Serbest Bir Halde Duruyorken)
m_k	Demir Bilyenin Kütlesi
N	Bobin Sarım Sayısı
R	Bobin Elemanının İç Direnci
R_s	Akım Sensörü Direnci
$s(t)$	Kayan Kipli Kontrolcülerde Kayma Yüzeyi
T_d	Zemin ve Endüktif Bobin Arasındaki Mesafe
$U(r)$	Potansiyel Fark
u_{eq}	Kayan Kipli Kontrolcülerde Eşdeğer Kontrol İşareti
u_m	Yükselteç Devresi Giriş Gerilimi
u_{sw}	Kayan Kipli Kontrolcülerde Anahtarlama Kontrol İşareti
U_0	Dijitalden Analoga Dönüştürücü Devresindeki Ofset Gerilim Değeri
U_{DAM}	DA Dönüştürücüdeki Maksimum Çıkış Gerilimi
$u(t)$	Kontrol Girişi
v	Demir Bilyenin Hızı
V	Volt
W_m	Bobin Enerjisi
Y_{MU0}	Analogdan Dijitale Dönüştürücü Devresindeki Ofset Gerilim Değeri
x	Demir Bilyenin En Alttaki Pozisyon Sensörü ile Bobin Arasındaki Pozisyonu
x_0	Demir Bilyenin Ofset Pozisyonu
y_m	Kontrolcü Çıkışı
λ_1	Pozitif Bir Sabit
$\Delta A, \Delta B, \Delta C$	Modeldeki Belirsizlikler
β	Pozitif Bir Sabit
μ	Manyetik Geçirgenlik
τ	Zaman Sabiti

Kısaltmalar

ACO	Ant Colony Algorithm
D	Derivative Controller
DAQ	Data Acquisition
ESO	Extended State Observer
FOPID	Fractional Order Proportional Derivative
FPGA	Field Programmable Gate Array
I	Integrative Controller
İDKKK	İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcü
LADRC	Linear Active Disturbance Rejection Control
MFC	Model Free Control
MLS	Magnetic Levitation Control
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P	Proportional Controller
PD	Proportional Derivative
PID	Proportional Integrative Derivative Controller
RBF	Radial Basis Function
SISO	Single Input Single Output
SMM	State Space Model
SOSMC	Second Order Sliding Mode Controller

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi	1
Şekil 1.2. Elektromanyetik yatak	4
Şekil 1.3. Maglev treni.....	4
Şekil 1.4. Elektromanyetik vinç	5
Şekil 1.5. Rüzgâr tüneli.....	5
Şekil 1.6. Çin’de üretilen Maglev treni.....	6
Şekil 3.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi şeması.....	22
Şekil 3.2. Demir bilye manyetik levitasyona maruz kaldığında üzerine etkiyen kuvvetler	23
Şekil 3.3. CE 152 manyetik levitasyon sistemi güç yükselteç devresi	29
Şekil 3.4. PID kontrolcünün blok gösterimi	40
Şekil 3.5. PI kontrolcüyle üstün burulma algoritmasının benzerliğini gösteren devre şemaları.....	48
Şekil 3.6. Kayma yüzeyi ve çatırdama probleminin gösterimi	49
Şekil 4.1. PID kontrolcü Simulink blok diyagram gösterimi	52
Şekil 4.2. PID kontrolcünün referans takibi	53
Şekil 4.3. PID kontrolcünün hata sinyali	53
Şekil 4.4. PID kontrolcü sinyali.....	54
Şekil 4.5. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünü Simulink blok diyagram gösterimi	55
Şekil 4.6. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünün referans takibi.....	56
Şekil 4.7. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünün hata sinyali	57
Şekil 4.8. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü sinyali	58
Şekil 4.9. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü sinyalinin 0,02 saniyelik gösterimi	59
Şekil 4.10. PID ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülerinin referans takiplerinin bir arada gösterimi	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

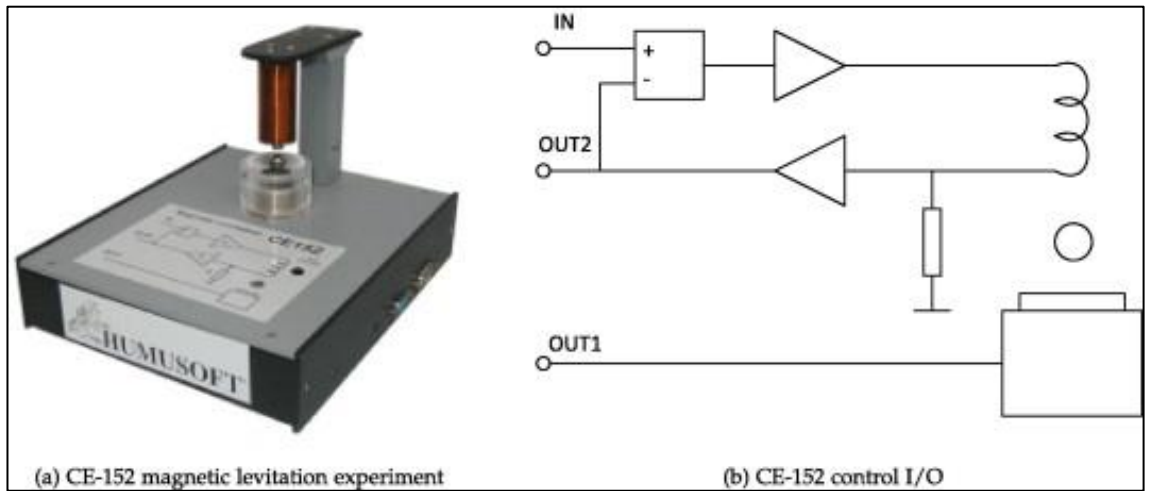
Çizelge 3.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi parametreleri	33
Çizelge 3.2. Zeigler-Nichols tablosu	44



1. GİRİŞ

Manyetik levitasyon işlemi, manyetik alanlar tarafından manipüle edilebilir olan bir cismin, manyetik alanlardan başka hiçbir fiziksel destek olmadan havada asılı kalması veya süzülmesi amaçlayan ve yaklaşık 100 yıldır bilim dünyasında kendine yer bulan bir işlemdir. Manyetik Levitasyonun bilim ve üretim dünyasına sunduğu en temel artısı ise aşınma ve sürtünme problemlerini ortadan kaldırmasıdır. Bu yönüyle; verimliliğin artması, bakım maliyetlerinin azalması ve kullanım ömrünün uzaması gibi teknolojik aletler için oldukça önemli olan kısımlarda getirdiği faydalar ile birçok endüstride etkili bir teknoloji olarak anılmaktadır (Eroğlu 2016).

Manyetik Levitasyonu daha detaylı bir şekilde anlayabilmek için öncelikle söz konusu manyetik alanlar tarafından manipüle edilebilir olan cismin levitasyon süreci boyunca etkisi altında kaldığı kuvvetler incelenmelidir. En temel levitasyon işlemini, yani yalnızca düşey ekseninde hareketi amaçlayan, bir başka deyişle bir cismin sadece kaldırılıp indirilmesi hedeflenen, bunun dışında kaldırılmış olan bir cismin ileri veya geri yönde hareketini kapsamayan tek boyutlu levitasyon ele alınarak bu işlemin matematiksel modeli hakkında fikir sahip olunabilir.



Şekil 1.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi (Honc 2019)

CE 152 sistemi, yalnızca düşey eksenindeki tek boyutlu hareketi sağlayan klasik levitasyon sistemlerinden biridir. Bu sistem; D/A dönüştürücü, güç yükseltici, metal küre ve bobin alt sistemi, pozisyon sensörü ve A/D dönüştürücü kısımlarından meydana

gelmektedir. Manyetik levitasyonun asıl olarak meydana geldiği kısım ise metal küre ve bobin alt sistemidir. Burada metal küreye levitasyon tanımına uygun olarak manyetik alan harici hiçbir fiziksel kuvvet uygulanmadan bir kaldırma kuvveti uygulanmaktadır. Uygulanan bu manyetik kuvvet gereğince, metal küre hava asılı halde kalabilmektedir. Metal küreye toplamda etki eden kuvvet sayısı ise üçtür, bunlar; yukarı doğru uygulanan ve metal küreyi havaya kaldırmayı hedefleyen manyetik kuvvet, aşağı doğru uygulanan ve metal küreyi yere inmeye zorlayan yer çekimi kuvveti ve yine aşağı doğru olan ve metal kürenin yukarı çıkarken kazandığı hızından kaynaklanan sürtünme kuvvetidir. Newton'un hareket yasası gereğince cisme etki eden net kuvvetin sıfır olması durumunda söz konusu cismin ivmesinin de sıfır olması gerekmektedir. Bu bağlamdan hareket edilerek, manyetik levitasyona tabi tutulan bir cismin havada asılı kalması için ivmesinin sıfır olması ve haliyle de cisme uygulanan net kuvvetin sıfır olması gerekmektedir. Metal küreye etki eden üç kuvvet ele alınırsa; küreyi yukarı doğru çeken manyetik kuvvetin, küreyi aşağı doğru çeken yerçekimi ve hızdan kaynaklanan sürtünme kuvvetlerinin toplamına eşit olması CE 152 sisteminin gerçekleştirmeyi amaçladığı kriter olacaktır (Honc 2019).

Bir manyetik levitasyon işlemini gerçekleştirmenin ilk yolu statik olmayan bir elektromanyetik alana sahip olabilmektir. Çünkü ters kare yasası; belli bir fiziksel gücün söz konusu gücün kaynağından uzaklaştıkça, uzaklaşılan mesafenin karesiyle ters orantılı bir şekilde değişeceğini yani uzaklaşılan mesafenin karesiyle orantılı şekilde azalacağını savunmaktadır. Bu bağlamda statik manyetik alan kararsız bir manyetik kaldırma işlemine yol açacaktır. Bu sorunu çözmek için statik manyetik alan yerine zamanla değişen bir manyetik alan tercih etmek gerekmektedir. CE 152 sisteminde kullanılan bobin, metal kürenin askıya alınacağı noktanın etrafında bir potansiyel kuyusu oluşturarak sağladığı bu zamanla değişen manyetik alan sayesinde kürenin üzerine uygulanan manyetik çekim kuvvetinin uzaklığı karesiyle azalmasının önüne geçerek, kaldırma işleminin gerçekleşeceği güzergâh boyunca homojen bir kaldırma kuvveti sağlamaktadır. İngiliz bilim insanı Samuel Earnshaw'un öne sürdüğü, statik manyetik alanlarda kararlı bir denge hali olamayacağı teoremi ile birlikte, kalıcı mıknatıslar yerine bobinler kullanılarak elde edilen mıknatısların kullanılması 1842'den itibaren manyetik levitasyon işleminin mümkün olmasının önünü açmıştır, söz konusu bobin kullanımı daha

önce bahsedilen, potansiyel kuyusu oluşturarak homojen şekilde bir manyetik çekim sağlamada kullanılmaktadır (Geim et al. 1999).

Manyetik levitasyon işlemi için gerekli olan kontrolcü, sistemin çıktısına bağlı olmayan bir girişe sahiptir. Bir başka deyişle sistemin çıktısı bu kontrolcünün eylemlerini değiştirmemektedir. Bu tip kontrolcülere açık döngülü kontrolcüler denmektedir. Herhangi bir geri bildirim olmayan, basit, az bakım gerektiren ve hızlı çalışan bu kontrolcülerin doğruluk oranlarının düşük olması levitasyon işlemi için kullanılmaları halinde detaylı hesaplamalar gerektirmektedir. Levitasyon işlemi için kontrolcü tasarlamının ikinci zorluğu ise içinde barındırdığı yüksek oranda doğrusal olmayan dinamiklerdir (Eroğlu 2016). Örnek olarak, belirli bir sayıda sarımla sarılmış bir bobin, bu sarımlardan akım geçmesi halinde bir çeşit mıknatıs görevi görebilmektedir. Bu mıknatıs tarafından uygulanan manyetik çekim kuvveti, bobin akımı ve manyetik kuvvetin etkisine maruz kalan cismin bobine mesafesi cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu ifade içinde yer alan hem bobin akımı hem de manyetik çekim etkisine maruz kalan cismin, kuvvetin kaynağına olan mesafesi karesel biçimlerde tanımlıdır. Bu sistem için bir kontrolcü tasarlamının üçüncü zorluğu ise bobinin endüktans değeridir. Bu değer her ne kadar bir sabit olarak kabul edilse de levitasyon işleminin uygulanacağı metal kürenin sistemdeki pozisyonu ile ilişkili bir büyüklüktür. Haliyle bobin endüktansına bağlı bir parametre belirsizliğinden de söz edebilmek mümkündür. Bu üç madde, bir levitasyon işlemi için kontrolcü tasarlamak açısından birtakım zorluklar meydana getirmektedir. Söz konusu kontrolcü, gürbüz bir şekilde tasarlandığı takdirde yukarıda da bahsedildiği üzere endüstrinin en temel problemlerinden birisi olan sürtünme probleminin önüne geçme olanağının sunulması ile beraber manyetik levitasyon işleminin birçok kullanım alanı ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde oldukça yaygınlaşan bu kullanım alanları içerisinde; elektromanyetik yataklar, maglev trenleri, elektromanyetik vinçler, rüzgâr tünelleri, hassas makineler için titreşim izolasyonu, endüklemler ocaklarda metal eritme, roket güdümü projeleri, fotolitografide plakaların yüksek hassasiyetle konumlandırılması, üretim esnasında metal levhaların kaldırılması konuları sıralanabilir. Söz konusu konular başlıklarında manyetik levitasyon işleminin üstlendiği göreve değinmek, bu işlem için gürbüz bir kontrolcü ihtiyacının ne denli önemli olduğunun anlaşılmasına yardımcı olacaktır.



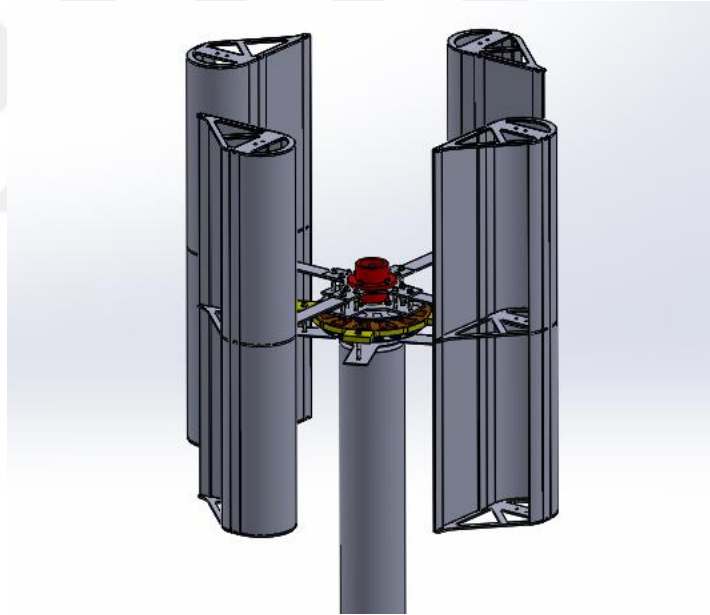
Şekil 1.2. Elektromanyetik yatak (Anonymous 2021a)



Şekil 1.3. Maglev treni (Anonymous 2022a)



Şekil 1.4. Elektromanyetik vinç (Anonymous 2016b)



Şekil 1.5. Rüzgâr tüneli (Anonymous 2022b)

Elektromanyetik yataklara dair çalışmalar 1941 yılına kadar uzanan bir geçmişe sahiptir. Makine terminolojisine bir yatak, bağlı hareketi yalnızca istenen hareketle sınırlayan ve hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltan bir eleman olarak tanımlanır. Söz konusu “yatak” terimi aynı zamanda rulman olarak da anılmaktadır. Elektromanyetik levitasyon sayesinde makine parçalarını birbirlerine temas etmeden desteklemek mümkün olur. Bu yataklar volan enerji depolama sistemlerinde vakumun

1. GİRİŞ

içindeki ekipmanı desteklemede kullanılırlar. Geleneksel yataklar yetersiz yağlama nedeniyle bu mekanizma içinde çabuk bir şekilde bozulabilirken, elektromanyetik yataklar uzun süre boyunca bozulmadan çalışma imkânı sağlamaktadırlar (Li et al. 2018). Sürekli sıvı akışına enerji ekleyerek basınç artışı ihtiyacında kullanılan radyal kompresörler için de yine bu tip yataklar tercih edilmektedir. Düşük seviyede bir elektrik akımı, havada serbestçe asılı kalan mil bir manyetik kaldırma sağlamaktadır ve bu sayede mil ve yataklar arasındaki sürtünme sıfıra indirilmiş olmaktadır.

1934 yılında Alman bilim insanı Hermann Kemper tarafından patenti üstlenilen maglev trenleri, geleneksel trenlerin ilerleyiş mekanizması olan ray ve tekerler arasındaki sürtünme fiziğinin kullanılmasına alternatif olarak elektromanyetik kuvveti tekerlerin yerine koyarak oluşturulan bir itme kuvveti ile treni ilerletmeyi amaçlayan bir sistemdir (Lee et al. 2006). Yüksek hız, düşük hız, uzun yol, kısa yol gibi farklı sahalarda tercih edilen bu trenler, yük taşımacılığının yanı sıra insan taşımacılığı da yaptıklarından doğru işleyen bir kontrolcü mekanizmasına ihtiyaç duyarlar. Özellikle Temmuz 2021 ayında, Çin’de üretilen bir maglev treninin saatte 600 kilometreye varan bir hıza ulaşıldığı düşünülürse stabil şekilde çalışan bir kontrolcünün ne denli önemli olduğu bir kez daha ortaya çıkmış olur.



Şekil 1.6. Çin’de üretilen Maglev treni (Anonymous 2021b)

Bahsedilen kullanım alanları gözden geçirildiğinde geleneksel yöntemler yerine manyetik levitasyon yönteminin tercih edilmesindeki en önemli sebebin sürtünme ve sürtünmeye bağlı materyal ve enerji kaybı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, direkt bir fiziksel temasın olmaması aynı zamanda yüksek hızlara ulaşabilmenin de önünü açmaktadır. Çünkü bir cismin sadece manyetik kaldırma kuvvetiyle serbest bir şekilde

salınabiliyor olması maksimum bağıl hız sorununu ortadan kaldırmaktadır. Bir başka tercih ediliş sebebi olarak ise sessiz bir çalışma imkânı sağlaması ele alınabilir. Yine fiziksel temasın olmayışı, ilerleme ve dönme gibi işlemler sırasında mekanik bir gürültüden ziyade sadece bir rüzgâr gürültüsü ortaya çıkarmaktadır. Avantajları ve kullanım alanları sunulan manyetik levitasyon işleminin düzgün çalışabilmesi adına PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülerin performanslarının değerlendirilmesi ve bu işlem için uygun bir kontrolcü cevabının sunulması adına bu çalışma yapılmıştır.

Çalışmada bahsi geçen CE 152 sisteminin matematiksel modeli, Newton Hareket Yasası kullanılarak ortaya konulmaktadır. Bu matematiksel model kullanılarak, İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcü ve PID kontrolcüsü tasarlanıp simülasyon sonuçları incelenmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre kalıcı durum hatası ve sistem cevap hızı gibi iki kriter ele alındığında İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcünün mevcut ihtiyaçlara daha olumlu cevaplar verdiği gözlemlenmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, manyetik levitasyon işlemlerinde kontrolcü sorununa bir cevap bulabilmek adına PID ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüler üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları doğrultusunda tespitler yapılmıştır. Çalışma, CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nin matematiksel modeli üzerinde yürütülmüştür. Bu sistemin model olarak alınma sebebi, sistem dinamiklerinin ve parametre değişimlerinin kolay gözlemlenebilir olmasındandır. Simülasyon çalışmaları için MATLAB Simulink yazılımı tercih edilmiştir. Kontrolcüler, referans takibi ve oturma süreleri bakımından kıyaslanarak uygun bir cevap bulunmuştur.

1.2. Tezin Kapsamı

Tez, beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölümlerin ilki olan giriş bölümünde, bir manyetik levitasyon tanımı yapılarak başlanmıştır. Manyetik levitasyon sistemi olarak CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nin çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Bir manyetik levitasyon işlemini gerçekleştirebilmek için ne çeşit bir manyetik alana ihtiyaç

duyulduğu sebepleriyle birlikte anlatılmıştır. Manyetik levitasyon işlemi için neden bir kontrolcü ihtiyacı duyulduğu ve bu ihtiyacı karşılamak için göz önünde bulundurulması gereken durumlar aktarılmıştır. Son olarak ise, manyetik levitasyon işleminin günümüzdeki kullanım alanlarına örnekler verilip bu örnekler açıklanmıştır.

İkinci Bölüm olan kaynak özetleri kısmında ise, manyetik levitasyonun daha geniş bir tanımına yer verilip manyetik levitasyon işleminde denenilen kontrol sistemleri incelenmiştir. İncelenen kontrol yöntemleri arasında; Kalman Filtresi kullanarak kontrol, Bulanık Tabanlı kontrol, Optimize Edilmiş Geri Beslemeli kontrol, RBF Sinir Ağı Tabanlı kayan kipli kontrol, Bozulma Rejeksiyonu Tabanlı kontrol, LADRC Metodu ile kontrol, Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması tabanlı PID kontrol, model kullanımı olmayan kontrol gibi yöntemler detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Üçüncü bölüm olan materyal ve yöntem kısmında ise öncelikle CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nin Newton'un hareket yasası ile matematiksel modeli ve transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Transfer fonksiyonunu elde edebilmek amacıyla kullanılan CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi parametrelerinin tümüne yer verilmiştir. Tezde neden bu levitasyon sistemi kullanıldığına dair detaylı bir açıklama yapılmıştır. Ardından sistemin çalışma prensibine bir kez daha değinilmiştir. Bu bölümde doğrusal olmayan sistemlerin doğrusal hale getirilmesine dair işlemler de bulunmaktadır. Son olarak, PID kontrolcü ve kayan kipli kontrolcü terimleri ile ilgili; matematiksel gösterimleri, çalışma prensipleri, çalışma parametreleri ve bu parametrelerin nasıl bulunacağına dair anlatımlar yapılmıştır.

Dördüncü bölüm olan araştırma bulguları ve tartışma kısmında ise, PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün simülasyon sonuçları; referans takibi, kontrolcü işareti ve hata işareti kapsamında paylaşılmıştır. Çalışmada seçilen kontrolcü parametrelerine yer verilmiştir. Her iki kontrolcünün Simulink diyagramlarına yer verilip elde edilen grafiksel sonuçlar ışığında iki kontrolcü arasında levitasyon işlemi için en uygun olanına dair fikir yürütülmüştür.

Son ve beşinci bölüm olan sonuç ve öneriler kısmında, kullanılan kontrol yöntemleri için ihtiyaç duyulan matematiksel model ile birlikte CE 152 Manyetik

1. GİRİŞ

Levitasyon Sisteminin seçilme sebebine bir kez daha değinilip ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü tercihin bu sistem için daha isabetli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün daha gürbüz bir şekilde işletilebilmesi için yapılabileceklere dair fikir yürütülmüştür.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Statik manyetik kuvvetin ve yerçekimi kuvvetinin herhangi bir kombinasyonu bir mıknaşısı kararlı bir halde havada asılı halde tutmak için yeterli değildir. Earnshaw 1842 yılında yaptığı çalışması ile bunun aksinin mümkün olmayacağını matematiksel olarak teorem haline getirmiştir (Earnshaw 1842). Rastgele seçilmiş bir statik elektrik alan içerisindeki nokta yükün durumu Gauss Yasası ile açıklanabilmektedir. Bir parçacığın kararlı bir denge halinde olması, söz konusu parçacığın üzerine uygulanan küçük itme kuvvetlerinin dengeyi bozmaması bir başka deyişle parçacığın küçük itme kuvvetlerine maruz kalmasına rağmen eski konumuna geri oturması ile açıklanabilmektedir. Dolayısıyla kararlı bir denge halinde olan parçacığın denge konumunun etrafındaki kuvvet alanı çizgilerinin hepsinin içeriye ve referans pozisyonuna doğru bakması gerekmektedir. Bir parçacığı çevreleyen tüm alan çizgilerinin denge noktasına, bir diğer adıyla referans pozisyonuna bakması, o noktadaki alanın diverjansının negatif olması sonucunu doğurmaktadır. Negatif diverjansa sahip bir alan, doldurulduktan sonra tıpası çıkartılan bir lavabo gibi davranmaya meyillidir. Fakat Gauss yasası, herhangi bir olası elektrik alanının boş uzayda sıfır diverjansa sahip olduğunu savunmaktadır (Gibbs and Geim 1997). Bu durumu matematiksel olarak aktarmak için Laplace denklemini açıklamak gerekmektedir. Bu denkleme göre, Kartezyen koordinatlara göre bilinmeyen bir fonksiyon olan U 'nin ikinci dereceden kısmi türevlerinin toplamı sıfır olmalıdır (Anonymous 2009). Söz konusu Laplace denklemini, potansiyel fark olan $U(r)$ 'den türetilen elektriksel kuvvet $F(r)$ 'nin her zaman sıfır diverjansa sahip olması halinde uyarlamak mümkün olacaktır.

$$\nabla \cdot F = \nabla(-\nabla U) = -\nabla^2 U = 0 \quad (2.1)$$

Bu sebeple, boş uzaydaki alan potansiyelin yerel minimumları ve maksimumları olmayacaktır. Bu noktalar yerine sadece eyer noktalarından söz etmek mümkündür. Bu eyer noktaları, ortogonal yönlerdeki eğimlerin yani türevlerin hepsinin sıfır olduğu fakat yerel bir ekstremum noktası olmayan yerlerdir (Anton et al. 2002). Söz konusu bu durum, bir parçacığın kararlı bir dengesinin olmaması ve mutlaka bir yönde bir karasızlığa sahip olmasıyla sonuçlanmaktadır (Weinstock 1976).

Earnshaw teoreminin statik bir manyetik alanı manyetik levitasyon işlemi için geçersiz kılmasıyla beraber denenen ilk alternatif yöntem süper iletken kullanımı olmuştur. Süper iletkenlik adına yapılan ilk çalışma Amerikalı bilim insanı Dudley Allen Buck tarafından kriyotron olarak adlandırılan cihazın icadıyla başlamıştır. İki farklı kritik sıcaklığa sahip süper iletken kullanılarak oluşturulan bu cihaz, manyetik alanların süper iletkenliği yok etmesi ilkesiyle çalışmaktadır (Rose-Innes 2015).

Süperiletkenliğe ulaşma noktası, tanımsal olarak elektriksel direncin tam olarak sıfıra düştüğü sıcaklık olarak açıklanabilmektedir. Birçok element belirli bir sıcaklığın altında süperiletkenlik özelliği kazanabilmektedir. Süperiletkenlerin manyetik levitasyonda kullanılmasının önünü açan asıl özelliği sıfır elektriksel dirence sahip olmaları değildir. Belirli sıcaklığın altında tutulan bu elementler sadece sıfır elektriksel dirence değil, aynı zamanda diyamanyetik karakteristik kazanımına sahip olmaktadır. Diyamanyetizasyon; cıva, altın, bakır, bizmut, elmas, kurşun, silikon gibi maddelerin bir mıknatıs etkisi altındayken mevcut manyetik alan çizgileriyle zıt yönde mıknatıslanması olayı olarak açıklanmaktadır. Tanımından da anlaşılacağı üzere, sayılan maddeler belirli bir sıcaklık altında tutulduklarında ve bir mıknatıs etkisi altında kaldıklarında söz konusu mıknatıs ile aralarında bir itme kuvveti meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla bu itme kuvvetini kullanarak aynı zamanda bir kaldırma kuvveti oluşturmak da mümkün olabilmektedir. Bir süperiletken ile bir mıknatıs arasında oluşan bu etkiye Meissner etkisi denilmektedir (Geim et al. 1998). Meissner etkisi kullanılarak bir levitasyon işlemi sağlamak teoride oldukça mümkün görünse bile bahsi geçen maddeleri süperiletkenlik noktalarına ulaşması için oldukça düşük sıcaklıklar gerekmektedir. Bu durum süperiletkenlik yoluyla manyetik levitasyon sağlamanın, gündelik hayatta oldukça kullanışsız bir yol olmasına sebep olmaktadır. Örneğin; alüminyum elementini süperiletkenlik noktasına getiren sıcaklık değeri $-271,95\text{ }^{\circ}\text{C}$, kadmiyum elementi için ise $-272,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Manyetik levitasyon ile çalışan bir Maglev trenini düşünülürse, dış ortamda bulunan rayların sürekli bu denli düşük sıcaklıklarda tutulması, tutulsalar bile bu seviye düşük sıcaklıkların yolcularca tolare edilmesi mümkün olmayacaktır. Bu olumsuz etkilerin yanına bir de Meissner etkisinin sağlanması için gerekli olan sıcaklık şartlarının kararlı bir şekilde sağlanmasının maliyeti düşünülürse, levitasyon işlemi için alternatif yollar aramak elzem bir hal almıştır.

Bu tezde incelenecek olan CE 152 sistemi, manyetik levitasyon için sistem tabanlı bir kontrolcü oluşturulabilmek amacıyla tasarlanmış bir sistemdir. Bu sistemde süperiletkenlik sorunlarına karşın alternatif olarak kullanılan endüktif bobinler sayesinde Earnshaw Teoremi ile birlikte anlaşılan, kararlı bir levitasyon işlemi için kullanışsız olan statik bir elektromanyetik alan yerine zamanla değişen bir elektromanyetik alan sağlanabilmektedir (Honc 2019). Bu değişken elektromanyetik alanı sağlamak için demir gibi bir ferromanyetik malzeme çekirdek olarak kabul edilir ve etrafı iletken bir telle sarılarak bir bobin oluşturulur. Elektromıknatısların levitasyon işlemleri için kalıcı mıknatısların yerine tercih edilme sebebinin detayına inilirse; sargıdaki elektrik akımı miktarını kontrol ederek manyetik alanın hızlı bir şekilde değiştirilebilmesi avantajı göze çarpmaktadır. Bu durum yalnızca zamanla değiştirilen bir elektromanyetik alan oluşturarak levitasyon işlemine maruz kalacak maddenin etrafında bir potansiyel kuyusu açıp levitasyonu mümkün kılmakla kalmayıp, aynı zamanda akım üzerinden kontrol edilebilir bir sistem meydana getirdiğinden, söz konusu maddenin pozisyonunda oluşabilecek olası kaymalar akım kontrolü ile birlikte tolare edilebilmektedir (Andrews 1995).

Manyetik Levitasyonu CE 152 sistemi özelinde mümkün kılan ferromanyetizma, adını manyetik alanlar tarafından manüple edildiği gözlemlenen ilk element olan demir anlamına gelen ferrous teriminden almaktadır. Bir materyalin kalıcı bir mıknatıs oluşturması veya manyetik alana çekilmesi olarak tanımlanmaktadır. Manyetik olmayan bir materyalde, kalıcı olmayan manyetik dipoller birbirlerini sönmölemek için anti-paralel bir dizilişle geçme eğilimindeyken ferromanyetizma etkisi gösteren materyallerde bu durum tam tersi şekilde işlemektedir. Başka bir deyişle ferromanyetizma etkisi, bir materyaldeki kalıcı dipollerin kendiliğinden paralel olarak sıralanmasından kaynaklanmaktadır. Bahsi geçen bu manyetik dipoller ise atomik yörüngedeki elektron çiftlerinin hareketinden dolayı meydana gelmektedirler. Ferromanyetizma özelliği gösteren materyallerin atomlarındaki en dış enerji seviyeleri kısmen dolu halde bulunmaktadır. Demir, Kobalt, Nikel, Çelik gibi elementlerin atomik enerji seviyeleri bu tanıma uygundur. Örneğin atom numarası 27 olan Kobalt atomunun enerji seviyesi başına elektronları; 2,8,15,2 şeklinde dizilirken atom numarası 26 olan Demir atomunda ise elektronlar; 2,8,14,2 şeklinde sıralanmaktadırlar. Her iki atom için de 3. enerji seviyesinin maksimum doluluğu olan 18 sayısına yakın olduklarını söylemek

mümkündür. Demir 2,8,16 diziliminde son enerji seviyesinin dolması için 2 elektronluk boşluk olduğu görülmektedir. Kobalt için 2,8,17 dizilimiyle son enerji seviyesini doldurmak için 1 elektronluk boşluğun olması her iki elementi de tanıma uygun bir şekilde en dış enerji seviyeleri kısmen dolu materyaller kısmına dahil etmektedir (Spain and Venkatanarayanan 2014).

En dış enerji seviyeleri benzer şekilde dolu olan materyaller ferromanyetik özellikler göstermelerine karşın kendilerinin manyetik özellikleri yoktur. CE 152 sisteminde olduğu gibi bir ferromanyetik materyalin akımla uyarılması söz konusu paralel dipol dizilimini sağlayarak bu materyallere manyetik özellikler kazandırmaktadır. Dolayısıyla CE 152 sisteminde demir bilyenin havada asılı kalma pozisyonuna gelmesi için gerekli olan kontrolcüde akım referans alınarak tasarım yapılmaktadır. Demir bilyeye düşeyde uygulanan ufak itme kuvvetleri, sisteme uygulanan akım artırılıp azaltılarak kontrol edilmektedir.

Kontrol sistemleri ile levitasyonun entegre halde kullanıldığı ilk çalışmalardan biri, 1974 yılında Kombine Manyetik Alanlara Bağlı Kaldırma Erişiminde Sıcaklık Kontrolünde Araştırmalar isimli makale ile Holger Domke ve Madan Lal Kapoor isimli bilim insanları tarafından yapılmıştır (Domke et al. 1974). Bu çalışmada kontrol işlemi için regresyon analizi denilen bir yöntem tercih edilmiştir. Bu terim için öz Türkçe olan karşılığı “bağlanım” kelimesini de kullanmak mümkündür (Damodar 2008). Regresyon analizinde iki veya daha fazla sayısal değişken arasındaki bağlantıyı hesaplamak amaçlanmaktadır. Bu analiz yönteminde iki veya daha fazla değişken arasındaki doğrusal ilişkinin fonksiyonel şekli, biri bağımlı diğerleri bağımsız değişkenler olarak bir denklem olarak ifade edilmektedir. Haliyle değişkenlerden birinin bilinmesi, diğer değişkenler arasında bir varsayım yapma şansı doğurmaktadır. Bu çalışma 1977 yılında yazılan 2 makale ile birlikte veri tabanlarında bulunabilen ve levitasyon ile kontrol mekaniklerini harmanlayan ilk çalışmalar olarak yer almaktadır. Bu çalışmalardan ilki Kontrollü Kalıcı Uyarmalı Manyetik Kaldırma isimli çalışmaları ile H. Weh ve M. Shalaby isimli bilim insanlarına aittir. Kontrollü kalıcı mıknatıslardan oluşan bir alan sistemi çerçevesinde işlenen bu çalışmada senkron olarak çalıştırılan ulaşım sistemlerinde kullanılmak üzere yapılmıştır. Aracın ağırlığına denk bir manyetik kaldırma kuvveti kalıcı mıknatıslar tarafından uygulanmaktadır. Bu çalışmadaki kontrol sistemi ise, kontrol alan sargıları

tarafından sağlanmaktadır. Bu sargıların kullanımındaki esas amaç akıyı azaltıp arttırarak hız kontrolü yapmakta kullanılan bir yöntemdir (Weh and Shalaby 1977).

1977 yılında yapılan ikinci çalışmada ise; Eveline Gottzein, Karl-Heinze Brock, Ernst Schneider ve Johann Pfefferl isimli bilim adamları, Paletli Bir Manyetik Kaldırma Yüksek Hızlı Test Aracının Kontrol Yönleri isimli makaleleri bulunmaktadır. Bir Alman üretimi olan KOMET isimli hız aracının kontrol sistemlerinin ele alındığı bu çalışmada kontrol donanımını; dijital bilgisayar, sensörler, mıknatıs sürücüler ve mıknatıslar oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki kontrol sistem sentezi, durum uzayı yaklaşımına ve z-dönüşümünün klasik yaklaşımına dayalı olarak gerçekleşmektedir. Z dönüşümü, zaman tanım kümesinde gerçel ve sanal bileşenleri olan herhangi bir ayrık işareti, frekans tanım kümesindeki biçimine dönüştürmede kullanılan bir dönüşümdür. Aracın izlediği yoldaki düzensizlikler, dış kuvvetler ve kontrol deneyinin gerçekleştiği tesisteki parametre değişkenleri, zaman tanım kümesindeki gerçel ve sanal bileşenleri meydana getirmektedir. Durum vektörünü oluşturmak içinse; mıknatıs boşlukları, araç ivmeleri ve mıknatıs akımları gibi ölçümlerden faydalanılmaktadır (Gottzein et al. 1977).

Özellikle levitasyon işleminin insan taşımacılığında kullanılmaya başlaması, bu alanda çok daha hassas ve gürbüz bir kontrolcü ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Çok yüksek hızlara ulaşan Maglev trenlerinde meydana gelebilecek herhangi bir kararsızlık, telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğurabilmektedir. Bunun yanı sıra endüstride manyetik yatakların kullanımın yaygınlaşması ise olası bir kontrolcü probleminin maddi kayıplarla sonuçlanmasına neden olmaktadır. Bu ve bunun gibi kontrolcü ihtiyacını yüksek seviyede bulunduran durumlardan ötürü, günümüzde yaygın olarak alternatif kontrolcü çözümleri geliştirilmektedir.

2018 yılında yazılan, Hiper Döngü Ulaşım Sistemi: Analiz, Tasarım, Kontrol ve Uygulama isimli makalede bahsi geçen günümüzdeki alternatif kontrolcü çözüm örneklerinden birine rastlanmaktadır. Evirici devresi montajı, FPGA (Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi) kartı ve pot mikro denetleyici elemanları kontrolcü mekanizmasını oluşturmaktadır. Bu sistemdeki en önemli parça ise Kalman filtresidir. Bu filtre sistemin sonraki olası durumunu tahmin edip parametreleri bu duruma göre güncelleyebilmeyi mümkün kılan bir filtredir. Durum uzay modeli ile gösterilen bir

sistemde, modelin daha önceki bilgilerini giriş ve çıkış bilgileriyle harmanlayarak sistemdeki durumları öngörebilen bu filtre 1960'lı yıllarda Amerikan bilim insanı Rudolf Kalman tarafından bulunmuştur. Bu filtrenin söz konusu kontrolcüdeki görevi ise levitasyon bobinlerinin konumuna göre pot için uygun bir konumu öngörmektir. Potun bobinlere daima paralel bir şekilde konumlanması ve bu şekilde levitasyona maruz kalan maddenin devrilmesi ve sarsılmasının önüne geçebilmek yoluyla bir kontrolcü tasarımı yapılmıştır (Abdelrahman et al. 2018).

2018 yılında kaleme alınan Hassas Maglev Hareket Sistemi için Hibrit Bulanık Dekuplaj Kontrolü isimli çalışma Haibo Zhou, Hua Deng ve Ji'an Duan isimli bilim adamları tarafından yazılmış olup, bir hibrit bulanık ayrıştırma tabanlı kontrolcü tasarımı barındırmaktadır. Maglev sisteminin tam olarak doğrusal olmayan modeli bilinmemesine rağmen kapalı döngü sistem tanımlaması yoluyla bu sistemin doğrusal yaklaşık modeli elde edilebilmiştir. Bu ayrıştırma kontrol stratejisi, ana-bağımlı olarak tanımlanan bir sisteme dayanmaktadır. Bu sistem doğrusal bir ana dekuplaj kontrol kısmı ve doğrusal olmayan bir bağımlı akıllı kompanzasyon kısmından meydana gelmektedir. Bununla beraber bulanık mantık sistemi ise; bulanıklaştırıcıdan, kurallardan ve bulanık çıkarım motorundan oluşmaktadır. Sürekli bir fonksiyona dair istenilen herhangi bir doğrulukla her açıdan tahmin yürütebilmek adına bulanık mantık sisteminin konfigürasyonu kesin bir sınırla kısıtlanmamıştır, bu sayede yaygın bulanık mantık sistemlerinin çoğu sistem gereksinimlerini karşılayabilir haldedirler. Çalışmanın sonucunda, tezde yer alan kontrolcünün, geleneksel PID kontrolcüye kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Zhou et al. 2018).

Bu çalışmanın merkezindeki bulanık mantık terimi 1965 yılında Lütfü Aliasker Zade tarafından ortaya konmuştur. Bu mantık, kümelerden ve o kümelerin alt kümelerinden oluşmaktadır. Geleneksel yaklaşımda bir eleman ya bir kümeye aittir ya da o kümeye ait değildir varsayımı bulunmaktadır. Matematiksel olarak ise, söz konusu eleman o kümenin alt kümesi ise "1", alt kümesi değil ise "0" değerini almaktadır. Bulanık mantıkta ise 0 ve 1 gibi keskin değerler yoktur. Söz konusu elemanın o kümenin alt kümesi olma derecesi vardır. Bu da elemanın değerinin 0 ile 1 arasında herhangi bir değeri olabileceği anlamına gelmektedir. Doğrusal olmayan sistemlerdeki gibi matematiksel model belirlenmesi zor sistemlerde bulanık mantık kullanılarak hata payını

düşürebiliyor olmak kontrolcü üretiminde oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır (Erkan 1999).

2018 yılında Matthew O. T. Cole ve Wichapon Fakkaew isimli bilim adamlarınca yazılan İnce Duvarlı Rotorlar için Aktif Manyetik Rulman: Titreşim Dinamiği ve Denge Kontrolü isimli çalışmada ise optimize edilmiş geri beslemeli kontrolcü tasarımı, bir başka alternatif olarak sunulmuştur. PD kontrolcü geri beslemeli bir şekilde levitasyon yoluyla manyetik yatak kullanımını daha kararlı bir şekilde mümkün kılmıştır. PD geri besleme kontrollü azaltılmış sıralı kapalı döngü modeli kullanılarak sistemdeki titreşim ve kararlılık özellikleri tahmin edilebilmiştir. Statik konumlandırma hatalarını ortadan kaldırmak adına bu kontrolcüye integral geri besleme fonksiyonu da dahil edilerek PD olarak tasarlanan kontrolcüye PID kontrolcüye çevirmek de mümkün olabilirken, çalışmayı yürütenler, bu durumun titreşim kararlılığına etkisinin çok düşük seviyede olacağını düşündükleri için geri beslemeli kontrolcüye PD şeklinde tasarlamışlardır (Cole and Fakkaew 2018).

Geri beslemeli kontrol sistemleri aynı zamanda kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak da isimlendirilmektedir. Bu sistemlerde öncelikle ölçme elemanları yardımıyla bir çıkış değeri kaydedilmektedir. Bu işlemin ardından kaydedilmiş olan çıkış değeri büyüklüğü girişe geri gönderilmektedir. Bu işlem aynı zamanda besleme işlemi olarak da anılmaktadır. Girişe gönderilen bu ölçüm değeri, önceden mevcut olan bir referans değeriyle karşılaştırılıp hata sinyali elde edilmektedir. Elde edilen bu hata sinyalinin yapısı ve kontrol edilen çıkış değişkenine bağlı olarak bir kontrol sinyali üretilip istenilen kontrol bu sinyal aracılığıyla sağlanmaktadır.

Yougang Sun, Junqi Xu, Haiyan Qiang, Chen Chen ve GuoBin Lin isimli bilim adamlarının, Maglev Sistemlerinin RBF Sinir Ağı Minimum Öğrenme Metoduna Dayalı Uyarlanabilir Kayan Kipli Kontrolü isimli makalelerinde radyal tabanlı fonksiyon olarak bilinen RBF metodunun kayan kipli kontrolcüye dahil edilmesi anlatılmıştır. Maglev trenlerinin kontrol karakteristiklerinin yüksek bir belirsizlik seviyesinde olması ve dış bozulma etkeninin zamanla sürekli değişiyor durumda olmasına bir çözüm olarak RBF yöntemi tercih edilmiştir. Bu çalışmada, yakınsama hızını iyileştirmek ve beklentileri

daha keskin bir biçimde karşılayabilmek adına, model bilgisi olmayan sinir ağlarının yerine minimum öğrenme metodu kullanılmıştır (Sun et al. 2019).

RBF fonksiyonlarının toplamı, tipik olarak verilen fonksiyonlara bir yaklaşımda bulunmak adına kullanılmaktadır. Bu tip yaklaşım süreçleri aynı zamanda temel haliyle bir sinir ağı olarak da adlandırılır. 1988’de David Broomhead ve David Lowe isimli iki bilim insanı tarafından makine öğrenmede kullanılmasıyla RBF metodu bilim dünyası tarafından tanınır hale gelmiştir (Hardy 1990).

2019 yılında Wei Wei, Wenchao Xue, Donghai Li isimli bilim adamları tarafından yazılan Manyetik Levitasyonda Bozulma Rejeksiyonu isimli çalışmada ise manyetik levitasyon işleminin barındırdığı; doğrusal olmama, belirsiz dinamiklere sahip olma, çoklu bozulmalar ve sensör gürültüsü gibi problemleri daha basit bir hale indirgeyebilmek ve basit, pratik bir çözüm elde edebilmek adına, zamanla değişen bir aktif bozulma rejeksiyonu çözümü kesin model bilgisine bağlı olmayan bir biçimde hem sayısal hem de deneysel sonuçlarla desteklenmiştir. Yapılan bu çalışmanın nihayetinde simülasyonun nispeten ideal oluşu ve gözlemci için kullanılacak bant genişliğinin daha büyük olması halinde belirsizlikleri daha hızlı ve doğru tahmin etmenin de mümkün olacağı sonucu ortaya çıkmıştır (Wei et al. 2019).

Rejeksiyon terimi Türkçede aynı zamanda reddetme olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışmada reddedilen veya görmezden gelinen husus ise bozulma sinyalleridir. Bozulma sinyalleri, bir kontrol sisteminde çıktıyı etkileyen ve sistem hatasında artışa sebep olan istenmeyen girişler olarak da tanımlanabilir. Kontrol mühendisliğindeki temel görevlerden biri de söz konusu bu bozucu etkiyi mümkün olduğunca minimize etmektir. Manyetik Levitasyonda Bozulma Rejeksiyonu isimli çalışmada bu indirgeme işlemi için Doğrusal Aktif Bozunum Rejeksiyonu kullanılmıştır (Shinner 1998).

LADRC metodu; bozunum rejeksiyonunda, dahili ayrıştırma ve erişilebilen parametre ayarlama konusunda kabul edilebilir bir performansa sahiptir. Sistemin iç belirsizliği ve dış bozunumunu, Genişletilmiş Durum Gözlemleyicisi (ESO) aracılığıyla toplam bozulma olarak algılayıp bu bozulmayı zamanında telafi ederek sistemin istenilen performansta çalışmasını sağlamaktadır (Hui et al. 2019).

2020 yılında Abdullah Mughees ve Syed Ali Mohsin tarafından yazılan Kesirli Dereceli PID Denetleyicisini Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritmasını Kullanıp Optimize Ederek Manyetik Levitasyonun Tasarımı ve Kontrolü isimli çalışmada FOPID (Kesirli Sıralı PID) kullanılarak bir kontrolcü tasarımı önerilmiştir. FOPID kontrolcüler geleneksel PID kontrolcülere kıyasla kapalı döngü sistemlerde daha tutarlı sonuçlar verebilmektedir. FOPID kontrolcülerin bu konuda daha iyi çalışmalarının sebebi, ayarlanabilir iki yeni parametre değerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

Genel anlamda bilinen ve kullanılan PID kontrolcülerinde iç çeşit ayarlanabilir parametre bulunmaktadır. Bu üç parametre; Proportional (Orantı), Integral (İntegral) ve Derivative (Türev) olarak bilinen parametrelerdir. Bu tip kontrolcüler aynı zamanda IOPID (Integer Order PID) olarak da isimlendirilmektedirler. Yapılan isimlendirmeden de anlaşılacağı üzere, standart PID kontrolcülerindeki P, I ve D değişkenleri tam sayılı kuvvetlerle açıklanabilmektedir. Akademik kaynaklarda bu tip isimlendirmelere, ikinci dereceden türev kontrollü PID gibi başlıklarla rastlanabilmektedir. FOPID yani kesirli dereceli PID kontrolcülerinde ise tam sayı olmayan integral ve türev kuvvetleri kullanılarak, konum ya da hız gibi değişkenlerin kontrollerinin daha keskin bir biçimde yapılması öngörülmektedir.

Çalışmanın amacı, levitasyona maruz kalan maddenin salınımlarını azaltabilmek adına yerleşim süresini düşürmektir. Benzer şekilde; yükselme zamanı, tepe zamanı zaman sabiti gibi değişkenler de yerleşim süresi yerine ana odağa alınırsa düşürülebilmektedir (Mughees and Mohsin 2020).

Geleneksel PID kontrolcülerinde; K_p , K_i , K_d olarak yer alan üç değişkene FOPID kontrolcülerinde μ ve λ olmak üzere eklenen bu iki yeni değişken sayesinde daha sağlam ve hassasiyeti daha düşük kontrolcülerin tasarlanması mümkün olmaktadır. Yürütülen bu çalışmada, bahsi geçen beş parametrenin ideal değerlerini bulabilmek adına Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritmasından yararlanılmıştır. ACO, ant colony algorithm olarak da bilinen bu yöntem, bilgisayar bilimi ve yöneylem araştırmalarında grafikler aracılığıyla daha iyi yönelimler bulmaya indirgenebilen hesaplama problemlerini çözmek için kullanılan bir olasılıksal tekniktir (Monmarché et al. 2010).

2021 yılında Addy Wahyudie, Tri Bagus Susilo, Cuk Supriyadi Ali Nandar, Sameer Fayez ve Rachid Errouissi isimli araştırmacılar tarafından kaleme alınan Modelsiz Kontrol ve H_∞ Kontrol Stratejilerini Kullanan Manyetik Levitasyon Sistemleri için Basit Sağlam PID Ayarlamaları isimli çalışmada ise manyetik kaldırma işlemlerinde gürbüz bir kontrol için MLS özelinde: Modelsiz Kontrol (MFC) ve gürbüz bir PID kontrolcünün performansları kıyaslanmıştır. Adından da anlaşılacağı üzere MFC kontrolcü dizaynı için bir matematiksel model gerekmemektedir. MFC çalışmaları yerel bir PID kontrolcüyü ve kayan yüzeyin sürekli doyumluk fonksiyonunu kullanarak bir kontrol mekanizması oluşturmaktadır. Yerel PID parametreleri, deneme yanılma yöntemiyle bulunurken kayma yüzeyindeki diğer parametreler, istenilen takip edebilme yeteneği ve gürbüzlük seviyelerine göre ayarlanmaktadır.

Gürbüz PID kontrolcüsü için doğrusal bir manyetik levitasyon modeli türetilmiştir. H_∞ teorisi kullanılarak gürbüzlük ve takip edebilme yeteneği problemleri formül haline getirilip Genetik Algoritma kullanılarak çözülmüştür. Genetik Algoritma yöntemi aynı zamanda bu Yüksek Lisans tezinde de kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmı için öncelikle kapalı döngü sistem gürbüz bir şekilde stabilize edilmiştir. Ardından referans ile kontrolcüyle modüle edilmiş sistem yanıtının takibinin birbirlerine uymaları sağlanmıştır. Son olarak ise belirli bir geçici performansın karşılanması sağlanmıştır. Bu sayede, kontrol işlemi sağlandıktan sonra, istenilen süre boyunca kontrol işleminin devam edilmesi ön görülmektedir.

Çalışmanın sonucunda ise MFC sisteminde daha detaylı bir model kullanılmasına rağmen H_∞ teorisiyle oluşturulan gürbüz PID kontrolcünün beklenen gereksinimleri daha iyi bir şekilde karşıladığı gözlemlenmiştir (Wahyudie et al. 2021).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada tasarlanan kontrol metotları CE 152 olarak bilinen bir basit ve tek boyutlu manyetik levitasyon düzeneğinin matematiksel modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Söz konusu sistemin matematiksel modeli kullanılırken Newton'un Hareket Yasası doğrultusunda ilerlenmiştir. CE 152 sistemi Humusoft isimli bir Çekyalı şirket tarafından geliştirilen deney tabanlı bir sistemdir. Buradaki deney tabanlı sistem terimi, bu sistemin gerçek hayatta herhangi bir kullanım alanının olmadığı, sadece gözlem yapabilmek adına tasarlanan bir sistem anlamına gelmektedir.

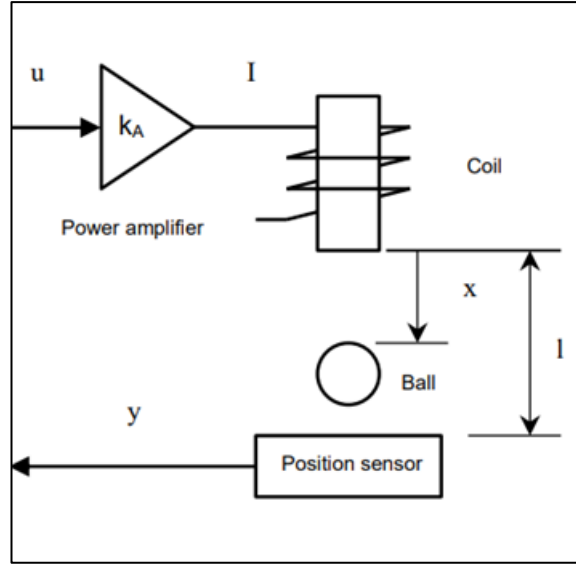
CE 152 sisteminde bir demir bilye, elektromıknatıs tarafından üretilen bir elektromanyetik kuvvet tarafından havaya kaldırılır ve bu kaldırma işlemi belirli bir seviyeye kadar gerçekleştirilir. Söz konusu referans seviyeden sonra ise ana amaç, bilyeyi havada asılı bir şekilde tutmaya devam etmektir. CE 152 sistemi, tek giriş ve tek çıkışa sahip olması (SISO (Single Input Single Output)), belirgin bir şekilde doğrusal olmayan karakteristiği ve kararsız bir sistem olması sebebiyle sistem dinamikleri üzerinde çalışmak ve klasik veya modern kontrol teorilerini üzerinde uygulayabilmek adına ideal bir düzenektir. Daha önce bu sistem baz alınarak; PID kontrolcüler, polinom kontrolcüler, doğrusal olmayan durumlar da dahil gürbüz veya model öngörücü kontrolcüler bu sistem üzerine uygulanarak çeşitli literatür çalışmaları yapılmıştır. Kontrolcü tasarım örnekleri incelendiğinde çoğu için bir dinamik matematiksel model kullanımı gerektiği görülmektedir. Bu tip çalışmalarda çoğunlukla doğrusal modeller kullanılmasına rağmen manyetik levitasyon işlemi incelendiğinde bu sistemin temelde doğrusal olmayan bir sistem olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin demir bilye üzerine uygulanan manyetik kaldırma kuvvetinin hesabında konum ve akım parametrelerinin karesel ifadeleri yer almaktadır. Bu sebeple gerçeğe daha yakın simülasyonlar ve daha güvenilir kontrolcüler tasarlayabilmek adına doğrusal olmayan sistem modellerinin de kullanıldığı görülmektedir. Bu sistem özelinde bilinmeyen parametreleri elde edebilmek için çoğunlukla bu yüksek lisans tezinde de yapıldığı gibi Newton'un Hareket Yasası ile bir model türetilir. Çalışmalardan bazıları çok küçük bir değere sahip olduğu için demir bilyenin kalkışı sırasında kazandığı hızdan kaynaklanan sürtünme kuvvetini bu modele dahil etmezken bazıları sürtünme kuvvetini de dahil etmektedir. Geri kalan bilinmeyen parametreler ise deneysel verilerden elde edilebilmektedir. Örneğin demir bilyenin

levitasyona maruz kaldıktan sonra edildiği konum bir bilinmeyen parametre örneği teşkil edip deneysel olarak bulunabilmektedir. CE 152 sistemi ile bir deneysel çalışma yapıp bilinmeyen parametrelerin bulunmasının mümkün olmadığı durumlarda ise harici ve dahili matematiksel gösterimin parametrelerinin, ölçülen süreç yanıtlarından tahmin edilmesini sağlayan ve Black-Box Identification olarak bilinen yöntem kullanılabilmektedir (Honc 2019).

Black-Box Identification yani Türkçe haliyle Kara Kutu Tanımlama Prosedürü, bir sistem işletilirken giriş ve çıkış sırasını uzun bir süre boyunca izleyip kaydeden ve sonrasında kapalı çevrim bir sistem için daha kapsamlı bir model sunabilen bir çeşit uygulamadır. Bu sistem kullanılarak kontrolcü davranışlarına oldukça yakın tahminler yürütebilmek mümkündür. Bu uygulama, sunduğu bu tahmin yeteneği sayesinde, bilgisayar destekli bir şekilde tersine mühendislik yapabilmek adına oldukça kullanışlı bir araç olarak değerlendirilmektedir (Estrada-Vargas et al. 2015).

CE 152 sistemi en temel haliyle üç ana başlık altında incelenebilmektedir. Bunlar; bobin, elektronik aksam ve demir bilye olarak sıralanmaktadır. Bu üç parça bir veri toplama kartı (DAQ) ve bilgisayar ile tamamlandıktan sonra deney düzeneği de son halini almaktadır. Topun manyetik olarak havaya kaldırılması, DAQ kartının çıkışına bağlı D/A kısmındaki bobin tarafından üretilen manyetik alanın sağlanması ve demir bilyenin endüktif doğal konumunun, DAQ kartının A/D girişine bağlı doğrusal konum sensörü tarafından algılanması bu düzeneğin temel işleyiş sıralamasını oluşturmaktadır.

Sistemde kullanılan elemanlardan biri olan güç yükselteci, DAQ kartı tarafından üretilen giriş voltajı ile orantılı ve dengelenmiş bir akım kaynağı için kullanılmaktadır. Bu sisteme uygulanan 0 ile 5 V arası gerilim, 0 ile 1,5 A arasında değişen bir akım değeri sunmakta ve bobinler bu akımla ile indüklendikten sonra Earnshaw yasası gereğince doğrusal olmayan bir manyetik alan meydana getirebilmektedirler. Kullanılan elektrik bileşenlerinin parametrelerinden faydalanılarak bu güç yükseltecinin kazancının 0,297 olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir (Honc 2019).



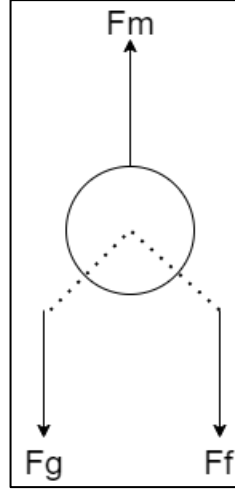
Şekil 3.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi şeması (Honc 2019)

CE 152 sistemine dair bu kısma kadar anlatılanlar, yukarıdaki blok şema üzerinden de görülebilmektedir.

CE 152 sistemini matematiksel olarak modelleyebilmek adına ilk olarak Newton'un Hareket Yasası üzerinden işlemlere başlanmıştır.

$$F = m \cdot a \quad (3.1)$$

formülünden hareketle, bir cisme etkiyen net kuvvetin yani F 'nin sıfır olması durumunda söz konusu cismin ivmesinin de yani a 'nın da sıfır olması gerekeceğinden, manyetik levitasyon ile havada asılı tutulan demir bilyenin asılı kaldığı pozisyonu koruyabilmesi için üzerine etkiyen net kuvvetin sıfır olması gerekmektedir. Bu koşul sağlandığı tek boyutu olan ve o boyuta da düşey eksen olan manyetik kaldırma işlemi gerçekleşmiş olacaktır.



Şekil 3.2. Demir bilye manyetik levitasyona maruz kaldığında üzerine etkiyen kuvvetler

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, manyetik levitasyon işlemi sırasında demir bilye üzerine etkiyen üç tane kuvvet vardır. Burada demir bilyeyi yukarıya doğru çeken F_m kuvveti aynı zamanda manyetik kaldırma kuvveti olarak geçmekte olup, şu şekilde ifade edilebilmektedir.

$$F_m = \frac{i^2 K_c}{(x-x_0)^2} \quad (3.2)$$

3.2 numaralı denklikteki ifadeler;

i = Bobin Üzerinden Akan Akım

K_c = Bobin Kazanç Sabiti

x = Demir Bilyenin En Alttaki Pozisyon Sensörü ile Bobin Arasındaki Pozisyonu

x_0 = Demir Bilyenin Ofset Pozisyonu

olarak verilmektedir.

Endüktif bir bobin kullanarak oluşturulan elektromıknatıs sayesinde demir bilyenin etrafında bir potansiyel kuyusu oluşturulabilmektedir. Bu tip mıknatıslanmalar statik manyetik alanlara yol açmamaktadırlar. Levitasyon işlemi gerçekleştirilmek için ihtiyaç duyulan manyetik alan, statik değil zamanla değişen manyetik alandır. Ters Kare Yasası gereğince manyetik kuvvetin kaynağından uzaklaştıkça uygulanan manyetik

kuvvet karesel oranda azalacağı için kararlı bir kaldırma işlemini uygulamak statik manyetik alanlar ile mümkün olmamaktadır. CE 152 sisteminde mıknatıs olarak endüktif bir bobin kullanılmasının sebebi ise zamanla değişen bir manyetik alan yaratarak demir bilyenin etrafında oluşturulan potansiyel kuyusu yardımıyla, levitasyonun etkiyeceği alan boyunca homojen bir kaldırma kuvveti sağlayabilmektir.

Manyetik kaldırma kuvveti denkleğinin temelini bobinin enerjisini veren denklikten almaktadır. Bu denkleğe göre bobin enerjisi;

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (3.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu denklikteki ifadeler;

W_m = Bobin Enerjisi

L = Bobin Endüktans Değeri

i = Bobin Üzerinden Akan Akım

olarak verilmektedir. Bu ifadedeki L değeri ise;

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Endüktans değerini veren bu ifadede;

N Sarım Sayısı

R = Bobin Elemanının İç Direnci

şeklinde isimlendirilmektedir. Son olarak bobin elemanının iç direncini veren ifade;

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (3.5)$$

Biçiminde ifade edilmiştir. Bobin iç direncini ifade eden denklikteki semboller ise sırasıyla;

l = Bobin Uzunluğu

μ = Manyetik Geçirgenlik

A = Bobinin Yatay Kesit Alanı

ile verilmektedir. Denklik 3.3'te verilen L değerinin yerine denklik 3.4'te verilen ifade yazılırsa;

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2}{R} \cdot i^2 \quad (3.6)$$

denkliği ortaya çıkacaktır. Bu denklikte bobin iç direncini ifade eden R gösterimi yerine ise denklik 3.5'te ifade edilen eşitlik kullanıldığında;

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2}{\frac{l}{\mu A}} \cdot i^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu AN^2}{l} \right) \cdot i^2 = \frac{\mu AN^2 i^2}{2l} \quad (3.7)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. Enerjinin, etki ettiği konuma göre olan türevi kuvveti vermektedir. Benzer şekilde işin yapıldığı konuma göre olan türevi de kuvveti vermektedir. Bobinin enerjisinin denkliği bilindiğine göre bu denklikteki enerjinin etki ettiği konuma göre alınacak türev işlemiyle bobinin kuvveti, bir başka deyişle bobin tarafından demir bilyeye uygulanan manyetik kaldırma kuvvetinin denkliğine ulaşmak mümkün olmaktadır. Türev işlemi yapılırsa;

$$F_m = \frac{dW_m}{dl} = \left(\frac{\mu AN^2 i^2}{2l} \right) \frac{d}{dl} = \frac{\mu AN^2 i^2}{2l^2} \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilmektedir. Daha önce bobin kazanç sabit olarak da verilen K_c ifadesi aynı zamanda;

$$K_c = \frac{\mu AN^2}{2} \quad (3.9)$$

şeklilde ifade edilebildiğinden dolayı, denklik 3.8'deki $\frac{\mu AN^2}{2}$ kısmı yerine K_C yazılırsa;

$$F_m = \frac{K_C i^2}{l^2} \quad (3.10)$$

halini almaktadır. Enerjinin etki ettiği konuma göre alınan bu türev işleminde l yerine, manyetik levitasyon işleminin uygulanacağı konumu ifade eden $(x - x_0)$ yazılarak manyetik kaldırma kuvvetinin denklik 3.2'deki ifadesine ulaşabilmek mümkündür.

Demir bilyeyi aşağıya doğru çeken kuvvetlerden ilki F_g olarak ifade edilen yer çekimi kuvvetidir. Yine Newton'un hareket yasasından yola çıkarak $F = m \cdot a$ denkliği kullanılarak ifade edilebilir. Burada m ifadesi yerine demir bilyenin kütlesini ifade eden m_k , ivmeyi simgeleyen a ifadesi yerine de yer çekimi ivmesi olarak alınan g ifadesi konulursa demir bilyeye etkiyen yer çekimi kuvveti ifade edilebilmektedir. Bu durumda;

$$F_g = m_k \cdot g \quad (3.11)$$

ifadesi demir bilyeyi aşağıya doğru çeken kuvvetlerden ilki olan yer çekimi kuvvetini ifade etmekte kullanılabilmektedir.

Demir bilyeyi aşağıya doğru çeken kuvvetlerden ikincisi ise levitasyon işleminin başlamasıyla birlikte zeminden yukarıya doğru hareket eden demir bilyenin kalkış hızı ile birlikte oluşan hıza bağlı sürtünme kuvvetidir. Bu kuvvet CE 152 sistemi kullanılarak yapılan modellemelerde çok küçük olduğu için çoğunlukla hesaplamalara dahil edilmeyen bir kuvvet olmakla birlikte bu yüksek lisans tezi çalışmasında hesaplamalara dahil edilmiştir. F_f olarak da ifade edilen bu sürtünme kuvvetinin formülü, tanımıyla da bağlantılı olarak;

$$F_f = K_{fv} \cdot v \quad (3.12)$$

ifade edilmektedir.

Nihayetinde CE 152 sisteminde bir manyetik levitasyon işlemi uygulandığı esnada demir bilyeye etki eden üç kuvvetin denklıklarına ulaşılmıştır. Havada asılı kalma işleminin kararlı bir şekilde gerçekleşebilmesi için levitasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştikten hemen sonra, demir bilyeye etki eden net kuvvetin sıfır olması gerektiği bilindiğine göre;

$$F_{net} = F_m - F_g - F_f = 0 \quad (3.13)$$

durumunun sağlanması demir bilyeyi havada asılı bir halde tutmak için gerekmektedir. Bir başka deyişle, demir bilyeyi yukarı kaldırmaya zorlayan manyetik kaldırma kuvvetinin, demir bilyeyi aşağı indirmeye zorlayan yer çekimi kuvveti ve hıza bağlı sürtünme kuvvetinin toplamına eşit olması gerekmektedir. Denklik 3.13'teki kuvvet ifadeleri yerine denklik 3.2, denklik 3.11 ve denklik 3.12'deki ifadeler konursa;

$$F_{net} = \frac{i^2 K_c}{(x-x_0)^2} - m_k \cdot g - K_{fv} \cdot v \quad (3.14)$$

ifadesine ulaşılmaktadır.

3.14 denkliği elde edildikten sonra durum uzay modeli oluşturularak CE 152 levitasyon sisteminin transfer fonksiyonu elde edilebilmektedir. Elde edilen bu transfer fonksiyonu sırasıyla tasarlanan PID ve İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcülerle birlikte bir kapalı çevrimde kullanılarak kontrolcü davranışları izlenebilmektedir.

Durum uzay modeli (SMM (State Space Model)), durumun ve ölçümün sürekli veya ayrık olmasına bakmaksızın gizli durum değişkeni ile gözlemlenen ölçüm arasındaki olasılık bağımlılığını tanımlayan bir olasılıksal grafik model sınıfını ifade etmekte kullanılmaktadır. Bu model, stokastik bir süreçle ölçülen ve gözlemlenen deterministik ve stokastik dinamik sistemleri analiz etmekte genel bir çerçeve sağlamaktadır (Koller and Firedman 2009). Bu açıklamada kullanılan stokastik terimi rastlantısal kelimesini karşılayan bir sıfattır, deterministik terimi ise sistemin gelecekteki durumlarının gelişiminde bir rastgelelik durumu barındırmayan sistemleri için kullanılan bir terimdir (Anonymous 2016a).

Sistemin durum uzay modelini elde edebilmek için öncelikle terimleri birbirlerinin türevleri cinsinden ifade etmek gerekmektedir. Bunun için;

$$\text{Konum, } x_1 = x \quad (3.15)$$

$$\text{Hız, } x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x} \quad (3.16)$$

$$\text{Akım, } x_3 = i \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Tıpkı x_1 ifadesi gibi x_2 ve x_3 ifadelerinin de türevsel gösterimlerinin bulunması, durum uzay matrisini oluşturmak için gerekli olduğundan dolayı;

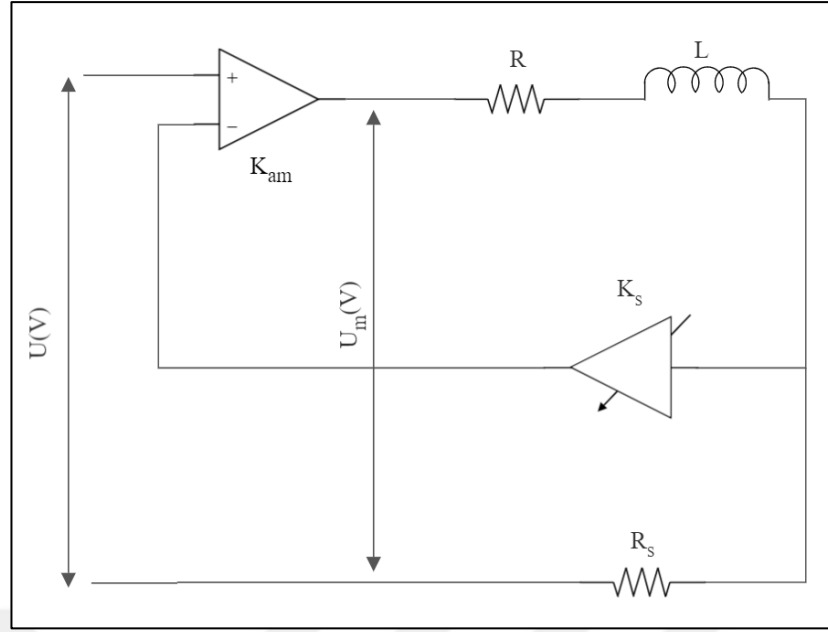
$$\dot{x}_2 = \ddot{x} \text{ ve } \dot{x}_3 = i(t) \quad (3.18)$$

şeklinde türev işlemleri yapılmaktadır. 3.15, 3.16, 3.17 ve 3.18 numaralı denklıklar, denklik 3.14'te yerlerine yazılırsa;

$$\dot{x}_2 = \frac{x_3^2 K_c}{m_k (x_1 - x_0)^2} - g - \frac{K_{fv}}{m_k} \cdot x_2 \quad (3.19)$$

denkliği elde edilmektedir.

Bu noktadan sonra x_3 ifadesinin türevli haline ihtiyaç duyulmaktadır. $\dot{x}_3 = i(t)$ ifadesi için CE 152 sistemindeki güç yükselteci devresinden yararlanılmaktadır. Çünkü akımın türevini içeren ifade için akım ve gerilim arasındaki bağlantıdan yola çıkarak işlemler yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.3. CE 152 manyetik levitasyon sistemi güç yükselteç devresi (El Najjar 2013)

Söz konusu güç yükseltici devresinin şeması şekil 3.3’de gösterilmektedir. Devre şemasından hareketle çıkış gerilim değeri ve giriş akım değeri arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Bu devrede yer alan bobin bir diğer adıyla indüktör elemanının üzerinden akım geçmesiyle birlikte edindiği gerilim değeri belirtilirken;

$$L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.20)$$

işlemi yapılacağından, akımın türevli ifadesine yani; $\dot{x}_3 = i(t)$ gösterimine ulaşabilmek mümkün olacaktır.

Güç yükseltici devre şeması kullanılarak, bir kapalı çevrimdeki tüm potansiyel farkların sıfır olması gerektiği ilkesinden hareketle;

$$u_m = iR + L \frac{di}{dt} + iR_s \quad (3.21)$$

denkliği elde edilmektedir. u_m ifadesi yükselteç kazançları cinsinden ifade edilirse;

$$u_m = K_{am}(u - K_s(iR_s)) \quad (3.22)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. Bu durumda 3.21 ve 3.22 denklikleri u_m ifadesini verdiklerinden dolayı birbirlerine eşit olarak kabul edilerek;

$$iR + L \frac{di}{dt} + iR_s = K_{am}(u - K_s(iR_s)) \quad (3.33)$$

eşitliğine ulaşılabilir. Bu kısımdan sonra Laplace dönüşümü kullanılarak hesaplamalar daha kolay bir hale getirilebilmektedir. Laplace dönüşümü yaparak zaman tanım kümesinde tanımlı olan bir fonksiyon, frekans tanım kümesinde tanımlı bir hale getirilir ve bu dönüşüm, türev işlemi içeren ifadelerde $\frac{di}{dt}$ gösterimi yerine s gösterimi kullanımını sağlayarak daha basit gösterimleri mümkün kılmaktadır.

Dolayısıyla 3.33 numaralı denklik frekans tanım kümesinde tanımlanırsa, bir başka deyişle 3.33 numaralı denkliğin s -domenindeki karşılığı;

$$IR + LIs + IR_s = K_{am}U - K_{am}K_sR_sI \quad (3.34)$$

Olarak ifade edilmektedir. Güç yükselteç devresinde çıkış gerilim değeri ile giriş akım değeri arasında bir bağlam oluşturulmaya çalışıldığından 3.34 numaralı denklikte Çıkış gerilimi ve giriş akımı denkliğin aynı tarafında toplanarak işleme devam edildiğinde;

$$\frac{I}{U} = \frac{K_{am}}{R} \left(\frac{1}{\frac{L}{R}s + 1 + \frac{R_s + K_{am} + K_sR_s}{R}} \right) \quad (3.35)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. CE 152 sisteminin güç yükselteci devresinde tanımlı olan R direncinin büyüklüğü, R_s direncinin büyüklüğünden çok daha büyük bir değere sahip olduğu ön kabulünde bulunulursa 3.35 numaralı denkliğin yeni hali;

$$\frac{I}{U} = \frac{K_{am}}{R} \left(\frac{1}{\frac{L}{R}s + 1} \right) \quad (3.36)$$

şeklinde olacaktır. Ardından, K_i güç yükseltecinin kazancı ve τ_a ise zaman sabiti olarak alınır;

$$\frac{I}{U} = K_i \left(\frac{1}{\tau_a s + 1} \right) \quad (3.37)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. 3.37 numaralı denkleme ulaşabilmek için yeni tanımlanan kazanç değeri olan K_i ifadesinin, CE 152 manyetik levitasyon sisteminin güç yükselteci devresinde bulunan kazanç ifadesi olan K_{am} değerinin R direncine bölünmüş hali olduğu varsayılmaktadır. τ_a olarak ifade edilen zaman sabiti ise RL ve RC devrelerinde voltaj ve akım değerlerindeki belirli değişikliklerin gerçekleşmesi için gereken zaman ölçüsü olarak bilinmektedir. Bu tip devrelerde genellikle anahtarlama gerçekleştikten 5τ süre sonra akım ve gerilim değerleri kararlı durum yanıtı olarak da bilinen nihai değerlerine ulaşmaktadırlar. CE 152 sisteminin güç yükselteci devresinde bir RL devresi kullanılmaktadır ve RL devrelerinde zaman sabiti;

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.38)$$

olarak ifade edilmektedir.

Yapılan işlemler sonucunda 3.37 denklemini artık frekans domeninden tekrar zaman domenine getirmek mümkündür. Gerekli dönüşümler yapıldığında;

$$\tau_a \dot{i}(t) + i(t) = K_i u(t) \quad (3.38)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. Bu noktada artık durum uzay modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan üçüncü türevli ifadeye yani $\dot{i}(t)$ ifadesine de ulaşılmış bulunmaktadır. $\dot{i}(t)$ ifadesi yalnız bırakıldıktan sonra artık durum uzay matrisi için kullanılabilir hale gelmektedir. Gerekli işlemler yapıldıktan sonra;

$$\dot{i}(t) = \frac{K_i u(t) - i(t)}{\tau_a} \quad (3.39)$$

denkliğine ulaşılmaktadır.

$$\dot{x}_3 = i(t) = \frac{K_i u(t) - i(t)}{\tau_a} \quad (3.40)$$

Denkliğine ulaşıldıktan sonra nihayetinde;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{x_3^2 \cdot K_c}{m_k (x_1 - x_0)^2} - g - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2 \\ \dot{x}_3 = \frac{K_i u(t) - x_3}{\tau_a} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

matrisine ulaşılmaktadır. 3.41 numaralı matrise bakıldığında, ikinci satıdaki “ $\dot{x}_2 = \frac{x_3^2 \cdot K_c}{m_k (x_1 - x_0)^2} - g - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2$ ” ifadesinde yer alan x_1^2 ve x_3^2 ifadelerindeki karesel gösterimden dolayı doğrusal olmayan bir sistemi ifade ettiğini söylemek mümkün olmaktadır. Bir sistemin durum uzay modelini bulup, bu model üzerinden bir transfer fonksiyonu elde edebilmek için incelenen sistemin doğrusal olması gerekmektedir. Bu halde doğrusallaştırma işlemini sağlayabilmek adına Taylor Serisi Açılımı olarak bilinen bir yöntemden yararlanmak gerekmektedir. Taylor Serisi’ni kısaca, tek bir noktada fonksiyonun türevleri olarak ifade edilen sonsuz bir terim toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu yolla yapılan açılımlarda belirli bir süre deva edildikten sonra genel toplamın sürekli olarak belirli bir sayıya yakınsadığı ve söz konusu belirli sayıyı hiç açmadığı gözlemlenmektedir. Elde ettiğimiz 3.41 numaralı matrisi Taylor Serisi ile açarak x_1^2 ve x_3^2 karesel ifadelerindeki üstel gösterimin indirgenmesi amaçlanmaktadır.

CE 152 manyetik levitasyon sisteminde, demir bilyenin sistemin zemininde serbest bir şekilde sabit durduğu an incelenirse; bobin üzerinden geçen $i(t)$ akımının, konumun birinci türevi olup hızı gösteren $\dot{x}$ ifadesinin ve konumun ikinci türevi olup ivmeyi gösteren $\ddot{x}$ ifadesinin sıfır olduğu andan başlanarak denklem takımları yeniden düzenlenmektedir. Ardından karesel gösterime sahip olup sistemin doğrusal olma durumunu bozan x_1^2 ve x_3^2 ifadeleri sırasıyla a ve b olarak isimlendirilerek bu noktalar çalışma noktaları olarak belirlenmektedir. a ve b noktalarını belirlerken iki adet referans değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu bu referans noktaları, demir bilyenin

3. MATERYAL ve YÖNTEM

levitasyon işlemine maruz kalıp, CE 152 sistemindeki levitasyon bölgesinin tam orta noktasında kararlı bir haldeyken gözlemlenen konum ve akım değerleridir. Bu referans noktalarını belirleyebilmek için CE 152 sisteminin parametre tablosuna bakmak gerekmektedir.

Çizelge 3.1. CE 152 manyetik levitasyon sistemi parametreleri (El Najjar 2013)

Parametre	Sembol	Değer
Demir Bilyenin Çapı	D_k	12×10^{-3} m
Demir Bilyenin Kütlesi	m_k	0,0084 kg
Zemin ve Endüktif Bobin Arasındaki Mesafe	T_d	0,019 m
Endüktif Bobin ile Demir Bilye Arasındaki Mesafe (Demir Bilye Zeminde Serbest Bir Halde Duruyorken)	L_x	0,0063 m
Yerçekimi İvmesi Sabiti	g	$9,81 \text{ m/s}^2$
DA Dönüştürücüdeki Maksimum Çıkış Gerilimi	U_{DAM}	5 V
Bobinin İç Direnci	R	$3,5 \Omega$
Bobinin Endüktans Değeri	L	30×10^{-3} H
Akım Sensörü Direnci	R_s	$0,25 \Omega$
Akım Sensörü Kazancı	K_s	13,33
Güç Yükselteci Kazanç Sabiti	K_{am}	100
Güç Yükselteci Devresindeki Maksimum Çıkış Akımı Değeri	I_{am}	1,2 A
Güç Yükselteci Devresindeki Zaman Sabiti	τ_a	3×10^{-3} s
Güç Yükselteci Devresindeki Kazanç Sabiti	K_i	0,3
Demir Bilyenin Hızına Bağlı Sürtünme Sabiti	K_{fv}	$0,02 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
Dijitalden Analoga Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti	K_{DA}	10
Dijitalden Analoga Dönüştürücü Devresindeki Ofset Gerilim Değeri	U_0	0 V
Analogdan Dijitale Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti	K_{AD}	0,2
Analogdan Dijitale Dönüştürücü Devresindeki Ofset Gerilim Değeri	Y_{MU0}	0 V
Pozisyon Sensörü Kazanç Sabiti	K_x	797,4603
Bobin Sapma Değeri	x_0	$8,26 \times 10^{-3}$ m
Toplu Bobin Sabiti	K_f	$6,606 \times 10^{-6}$ N/V
Bobin Sabiti	K_c	$6,8823 \times 10^{-6}$ N/V

Çizelge 3.1'deki değerler göz önünde bulundurularak a değerinin;

$$T_d/2 \quad (3.42)$$

olduğu görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere a , demir bilyenin levitasyon işlemine maruz kalıp, CE 152 sistemindeki levitasyon bölgesinin tam orta noktasında kararlı bir haldeyken gözlemlenen konum değeridir.

b değeri için, denklik 3.19 kullanılabilmektedir.

$$\dot{x}_2 = \frac{x_3^2 K_c}{m_k(x_1 - x_0)^2} - g - \frac{K_{fv}}{m_k} \cdot x_2 \quad (3.19)$$

denkliğinde, bobin üzerinden geçen $i(t)$ akımının, konumun birinci türevi olup hızı gösteren $\dot{x}$ ifadesinin ve konumun ikinci türevi olup ivmeyi gösteren $\ddot{x}$ ifadesinin sıfır olduğu an baz alınır;

$$\text{Konum, } x_1 = x \quad (3.15)$$

$$\text{Hız, } x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x} \quad (3.16)$$

$$\text{İvme, } x_3 = \ddot{x}_1 = \ddot{x} \quad (3.43)$$

$$\text{Akım, } x_3 = i \quad (3.17)$$

verileri ile beraber, demir bilyenin levitasyon işlemine maruz kalıp, CE 152 sistemindeki levitasyon bölgesinin tam orta noktasında kararlı bir haldeyken gözlemlenen akım değeri olan $x_3 = i = b$ ifadesi denkliğin bir tarafında yalnız bırakılırsa sırasıyla;

$$g = \frac{b^2 K_c}{m_k(a - x_0)^2} \quad (3.44)$$

$$b^2 = \frac{m_k g (a - x_0)^2}{K_c} \quad (3.45)$$

$$b = \mp (a - x_0) \sqrt{\frac{m_k g}{K_c}} \quad (3.46)$$

denkliklerine ulaşılmaktadır. Bu denklikteki; x_0 , m_k , g ve K_c değerlerinin karşılıkları Çizelge 3.1’de görülmektedir Denklik 3.42’ye göre $a = \frac{T_d}{2}$ olduğu bilgisi ile beraber 3.46 numaralı denklikte tüm gösterimlerin sayısal değerleri yerlerine yazıldığında;

$$b = \mp \left(\frac{0,019}{2} - 8,26 \times 10^{-3} \right) \sqrt{\frac{0,0084 \times 9,81}{6,8823 \times 10^{-6}}} \quad (3.47)$$

sonucuna ulaşılır. Denklik 3.47’deki işlemler sonuçlandırıldığında b değeri için 0,13568 ve -0,13568 sonuçları bulunmaktadır. b değerinin -0,13568 olması demek, demir bilyenin CE 152 sisteminin altında bir yerlerde dengede kalacağı anlamına gelmektedir. CE 152 sistemi ile yapılan manyetik levitasyon işleminde ise amaçlanan durum, demir bilyenin CE 152 sisteminin levitasyon bölgesinin olduğu yerde havada asılı bir şekilde dengede kalması olduğu için b parametresi için 0,13568 değeri seçilmektedir.

Yapılan işlemlerin nihayetinde a parametresi 0,0095 ve b parametresi ise 0,13568 olarak ifade edilmektedir. Bu durumun bir diğer açıklaması ise CE 152 manyetik levitasyon sisteminin durum uzay modelinin $(a, b) = (0,0095 \ 0,13568)$ noktaları etrafında doğrusal olduğu olarak ifade edilmektedir.

Bobin üzerinden geçen $i(t)$ akımının, konumun birinci türevi olup hızı gösteren $\dot{x}$ ifadesinin ve konumun ikinci türevi olup ivmeyi gösteren $\ddot{x}$ ifadesinin sıfır olduğu an baz alınarak durum uzay modelini doğrusal hale getirme işlemine devam edilirse;

$$\dot{x}_2 = \frac{b^2 K_c}{m_k (a - x_0)^2} + \left(\frac{-2b^2 K_c}{m_k (a - x_0)^3} \right) x_1 + \left(\frac{2b K_c}{m_k (a - x_0)^2} \right) x_3 - g - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2 \quad (3.48)$$

halinde bir Taylor Serisi açılımı yapılmaktadır. Bu açılımda; konum yani x_1 , hız yani x_2 , iveme yani $\dot{x}_2$ ve akım yani x_3 değerlerinin sıfır olduğu anda işlemlerin yürütüldüğü bilindiğine göre 3.48 denkliği şu şekilde de ifade edilebilmektedir;

$$0 = \frac{b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^2} - g \quad (3.49)$$

denklik 3.48’de “ $\dot{x}_2 = \frac{b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^2} + \left(\frac{-2b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^3}\right) x_1 + \left(\frac{2b K_c}{m_k(a-x_0)^2}\right) x_3 - g - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2$ ” şeklinde görülen ifadede durum değişkenleri olarak bilinen x_1 , x_2 ve x_3 cinsinden ifade edilemeyen tek parametre yerçekimi kuvveti yani g parametresi olarak görülmektedir. Denklik 3.49’daki g parametresi yalnız bırakıldığında;

$$g = \frac{b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^2} \quad (3.50)$$

denkliğine ulaşılmaktadır. 3.50 numaralı denklikteki g parametresi 3.48 numaralı denklikteki yerine konulduğunda ise tüm parametreler, x_1 , x_2 ve x_3 cinsinden, yani durum değişkenleri biçimde ifade edilebilmektedir. O halde;

$$\dot{x}_2 = \left(\frac{-2b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^3}\right) x_1 - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2 + \left(\frac{2b K_c}{m_k(a-x_0)^2}\right) x_3 \quad (3.51)$$

denkliği oluşturularak durum uzay matrisi için gerekli olan, sistemin tamamının durum değişkenleri cinsinden ifade edilme şartına ulaşılmaktadır. 3.41 numaralı matristeki doğrusal olma halini bozan durumlar da ortadan kaldırıldığına göre doğrusal olan yeni matris;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \left(\frac{-2b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^3}\right) x_1 - \frac{K_{fv}}{m_k} x_2 + \left(\frac{2b K_c}{m_k(a-x_0)^2}\right) x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{K_i u(t) - x_3}{\tau_a} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu matrise Analogdan Dijitale Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti ve Dijitalden Analoga Dönüştürücü Devresindeki Kazanç Sabiti değerleri de eklenerek bir durum uzay matris grubu oluşturulmuş, söz konusu matris grubu;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{-2b^2 K_c}{m_k(a-x_0)^3} & -\frac{K_{fv}}{m_k} & \frac{2bK_c}{m_k(a-x_0)^2} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_i K_{DA}}{\tau_a} \end{bmatrix} U_{MU}(t) \quad (3.53)$$

$$[Y_{MU}] = [K_x K_{AD} \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0] U_{MU}(t) \quad (3.54)$$

şeklinde olmaktadır. 3.53 ve 3.54 numaralı matris grubundaki tüm parametrelerin sayısal değerleri, Çizelge 3.1 ve yapılan işlemler yardımıyla yerlerine konulduğunda;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -15821,6191 & -2,381 & 144,5962 \\ 0 & 0 & -53493,0994 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 158714,0259 \end{bmatrix} U_{MU}(t) \quad (3.55)$$

$$[Y_{MU}] = [159,4921 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0] U_{MU}(t) \quad (3.56)$$

matris grubuna ulaşılmaktadır (El Najjar 2013).

3.56 matris grubundaki matrisler durum uzay matrisleri olarak bilinmektedir. Bu matrisler kullanılarak CE 152 sistemi bir transfer fonksiyonu cinsinden ifade edilip, sistem üzerine kontrolcü çalışmaları yapılabilmektedir. Söz konusu matrislerden bir transfer fonksiyonu elde edebilmek için öncelikle matrisler isimlendirilmektedir. CE 152 sisteminin matematiksel modellemesi üzerinden bulunan 3.56 matris grubuna ait bu isimlendirmeler;

$$A = \text{Sistem Matrisi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -15821,6191 & -2,381 & 144,5962 \\ 0 & 0 & -53493,0994 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$B = \text{Giriş Matrisi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 158714,0259 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$C = \text{Çıkış Matrisi} = [159,4921 \quad 0 \quad 0] \quad (3.59)$$

$$D = \text{İleri Besleme Matrisi} = [0] \quad (3.60)$$

şeklinde olmaktadır. $G(s)$ olarak gösterilen bir transfer fonksiyonunu; sistem matrisi, giriş matrisi, çıkış matrisi ve ileri besleme matrisi kullanarak ifade edip, CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemine ait transfer fonksiyonu (Eker 2010) çalışması baz alınarak;

$$\text{Konum, } x_1 = x \quad (3.15)$$

$$\text{Hız, } x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x} \quad (3.16)$$

$$\text{İvme, } x_3 = \ddot{x}_1 = \ddot{x} \quad (3.43)$$

$$\text{Akım, } x_3 = i(t) \quad (3.17)$$

denklem takımı ve

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -15821,6191 & -2,381 & 144,5962 \\ 0 & 0 & -53493,0994 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 158714,0259 \end{bmatrix} U_{MU}(t) \quad (3.55)$$

$$[Y_{MU}] = [159,4921 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0] U_{MU}(t) \quad (3.56)$$

matris takımı kullanılarak;

$$\dot{x}_2 = -15821,6191x_1 - 2,381x_2 + 144,5962x_3 \quad (3.61)$$

şeklinde yazılabilir, bu denklikteki durum değişkenlerinin ilgili olanları konum ve türevleri cinsinden ifade edilirse;

$\ddot{x} = -2,381\dot{x} - 15821,6191x + 144,5962 i(t)$ (3.62) halini alacaktır. (Eker 2010) çalışması doğrultusunda bu gösterim;

$$\ddot{y}_m(t) = -(A_n \pm \Delta A)\dot{y}_m(t) - (B_n \pm \Delta B)y_m + (C_n \pm \Delta C)u(t) + d(t) \quad (3.63)$$

$$y_m = \text{Çıkış}$$

$$u(t) = \text{Kontrol Girişi}$$

$$A_n, B_n, C_n = \text{Nominal Parametreler}$$

$$\Delta A, \Delta B, \Delta C = \text{Modeldeki Belirsizlikler (Doğrusal Olmayan Sürtünme ve Model Belirsizlikleri gibi)}$$

$$d(t) = \text{Dış Bozunumlar}$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu şekilde tanımlı bir sistem için giriş değeri $u(t)$ iken CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi özelinde giriş değeri $i(t)$ olarak geçmektedir. Bunun sebebi, demir bilyenin manyetik levitasyon işlemine maruz kalıp havada asılı bir halde kalmasının kontrolünün akım üzerinden yapılmasıdır. Denklik 3.62’de Giriş parametreleri bir tarafa, çıkış parametreleri diğer tarafa toplanıp mevcut yeni denkleğe Laplace Dönüşümü uygulandığında;

$$s^2X(s) + 2,381sX(s) + 15821,6191X(s) = 144,5962I(s) \quad (3.64)$$

denkliğine ulaşılmaktadır.

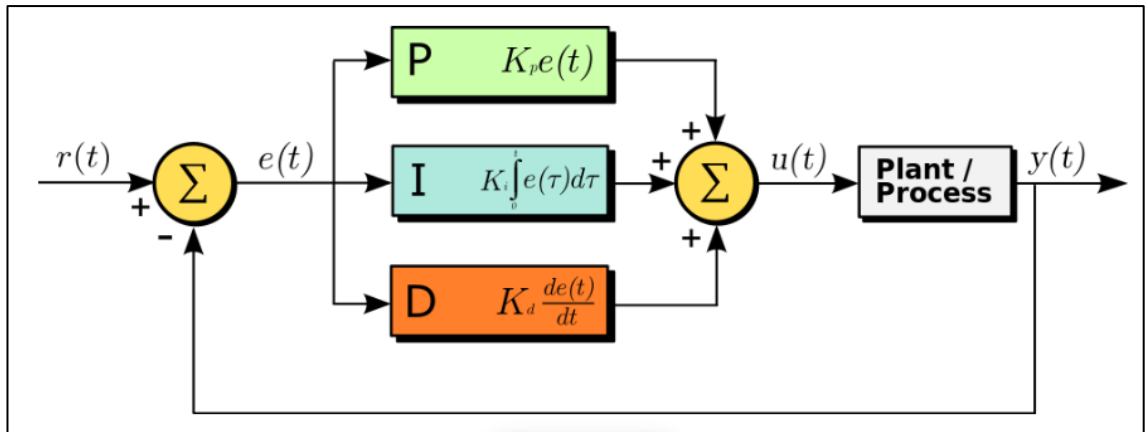
Bir transfer fonksiyonu aynı zamanda sistemin çıkışının, sistemin girişine oranı olarak da ifade edilebilmektedir (Anonim 2022). O halde transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{144,5962}{s^2 + 2,381s + 15821,6191} \quad (3.65)$$

olarak ifade edilmektedir.

3.1. PID Kontrolcü

1911 yılında ilk PID kontrolcü Elmer Sperry tarafından geliştirilmiştir. Bu tarihten sonra ise 1933 yılında TIC (Taylor Instrumental Company) isimli şirket tarafından tamamen ayarlanabilen bir PID kontrolcüsü geliştirilmiştir (Anonim 2013). Buradaki tamamen ayarlanabilir terimi, P, I ve D kazanç parametrelerinin durumlara göre güncellenerek daha iyi sonuçlar elde etmek için kullanılması anlamına gelmektedir. PID kontrolcüsündeki PID kelimesi; oransal, integral, türev (proportional, integral, derivative) kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Adından da anlaşılacağı üzere PID kontrolcülerinde bu üç elementin matematiksel işlemini ayrı ayrı yapan ilgili kısımlar bulunmaktadır. Başka bir tanımlama olarak ise, ana geri besleme kontrolcüsü olarak PID kontrolcüyü içeren sistemler olarak da tanımlanmaktadır.



Şekil 3.4. PID kontrolcünün blok gösterimi (Ataşoğlu 2020)

Şekil 3.4'te bir PID kontrolcünün şeması görülmektedir. Şekil üzerinden de anlaşılacağı gibi PID kontrolcünün amacı; sistem değişkeni, çıkış veya süreç değişkeni olarak da bilinen y yanıtının, sistemin girişini gösteren ve Şekil 3.4'te birim basamak fonksiyonu olarak belirlenmesine karşın herhangi bir fonksiyon olarak da belirlenebilecek olan r değişkenini takip edebilmesidir. Bunun sağlanabilmesi adına

manipüle edilebilir u değişkeninin kontrolcünden gelen komutlar vasıtasıyla dinamik olarak değiştirilmesi gerekmektedir.

CE 152 Manyetik Levitasyon sistemi özelinde, demir bilyenin manyetik levitasyon sahası içerisindeki konumuna göre bir akım belirlenmeli ve belirlenen bu akım, bobin üzerinde farklı değerlerde indüklenmeler yaratarak farklı değerlerde manyetik çekim kuvveti sağlamalıdır. Örneğin demir bilyenin, levitasyon sahasının tam orta noktasında asılı kalması hedeflenirken, demir bilye üzerine uygulanacak olan aşağı yönlü küçük bir itirme kuvveti demir bilyeyi bobinden uzaklaştıracağı için daha yüksek bir manyetik çekim kuvveti ve dolayısıyla daha yüksek bir akım büyüklüğüne ihtiyaç olacaktır. PID kontrolcünün u yanıtı, değişen bu duruma adapte bir şekilde güncellenerek yüksek akım değerini talep edecek ve demir bilyeyi levitasyon sahasının tam orta noktasına gelmeye zorlayacaktır.

PID kontrolcüler bu şekilde çalışabilmek için Şekil 3.4'te e olarak gösterilen ve hata olarak adlandırılan bir cevabı kullanmaktadırlar. Sistemin hata cevabı, Giriş ile çıkış arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. PID kontrolcünün içindeki; oransal, integral ve türev işletmecileri bu hatayı farklı üç tanımda ele alarak bir kontrol işlemi sağlamaya amaçlamaktadır. P işletmecisi, mevcut andaki hatanın oranı olarak anlık hata üzerinde çalışırken, I işletmecisi ise hatanın mevcut ana kadar olan integrali ile oranlı olup geçmiş hata üzerine çalışmaktadır. D işletmecisi ise mevcut andaki hatanın türeviyle oranlı olup gelecek hata üzerine odaklanmaktadır. Bu sebeple bir PID kontrolcü bir hatanın; geçmişteki, şimdiki ve gelecekteki olasılıklarını kapsayan bir kontrolcü olarak da tanımlanabilmektedir (Araki 2009).

P, I ve D işletmecilerinin çalışma şekilleri daha detaylı olarak incelenirse; mevcut andaki hatayla oranlı bir çıkış sinyali üreten P işletmecisi, istenen veya önceden ayarlanan nokta ile gerçek değer veya geri besleme işletim değeri ile karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma işlemi sonucunda ortaya çıkan hata, çıktıyı alabilmek için orantılı bir sabitle çarpılarak bir çıkış sinyali elde edilmiş olur. Açıklamada bahsi geçen orantılı sabit, Şekil 3.4'te K_p olarak görülmektedir. P işletmecisi tek başına kullanıldığında manuel sıfırlama yapılarak kullanım gerektirmektedir. Bunun sebebi P işletmecisinin hiçbir zaman kararlı hal durumuna tek başına ulaşamamasıdır. P işletmecisi tek başına kullanıldığında kararlı

bir çalışma sağlayabilse dahi kararlı durum hatasını sürekli olarak korumaktadır. P işletmecisinin engel olamadığı kararlı durum hatası veya kararlı hal hatasını indirgeyebilmek için bu işletmeci ile birlikte I işletmecisinin de beraber çalıştırılması gerekmektedir. I işletmecisi, hata değeri sıfır oluncaya kadar bir süre boyunca hatanın integralini alarak çalışmaktadır. Nihayetinde sıfır hata değeri yakalandığında ise bu değeri tutarak işletimi bu şekilde gerçekleştirmektedir. Geçmişten itibaren hatanın sıfır olduğu ana kadarki zamanlarda çalıştığı için I işletmecisi, geçmiş hata üzerinde çalışan bir işletmeci olarak da ele alınmaktadır. I işletmecisi, hata üzerinde integral işlemleri yapıp hatayı sıfıra indirgemeye başladığında, negatif bir hata ile karşılaşırsa çıkışı azaltarak bu durumun önüne geçmeye çalışmaktadır. Bu durum kontrolcünün tepkini hızını limitlerken aynı zamanda kontrolcünün kararlılığını da olumsuz yönde etkilemektedir. Kontrolcüdeki tepki hızını arttırmak için integral sabiti değeri artırılarak daha gürbüz bir kontrol sağlanması hedeflenmektedir. Bahsi geçen integral sabiti ise Şekil 3.4'te K_i olarak görülmektedir. K_i kazancını arttırmanın olumsuz yanı ise kararlı hal hatasının da K_i kazancı ile birlikte artmasıdır. Bu durum düşük kararlı hal hatasına sahip olmak için, kontrolcünün tepki süresinin uzaması veya düşük tepki süresine sahip olabilmek için, kontrolcünün kararlı hal hatasının artması ikilemini beraberinde getirdiğinden dolayı bu tip kontrolcüler genellikle yüksek hızlı yanıtın gerekli olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. I işletmecisinin gelecekteki hata davranışını tahmin edebilme özelliği olmadığı için önceden ayarlanan nokta veya istenen nokta üzerinde bir değişiklik yapıldığında işletim davranışında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Bu durum kontrolü sağlanmış bir sistemde, sonradan oluşturulan herhangi bir dış değişikliğin I işletmecisi tarafından tolare edilememesi ve kontrolcünün düzensiz çalışması ile sonuçlanmaktadır. D işletmecisi ise hatanın gelecekteki davranışını tahmin edebilme özelliği sayesinde bu sorunun çözümü için kullanılmaktadır. D işletmecisinin çıktısı, türev sabiti ile çarpılan zamana göre hata değişim oranına bağlı olarak verilmektedir. D işletmecisi, I işletmecisi ile birlikte çalıştırıldığında, I işletmecisinin neden olduğu faz gecikmesini indirgeyerek sistem kararlılığını arttırmaktadır.

PID kontrolcüler çalışma metotları bakımından üç başlık altında incelenmektedirler. ON/OFF PID kontrolcüler, önceden belirlenen değerde bir aşım olduğunda, bu aşımı sensörler yardımıyla fark ederek devreye girip, söz konusu aşım indirgendiğinde ve istenen değere tekrar ulaşıldığında kendilerini sıfırlayarak kapalı hale

geçerek çalışan kontrolcülerdir. Bu tip kontrolcülerde sıfırlanma manuel olarak yapılmaktadır. ON/OFF PID kontrolcülerdeki girişi küçük zaman aralıklarıyla sürekli olarak denetleyerek sağlanan oransal PID kontrolcülerde ise önceden belirlenen değerdeki aşım, bir sensör tipi uygulama ile fark edilmek yerine sürekli sağlanan bir kontrol yardımıyla fark edilmektedir. Oransal kontrolcüler, ON/OFF kontrolcülerdeki çevrim durumunu ortadan kaldırıp manuel sıfırlama işlemini ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Standart tip PID kontrolcüler ise sistem içindeki değişiklikleri telafi etmek için integral ve türev kontrolünü kullanmaktadır. Standart tip PID kontrolcülerinin; oransal, integral ve türev kazanç parametrelerinin ayrı ayrı ayarlanabilir olması bu tür kontrolcülerin en gürbüz çalışma olanağını sağlaması sonucunu doğurmaktadır.

PID kontrolcüsündeki; oransal, integral ve türev kazanç parametrelerini belirlemek için kullanılan farklı yöntemler vardır. Bunlardan ilki, bu yüksek lisans tez çalışmasında da kullanılan deneme yanılma yöntemidir. Bu yöntem için öncelikle integral ve türev kazanç parametreleri, yani K_i ve K_d parametreleri sıfırda tutularak yalnızca oransal kazanç parametresi yani K_p üzerinde değişiklikler yapılmaktadır. Sistem, önceden ayarlanan referans değerinin etrafında salınım yapmaya başlayınca kadar K_p değeri belirli aralıklarla arttırılmaktadır. Bu aşamadan sonra, referans değerinin etrafındaki salınımları sönümleyerek referansa daha yakın ve kararlı bir çalışma sağlanması için K_i parametresi, yani integral kazanç parametresi belirli aralıklarla arttırılmaktadır. Salınımlar sıfıra en yakın şekilde indirgendikten sonra ise yüksek hızlı bir yanıt alabilmek için K_d parametresi, yani türev kazanç parametresi belirli aralıklarla arttırılmaktadır.

İşletim Reaksiyon Eğrisi tekniğinde ise, öncelikle sisteme hiçbir kontrolcü etkisi olmadan bir basamak fonksiyonu uygulanmaktadır. Sistemin bu basamak fonksiyon girişine yanıtı, belirli kontrol parametrelerinin de dahil edilmesi ile sürekli olarak izlenmekte ve kaydedilmektedir. Ortaya çıkan bu eğrinin; eğimi, düzlenme süresi ve yükselme süresi hesaplanarak P, I ve D denklemlerinde yerine konarak PID kazanç parametreleri elde edilmektedir.

Zeigler-Nichols Yönteminde ise sürekli çevrim metodu ve sönümlü salınım metodu kullanılarak kapalı bir çevrimde parametre hesabı yapılmaktadır. Her iki metot

için de izlenen yöntem aynı olmasına rağmen salınım davranışı farklı olarak görülmektedir. Tıpkı deneme yanılma yönteminde de olduğu gibi, öncelikle integral ve türev kazanç parametreleri, yani Ki ve Kd parametreleri sıfırda tutularak yalnızca oransal kazanç parametresi yani Kp üzerinde değişiklikler yapılmaktadır. Sistem, önceden ayarlanan referans değerinin etrafında salınım yapmaya başlayınca kadar Kp değeri belirli aralıklarla arttırılmaktadır. Bu aşamadan sonra, sistemin sabit salınımları ürettiği kazanç Ku, bu salınımların periyoduna ise Pu isimlendirmeleri yaparak; P, PI ve PID kontrolcülerini için üretilen Zeigler-Nichols tablosu kullanılarak Kp, Ki ve Kd parametreleri bulunabilmektedir (Anonim 2013).

Çizelge 3.2. Zeigler-Nichols tablosu (Anonim 2013)

Kontrolcü	Kp	Ki	Kd
P	Ku/2		
PI	Ku/2,2	Pu/1,2	
PID	Ku/1,7	Pu/2	Pu/8

Nihayetinde PID kontrol sisteminin matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibidir;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^k e(t) d(t) + K_d \frac{de(t)}{d(t)} \quad (3.66)$$

$u(t)$ = Kontrol Girişi

K_p = Oransal Kazanç Parametresi

K_i = İntegral Kazanç Parametresi

K_d = Türev Kazanç Parametresi

$e(t)$ = Hata

PID kontrolcüler; fırınların sıcaklık kontrolünde, MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) şarj kontrol cihazlarında ve güç elektroniğindeki dönüştürücülerde yoğunlukla kullanılmaktadırlar.

3.2. Kayan Kipli Kontrolcü

Kayan kipli kontrolcüler; gürbüzlük, referans sinyali izlemelerindeki tutarlılık ve parametre değişimlerinin kolay ayarlanabilmesi gibi olumlu yönleri sahip kontrolcülerdir. Kayan kipli sistemler, sistem durumlarını kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir durum uzayına sürerek kontrol işlemini sağlamayı amaçlamaktadır. Kayma yüzeyine ulaşıldığında kayan kipli kontrol, sistemdeki durumları kayma yüzeyinin çok yakınındaki yerlerde tutmaya zorlayarak çalışmayı sağlamaktadır. Kayan kipli kontrolcüler, iki farklı blok halinde çalışan kontrolcüler olarak da tanımlanabilir. Bu bloklardan ilki, tasarımdaki kriterleri sağlayacak bir kayan yüzey oluşturup kayma hareketi ile tasarım kriterlerinin grafiksel olarak uyuşmasını sağlamak adına tasarlanmaktadır. İkinci blok ise anahtarlama yüzeyi olarak adlandırılmakta olup, seçilen sistem kriterlerini, kayma yüzeyine yakın bir bölgede kalmaya zorlamak adına tasarlanmaktadır. Kayma yüzeyi tasarlanırken yapılan sistem kriterlerine uygun seçimler vasıtasıyla, dinamik sistem davranışını bu kontrolcüye uyarlamanın mümkün olması ve bazı belirsizliklere duyarsız halde olan kapalı döngü tasarımı, kayan kipli kontrolcülerin istenen sonuçları daha tutarlı bir şekilde vermesine neden olmaktadır. Bu açıklamada belirtilen “belirsizliklere duyarsız olma” durumu, bir sistem çalışırken dış etkenlere bağlı olarak meydana gelen küçük değişimlerin kontrolcü tarafından algılanmayıp herhangi bir bozunuma yol açmama hali olarak da açıklanabilmektedir.

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (3.67)$$

$$y = h(x, t) \quad (3.68)$$

olarak ifade edilen bir tek giriş-tek çıkış (SISO (Single Input Single Output)) sistem ele alınırsa bir kontrolcüdeki ana amaç, y çıktı değişkeninin daha önceden belirlenen bir y_{DES} olarak da tanımlanan değişkenini takip etmesini sağlamaktır. CE152 Manyetik Levitasyon Sistemi ele alınırsa, bu açıklamada geçen y_{DES} değişkeninin, demir bilyenin kontrollü bir şekilde levitasyon sahasının tam orta noktasında durduğu pozisyon olduğu söylenebilmektedir. CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi’nin transfer fonksiyonu hesaplanırken aynı zamanda doğrusal olmayan durum matrislerini doğrusal hale getirmek için de kullanılan bu değer, daha önce denklik 3.42’de belirtildiği üzere $a = \frac{T_d}{2} = 0,0095$

olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi özelinde kontrolcü tasarlanırken gözetlenen ana amaç y çıktı değişkeninin, $a = \frac{T_d}{2} = 0,0095$ çıktısını izlemesini sağlamaktır.

Daha önceki açıklamada iki farklı blok halinde çalıştığı söylenen kayan kipli kontrolcünün ilk bloğu olan kayan yüzey bloğu matematiksel olarak tanımlanırsa, ilk adım sistem durumunun skaler bir fonksiyon olarak tanımlanması olacaktır.

$$\sigma(x) = R^n \rightarrow R \quad (3.69)$$

Kayma yüzeyi, e_y olarak tanımlanan izleme hatasını ve bu hatanın türevlerine bağlı bir dizgiyi kapsamaktadır.

$$\sigma = \sigma(e, \dot{e}, \ddot{e}, \dots, e^{(k)}) \quad (3.70)$$

σ fonksiyonu, hata ve türevleriyle beraber sifıra yakınsayacak bir şekilde seçilmelidir. Kayma yüzeyi için en fazla karşılaşılan tercihler;

$$\sigma = \dot{e} + c_0 e \quad (3.71)$$

$$\sigma = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (3.72)$$

tercihleridir. Bu kayma yüzeyi tercihleriyle oluşturulan kayan kipli kontrolcüler sırasıyla, birinci dereceden kayan kipli kontrolcüler ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüler olarak isimlendirilmektedirler. Dolayısıyla bir kayan kipli kontrolcüyü isimlendirirken, kayma yüzeyi fonksiyonunda hatanın kaçınıcı türevinin alındığını bilmek belirleyici olmaktadır. İdeal bir biçimde seçilen c_i katsayıları ile σ değişkeni sifıra indirgendiğinde bu değişkenle beraber hata ve türevleri de sifıra yaklaşmakta yani ideal bir kontrol şeması oluşmaktadır. Bu durum geometrik bir bakış açısıyla tekrardan açıklanırsa, $\sigma = 0$ denklemi, hata uzayında kayan yüzey olarak isimlendirilen bir yüzeyi tanımlamaktadır. Kontrol edilen sistemin tüm yörüngeleri, sistem davranışlarının önceden belirlenen

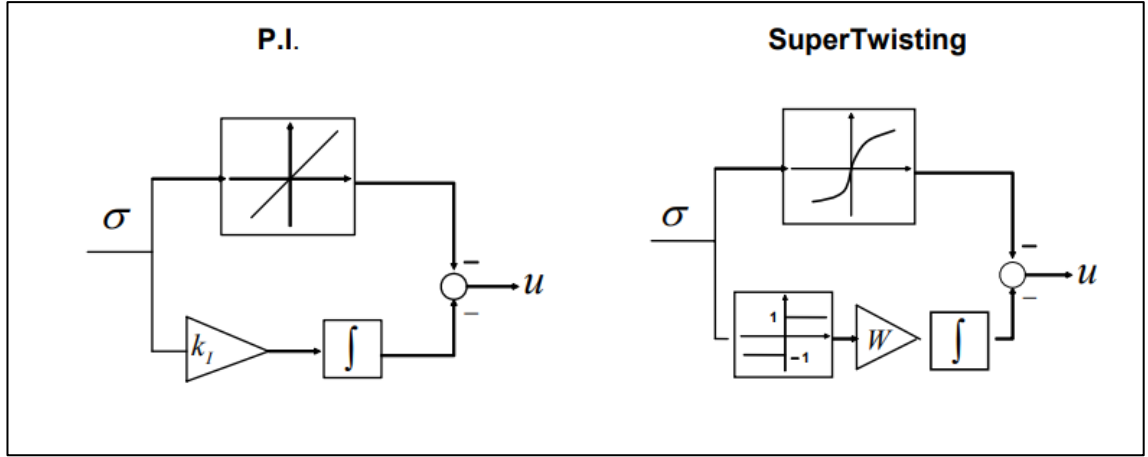
kriterleri karşıladığı bu kayma yüzeyine bağlı kalmaya zorlanarak gürbüz bir kontrolcü tasarlamak mümkün olmaktadır.

Dolayısıyla bir kayan kipli kontrolcü tasarlarken ikinci aşama, sistemdeki tüm yörüngeleri, σ değişkenini sonlu bir zamanda sifıra yönlendiren ve kayma yüzeyi olarak bilinen bu yüzeyde tutabilen bir fonksiyon tasarlamaktır. Bu yüksek lisans tezi kapsamında ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüler inceleneceğinden, yörüngeleri yüzeyde kalmaya zorlayan ve anahtarlama fonksiyonu olarak da bilinen bu fonksiyonu tasarlarken Üstün Burulma Algoritması (Super Twisting Algorithm) yöntemi kullanılmaktadır. Bu algoritmaya, σ değişkeni entegre edilirse;

$$u = -\lambda\sqrt{|\sigma|} \operatorname{sgn}(\sigma) + w \quad (3.73)$$

$$\dot{w} = -W \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (3.74)$$

denklikleri meydana gelmektedir. $\lambda = \sqrt{U}$ ve $W = 1,1U$ kabulleri parametre dönüşümü yapabilmek adına kolaylık sağlayan kabuller olarak ele alınmaktadır. Bu kabullerdeki U değişkenine karar verebilmek için, incelenen kapalı döngü sistemlerde istenilen çıkış yanıtları elde edilene kadar kademeli olarak arttırılarak bulunan bir değer tercih edilmektedir. Bir başka deyişle U değişkeni, deneme yanılma yöntemi ile bulunabilmektedir. Üstün burulma algoritmasını, klasik PI kontrolcünün doğrusal olmayan bir versiyonu olarak da açıklamak mümkündür.

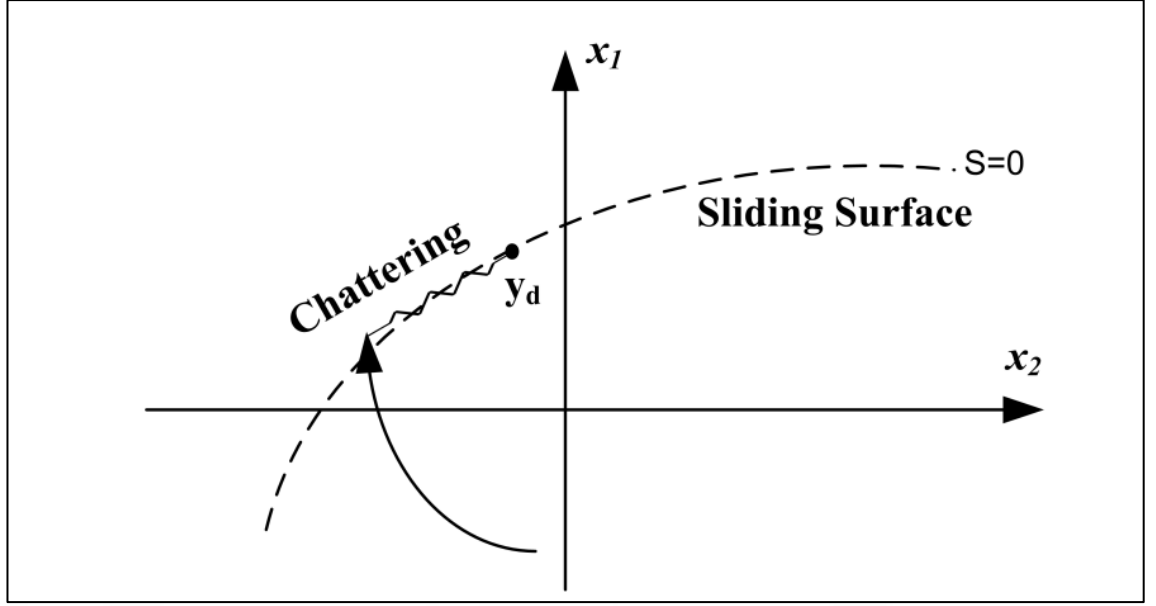


Şekil 3.5. PI kontrolcüsüyle üstün burulma algoritmasının benzerliğini gösteren devre şemaları (Decarlo and Žak 2008).

Şekil 3.5'e bakılarak bu açıklamayı görselleştirmek mümkündür.

Kayan kipli kontrolcülerde bilinmesi gereken bir diğer husus, ikiye ayrılan çalışma bloklarının ikincisi olan anahtarlama bloğundan kaynaklanan çatırdama (chattering) problemidir. Bu sorunun temelinde model tarafından ihmal edilen ve hızlı değişen dinamiklerden kaynaklanan anahtarlama fonksiyonundaki ani değişimlerdir. Çatırdama problemine yol açabilecek bir başka husus ise sonlu örnekleme hızına sahip dijital kontrolcülerin kullanılmasıdır. Bu durum ayrıklaştırma çatırdamasına neden olmaktadır. Teoride ideal bir kayma yüzeyi aynı zamanda sonsuz bir anahtarlama frekansı anlamına gelmektedir. Kontrol algoritmasını oluşturan işaret bir örnekleme aralığı içerisinde sabittir, anahtarlama frekansı ise söz konusu örnekleme aralığını aşmadığından bu durum da çatırdama problemine yol açmaktadır.

Asimptotik gözlemcilerin (observer) kullanımı, çatırdama problemini indirgemedi oldukça etkili bir yöntemdir. Asimptotik gözlemci kullanmanın, gözlemciyi de dahil etmek üzere yardımcı döngüde ideal bir kayma yüzeyi oluşturması etkisi bulunmaktadır. Kontrol sistemi tasarlanırken elde edilen kontrol algoritması ve şeması gözlemci döngüsünde de kullanılarak çatırdamaya neden olan modellenmemiş dinamikler sistemin haricinde tutulabilmektedir (Utkin and Lee 2006).



Şekil 3.6. Kayma yüzeyi ve çatırdama probleminin gösterimi (Awais et al. 2018)

Şekil 3.6’da kayma yüzeyinde anahtarlama fonksiyonu kaynaklı çatırdama bozunumu görülebilmektedir.

Verilen bu bilgiler bağlamında, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün matematiksel ifadesi üç denklem grubu ile incelenebilmektedir;

Kayma yüzeyinin zamana göre ikinci türevi;

$$\ddot{s}(t) + \beta \dot{s}(t) = k_p \dot{e}(t) + k_i e(t) + k_d \ddot{e}(t) \quad (3.75)$$

$\ddot{s}(t) = 0$ iken $u_{eq}(t)$ ile gösterilen bileşke kontrolün matematiksel ifadesi;

$$u_{eq}(t) = (k_d C_n)^{-1} \left(k_i e(t) + k_p \dot{e}(t) + k_d (\ddot{y}_r(t) + A_n \dot{y}_m(t) + B_n y_m(t)) - \beta \dot{s}(t) \right) \quad (3.76)$$

son olarak anahtarlama kontrolünün, bir diğer adıyla anahtarlama fonksiyonunun $u_{sw}(t)$ ile gösterilen matematiksel ifadesi;

$$u_{sw}(t) = \lambda_1 s(t) + k_s \text{sign}(\dot{s}(t)) \quad (3.77)$$

Olarak verilip, bu matematiksel ifadeler yardımıyla bir ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü tasarlanabilmektedir.

$$y_m = \text{Çıkış}$$

$$A_n, B_n, C_n = \text{Nominal Parametreler}$$

$$s(t) = \text{Kayma Yüzeyi}$$

$$e(t) = \text{Hata}$$

$$\lambda_1, \frac{1}{k_d c_n} \text{ İfadesinden Büyük Olma Koşuluyla Bir Pozitif Sabit Sayı}$$

$$k_s, D_{\max} \text{ İfadesinin, } D_{\max} = \sup_{t,s,s'=0} \{D(t, u(t))\} \text{ Olmak Şartıyla } \frac{D_{\max}}{c_n} \text{ İfadesinden Büyük Bir Sayı}$$

$$k_p = \text{Oransal Kazanç Parametresi}$$

$$k_i = \text{İntegral Kazanç Parametresi}$$

$$k_d = \text{Türev Kazanç Parametresi}$$

$$\beta, \text{ Bir Pozitif Sayı}$$

olarak verilmektedir (Eker 2010).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, manyetik levitasyon sistemleri için doğrusal olmayan kontrol yöntemleri özelinde PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü olmak üzere iki farklı kontrol sistemi kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Manyetik levitasyon sistemi olarak ise CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nin matematiksel modeli ve transfer fonksiyonundan yararlanılmıştır. Söz konusu sistemde bulunan demir bilyenin konum kontrolü, referans konumunun levitasyon sahasının tam orta noktası olan 0,0095 metre olacak şekilde karar verilip gerçekleştirilmiştir. Her iki kontrolcünün tasarımını gerçekleştirmek ve kontrolcülerinin performanslarını gözlemlemek için MATLAB Simulink programı kullanılmıştır.

4.1. PID Kontrolcü Bulguları

PID kontrolcü için kontrol parametreleri;

$$K_p = 0,1$$

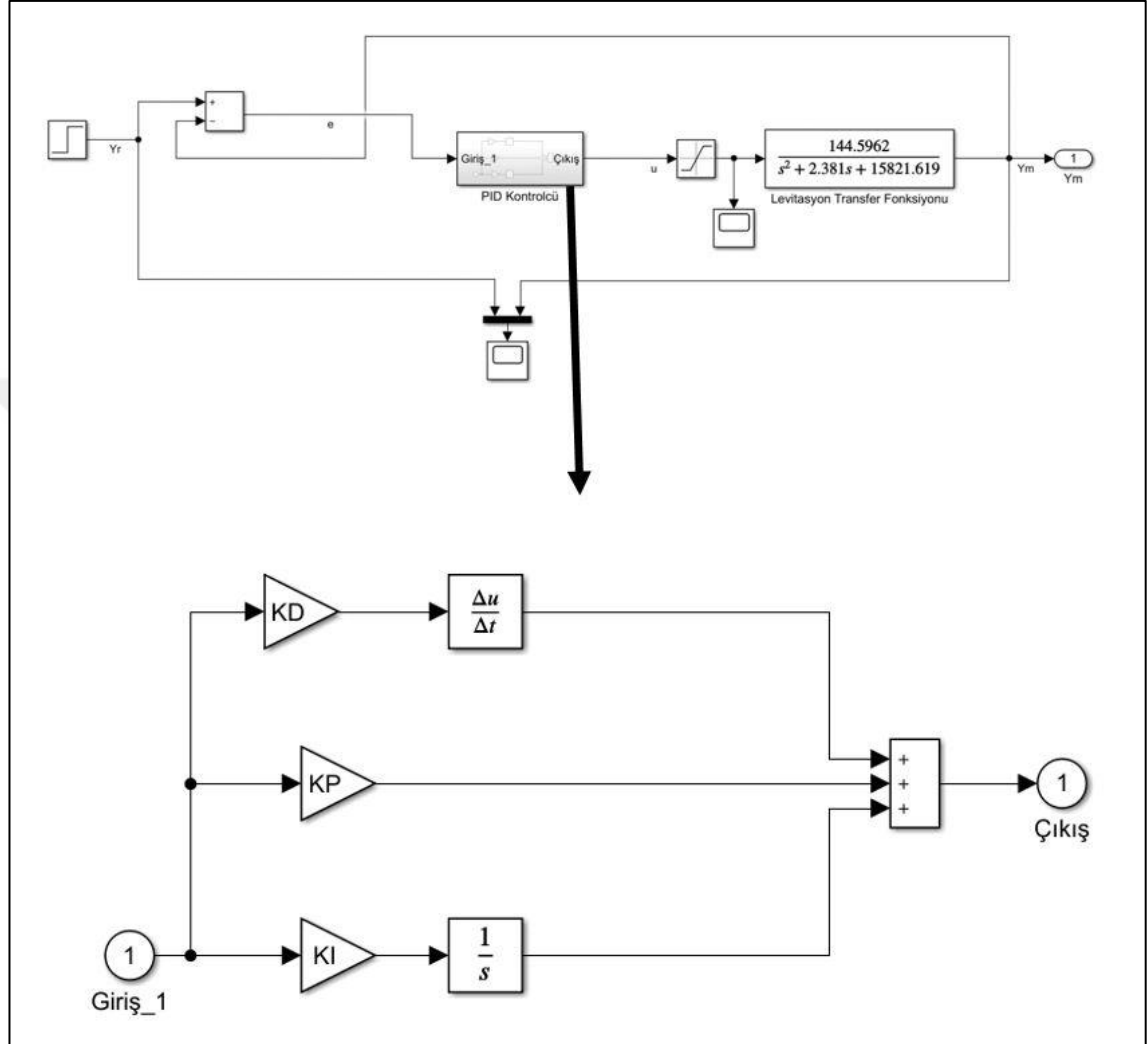
$$K_i = 100$$

$$K_d = 5$$

ile gerçekleştirilen PID kontrolcüsü vasıtasıyla CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi üzerinde konum kontrolü gerçekleştirmek için gerekli olan blok diyagram şeması Şekil 4.1'de verildiği gibidir. İlgili şekilde Y_m ifadesi, CE 152 Manyetik Levitasyon Sisteminin transfer fonksiyonunun PID kontrolü altındaki çıkışını ifade etmektedir. Y_r ifadesi ise referans sinyalini ifade etmekte olup anlık değeri 0,0095 olan bir basamak fonksiyonu olacak şekilde ayarlanmıştır. e ifadesi hatayı belirtmekle beraber $Y_r - Y_m$ olarak gösterilmiştir. PID kontrolcü sinyali u ile gösterilmiştir. Son olarak üst limiti 10 ve alt limiti -10 olan bir doyum bloğu (saturation block) eklenerek CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi tarafından çekilecek en yüksek ve en düşük akım değerleri belirlenmiştir. Yapılan simülasyon, akım üzerinden bir konum kontrolü yapmayı amaçladığından, doyum bloğunun alt ve üst limitleri de akım biriminden verilmektedir. Bu blok gerçek hayat uygulamalarında sistemi korumak için koyulmaktayken, bu tez çalışmasında da olduğu gibi simülasyon bazlı çalışmalarda ise daha kararlı sistem yanıtları alabilmek adına

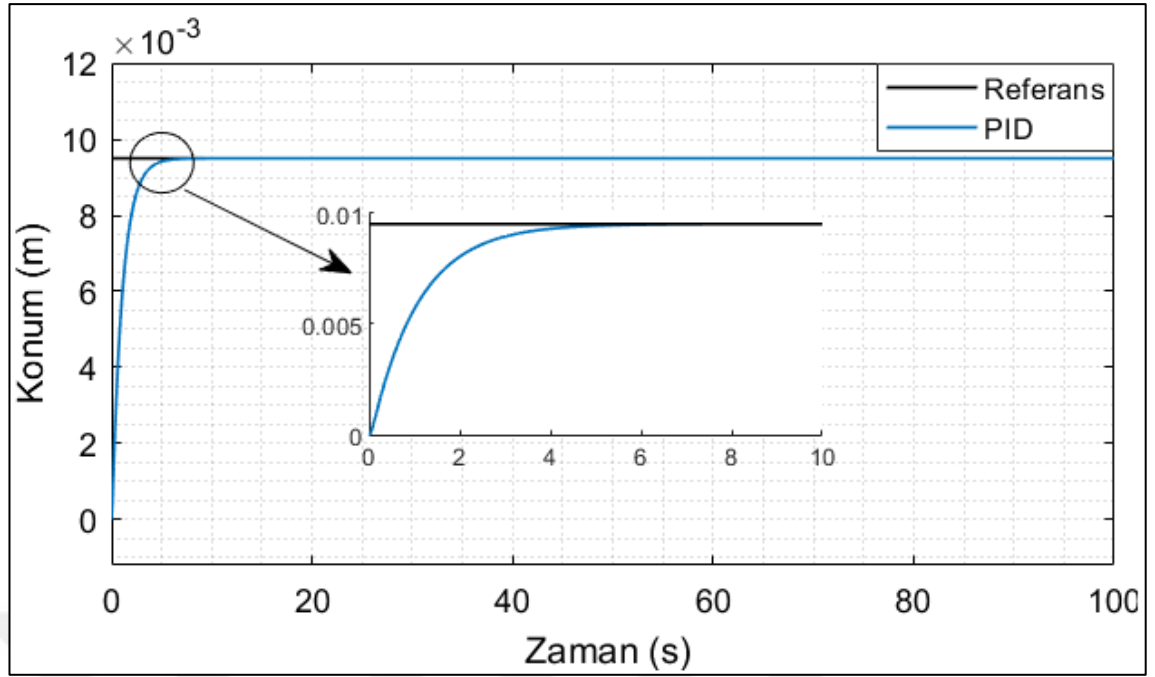
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kullanılmaktadır. PID kontrolü altındaki sistemin, referans noktasını takibini gözlemleyebilmek adına ise hem Y_r hem de Y_m değerlerinin beraber gözlemlenebildiği bir ekran (scope) yerleştirilerek tasarım tamamlanmıştır.

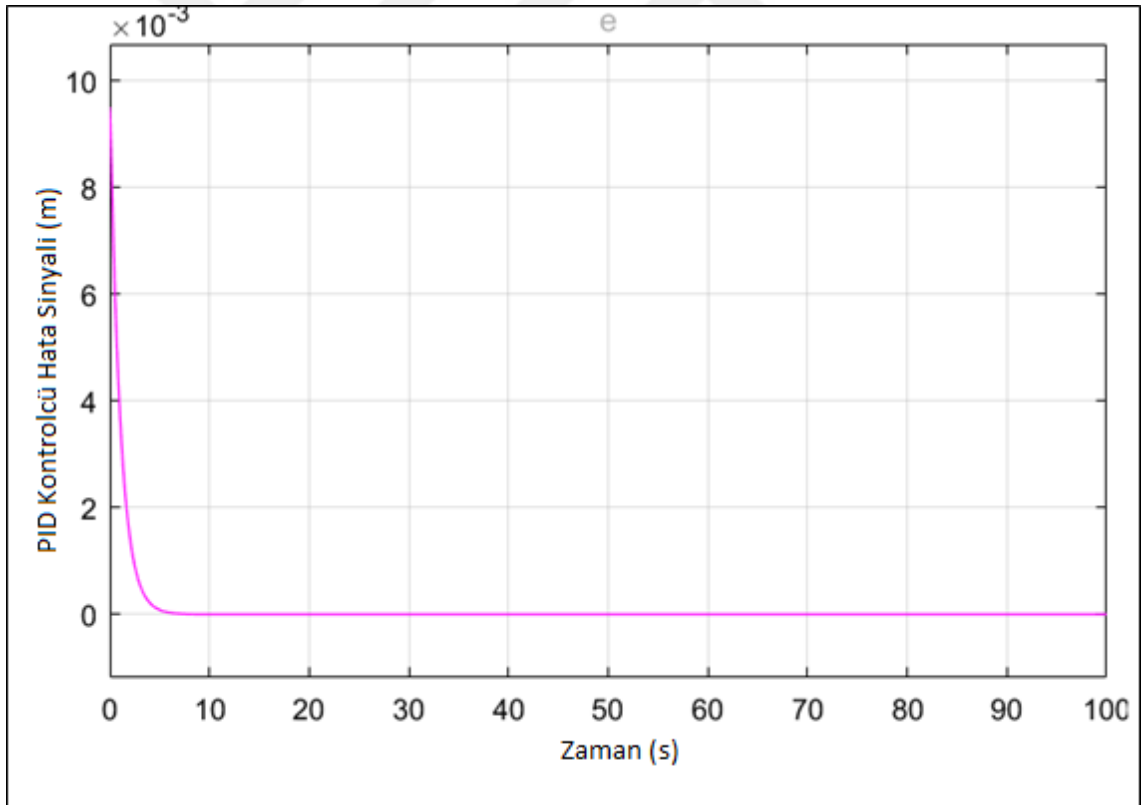


Şekil 4.1. PID kontrolcü Simulink blok diyagram gösterimi

Yürütülen simülasyon sonucunda Şekil 4.2’de gösterilen grafik sonucuna ulaşılmaktadır.

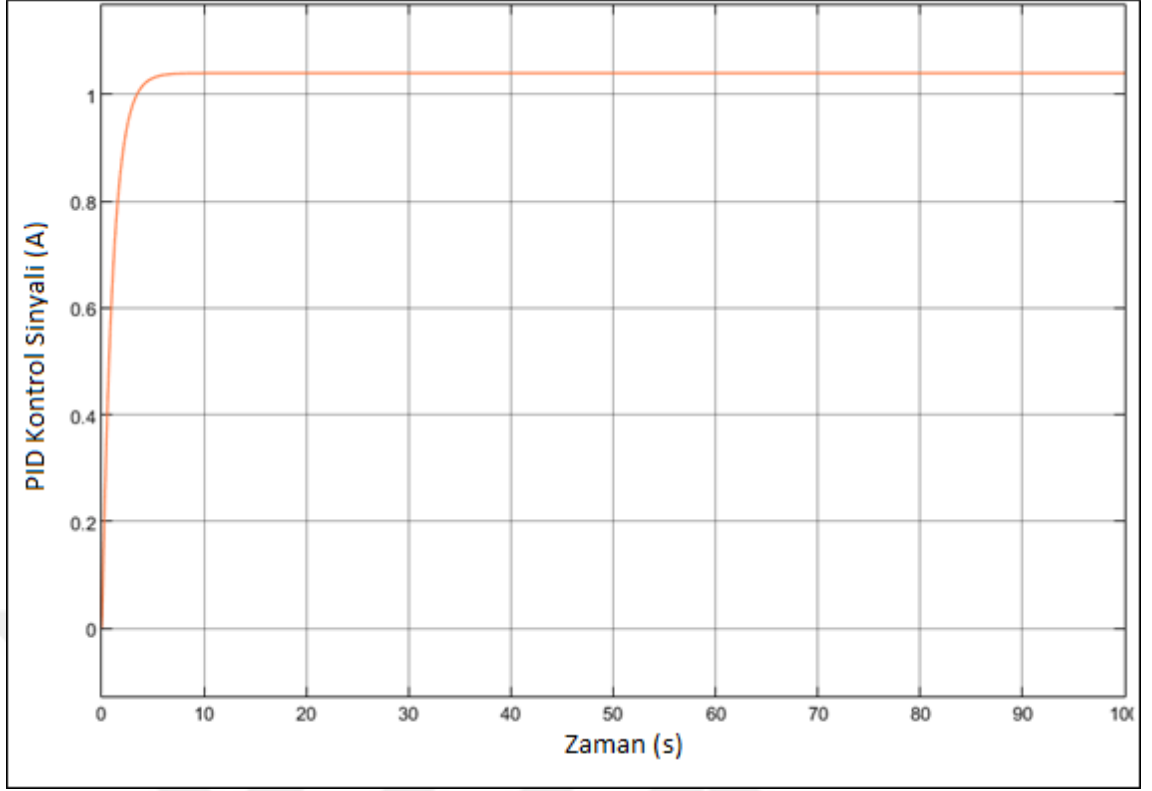


Şekil 4.2. PID kontrolcünün referans takibi



Şekil 4.3. PID kontrolcünün hata sinyali

Şekil 4.3'te tasarlanan PID kontrolcü sistemindeki hata sinyalinin olması gerektiği gibi sıfıra indiği görülmektedir.



Şekil 4.4. PID kontrol sinyali

Şekil 4.4'te ise yaklaşık olarak 1 olarak görülen PID kontrolcü sinyali gözlemlenmektedir.

Şekil 4.2'deki grafik daha detaylı bir şekilde incelendiğinde, yerleşme süresinin 7,23 saniye olduğu görülmektedir. PID kontrolcülerinin ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülere göre en büyük dezavantajları bu denli yüksek bir yerleşme süresine sahip olmalarıdır. PID kontrolcülerdeki bu olumsuzluğu giderebilmek adına tepki süresi çok daha hızlı olan kayan kipli kontrolcüler sınıfından olan ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü tercih edilmiştir.

4.2. İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrolcü Bulguları

İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü için kontrol parametreleri;

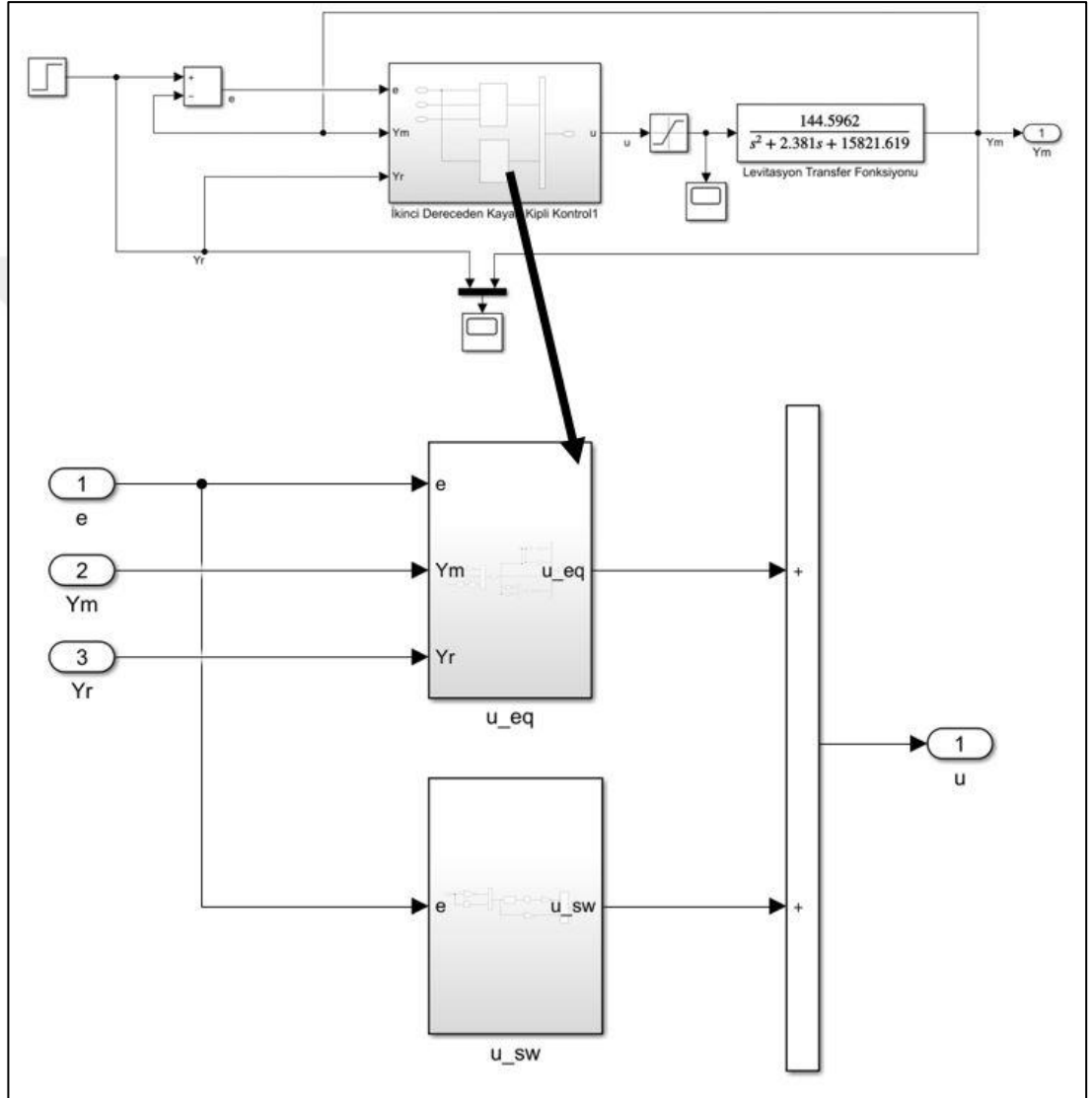
$$\lambda_c = 8000$$

$$\beta = 0,5$$

$$k_s = 2,49$$

$$\lambda_1 = 380,88$$

ile gerçekleştirilen ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü vasıtasıyla CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi üzerinde konum kontrolü gerçekleştirmek için gerekli olan blok diyagram şeması Şekil 4.5'te verildiği gibidir.



Şekil 4.5. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünü Simulink blok diyagram gösterimi

İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü vasıtasıyla CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi üzerinde konum kontrolünü gerçekleştirebilmek için Şekil 4.5'te görülen blok diyagram incelendiğinde Şekli 4.1 ile benzerlikler gösterdiği görülmektedir. Bu benzerlikler;

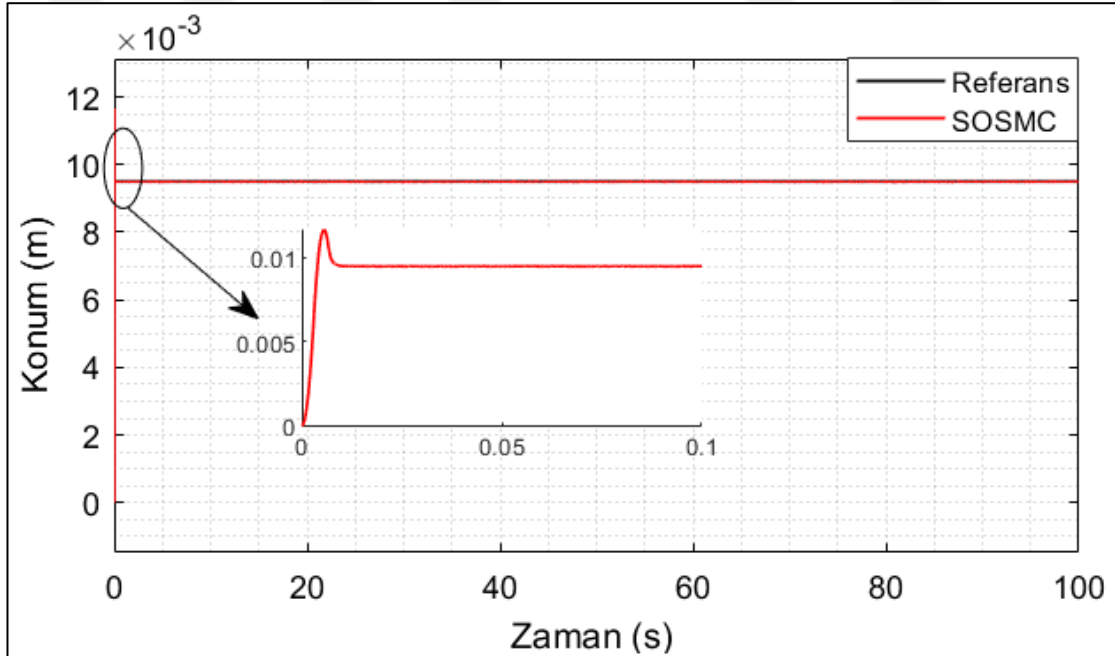
e , hata sinyali

Y_r , 0,0095 olarak girilen basamak fonksiyonu referans sinyali

sistemi kontrol altında çalıştırabilmek için ve gerçek zamanlı çalışmalarda devre elemanları aşırı yüklemekten korumak için bulunan doyum bloğu olarak verilmektedir.

Şekil 4.5 incelendiğinde kayan kipli kontrolcülerin tanımında da bahsedilen, iki farklı blok şeklinde çalışma durumu gözlemlenebilmektedir. Bu bloklardan ilki, tasarımdaki kriterleri sağlayacak bir kayan yüzey oluşturup kayma hareketi ile tasarım kriterlerinin grafiksel olarak uyuşmasını sağlamak adına tasarlanmaktadır. İkinci blok ise anahtarlama yüzeyi olarak adlandırılmakta olup, seçilen sistem kriterlerini, kayma yüzeyine yakın bir bölgede kalmaya zorlamak adına tasarlanmaktadır. Bu açıklamadaki ilk bloğu u_{eq} , ikinci bloğu ise u_{sw} olarak görebilmek mümkündür.

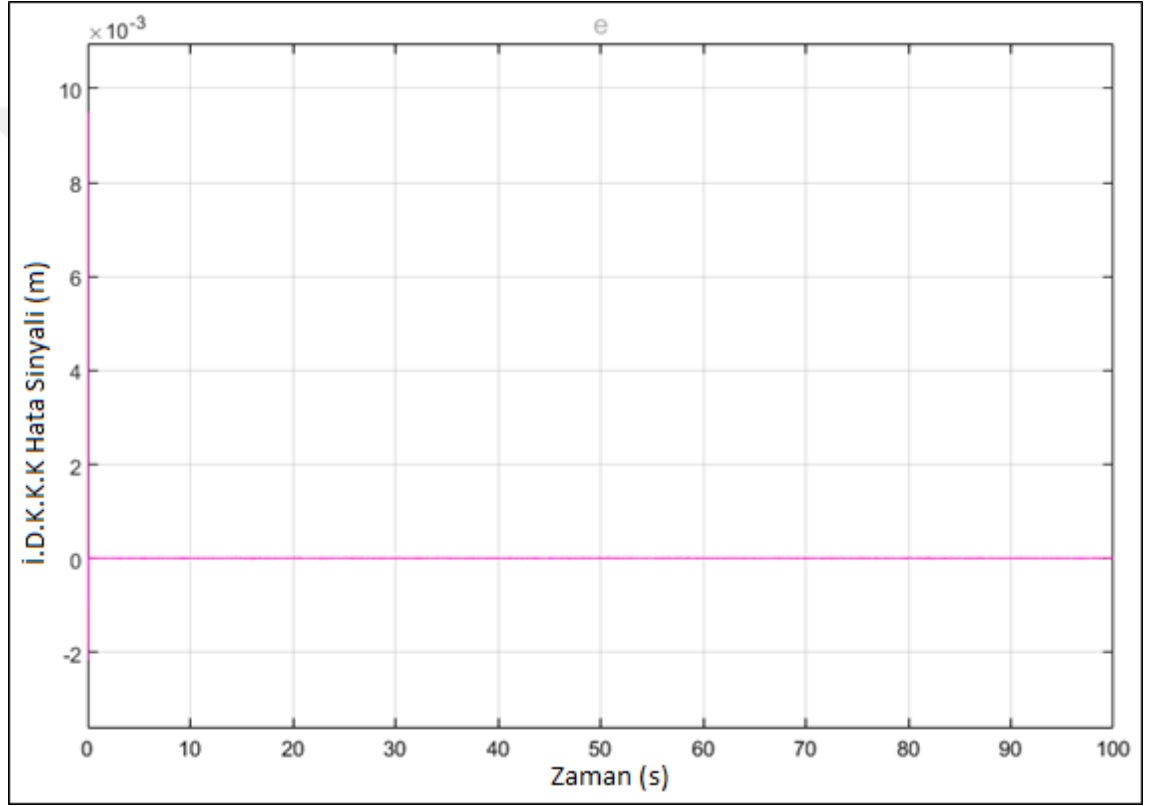
Bu blok diyagram kullanılarak yürütülen simülasyon çalışması sonucunda Şekil 4.6’da görülen grafik meydana gelmektedir.



Şekil 4.6. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünün referans takibi

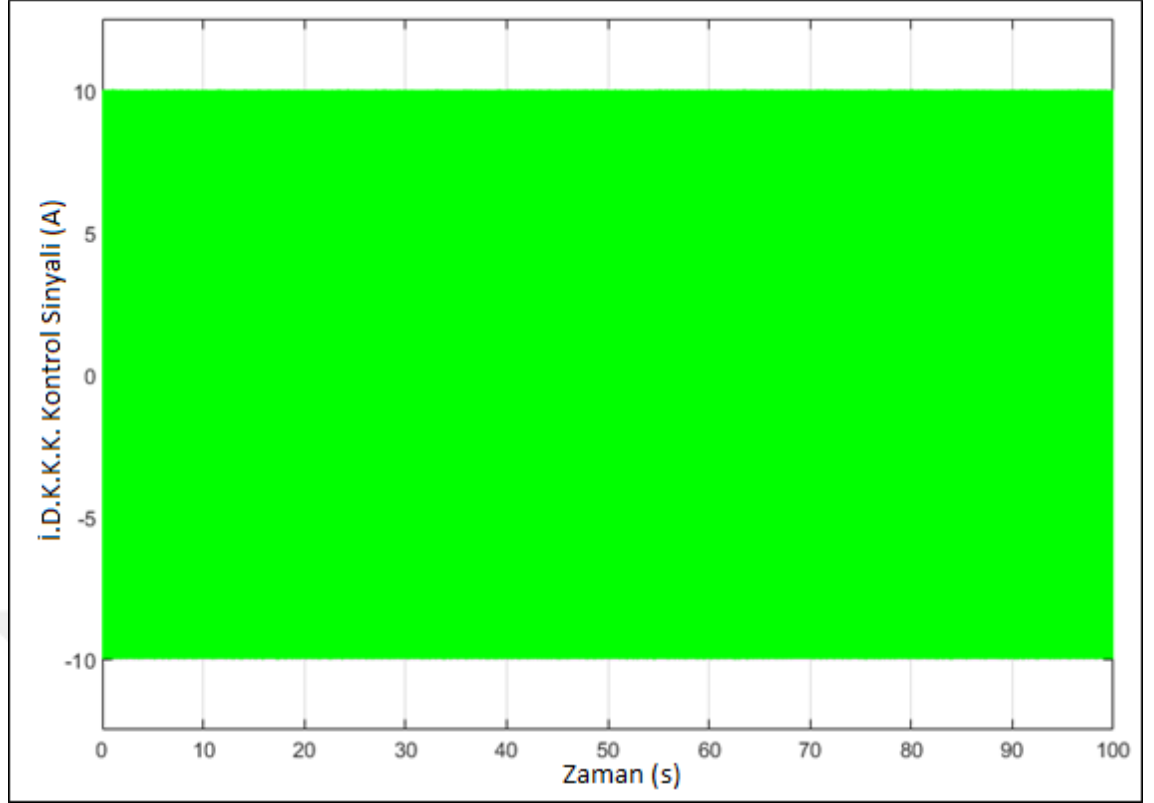
Şekil 4.6’daki grafik detaylı incelenirse; CE 152 Manyetik Levitasyon Sisteminin Levitasyon sahasında bulunan demir bilyenin, referans noktası olan 0,0095 konumuna

oturmadan önce çok kısa bir süreliğine aşım yaptığı, hemen ardından da belirtilen konuma oturduğu görülmektedir. Söz konusu aşımı sönümlemek adına parametre değişimleri mümkün olsa dahi, aşımı azaltmak adına yapılacak olan parametre güncellemeleri kontrolcünün tepki hızını olumsuz yönde etkileyerek referans noktasına oturma zamanını geciktireceğinden 0,0166 m'ye kadar olan bu yükselme yok sayılmaktadır. Referans noktasının 0,0095 metre olduğu düşünülürse, yaklaşık 7 mm olacak bu aşım 0,006 saniye sürerek insan gözüyle fark edilmesi mümkün olmayan bir değişimle sönümlenecektir. Yerleşme süresi 0,0103 saniye olarak kaydedilmiştir.



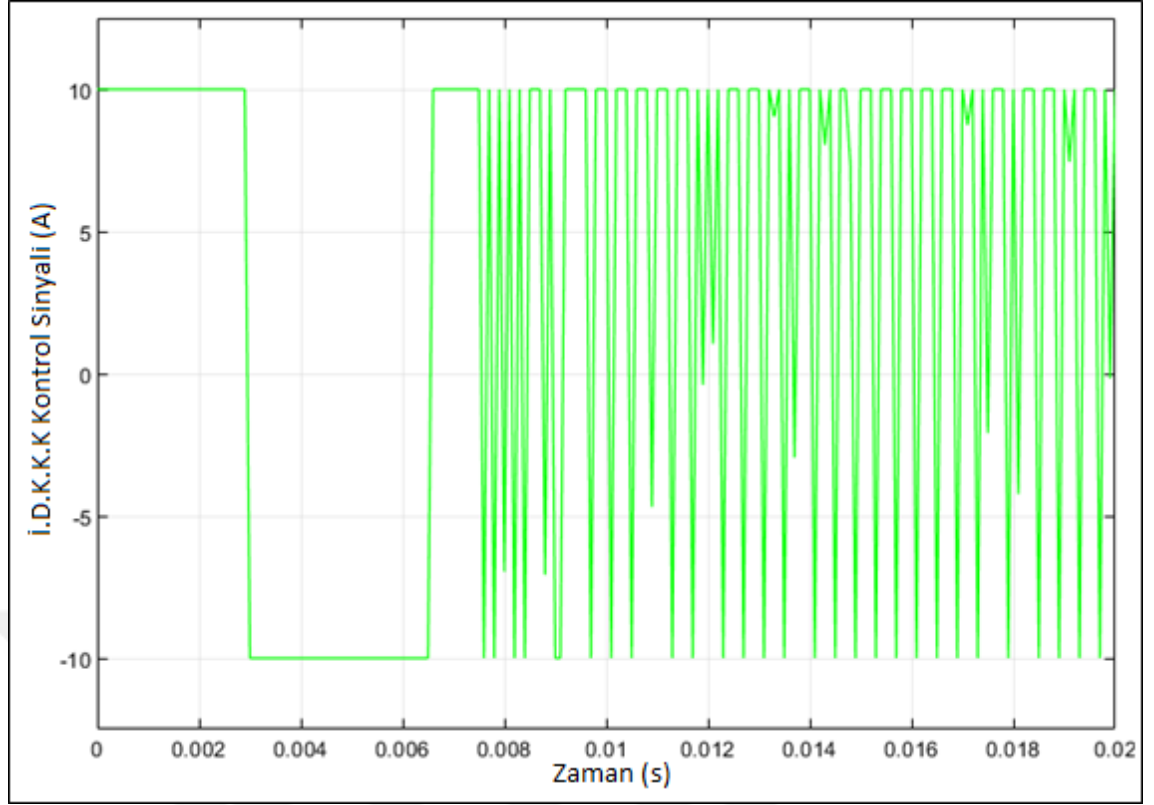
Şekil 4.7. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcünün hata sinyali

Şekil 4.7'de ise ideal bir kontrol sinyalinde olması gerektiği üzere sıfıra inen bir ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü hata sinyali gösterilmektedir. Hata sinyali sistemin girişi ile çıkışı arasındaki farkı ifade etmektedir. Sistem girişi, önceden belirlenen ve takibi istenen referans değeri iken sistem çıkışı ise kontrol işlemi başladıktan sonra sistemin davranışını ifade etmektedir. Bu sebepten dolayı sistem girişi ile çıkışı arasındaki farkın sıfır olması, kontrolün ideal bir şekilde sağlandığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.8. İkinci dereceden kayan kipli kontrol sinyali

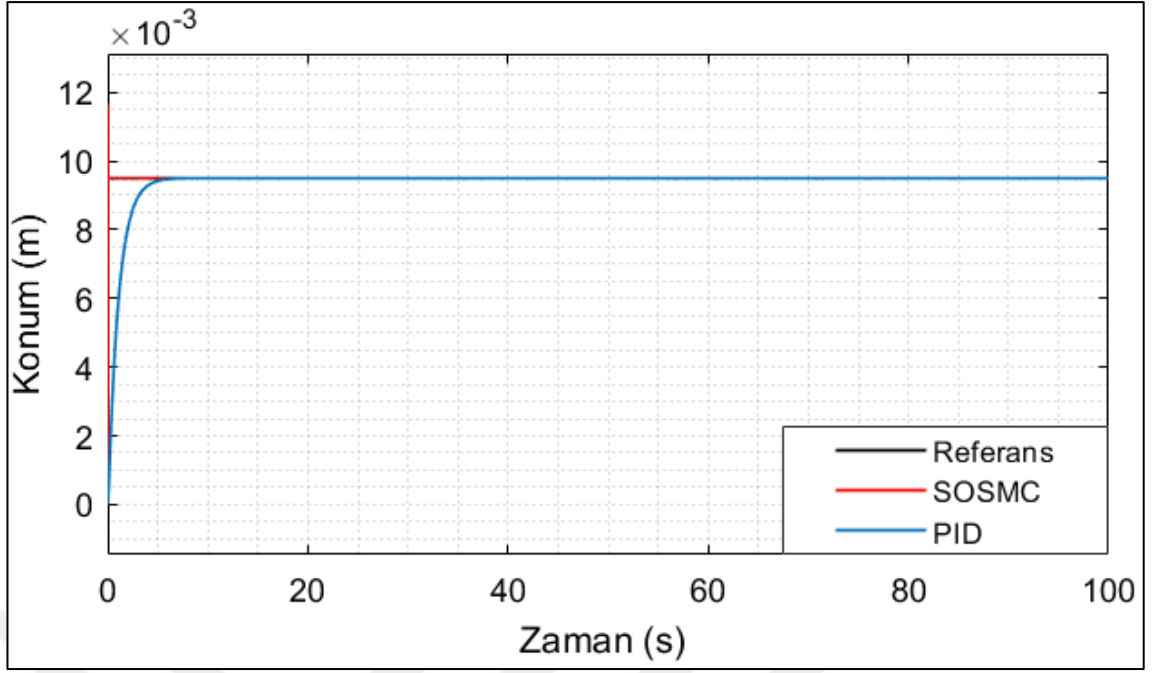
Şekil 4.8’de ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü sistemi tasarlanırken elde edilen kontrol sinyali gösterilmektedir. Kayan kipli kontrolcüler, anahtarlama fonksiyonu bazlı çalıştıklarından dolayı kontrol sinyalleri, Şekil 4.4’te de görülen PID kontrolcü sistemlerinin aksine tek kıvrımlı bir eğriden oluşmamaktadır. Sistem, öncelikle belirtilen kriterlere uygun bir kayma yüzeyi oluşturarak sistem modelini bu kayma yüzeyinin üzerinde kalmaya zorlayıp bir kontrol işlemi gerçekleştirmektedir. İdeal kayma yüzeyinden sapmalar olduğunda ise anahtarlama fonksiyonu devreye girerek bu sapmaları tolare eder ve sistemi kayma yüzeyinde tutmaya çalışır. Bu nedenle Şekil 4.8’de görülen türden bir kontrol işaret grafiği meydana gelmektedir. Grafiğin alt ve üst sınırları olan 10 ve -10 değerleri ise tasarımda kullanılan doyum bloğunun en üst ve en alt değerlerinden dolayı bu halde oluşmaktadır.



Şekil 4.9. İkinci dereceden kayan kipli kontrolcü sinyalinin 0,02 saniyelik gösterimi

İkinci dereceden kayan kipli kontrolcülerin, kontrol işaretlerinin bir anahtarlama fonksiyonu olarak ortaya çıktığını gösterebilmek adına Şekil 4.9’da 100 saniyelik bir çalışma süresi yerine çok daha dar kapsamlı bir çalışma süresi tanımlanarak anahtarlama fonksiyonunun detaylı gösterimi verilmiştir. Buradaki anahtarlama anları, daha önce de sözü edilen çatırdama problemine neden olan anlardır. Şekil 4.9’da görüldüğü üzere çok küçük zaman aralıklarında meydana gelmeleri sebebiyle tolare edilebilir bir problem olmasına rağmen daha ideal bir kontrol sağlanabilmesi adına iyileştirme çalışmaları yapmak mümkündür.

Son olarak Şekil 4.10’da ise PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü davranışlarını beraber gözlemlemenin mümkün olduğu bir grafik yer almaktadır.



Şekil 4.10. PID ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülerinin referans takiplerinin bir arada gösterimi.

Şekil 4.10 incelendiğinde SOSMC (Second Order Sliding Mode Control) (İkinci Dereceden Kayan Kipli Kontrol) eğrisinin, PID eğrisine kıyasla çok daha erken bir sürede referans takibini başlattığı görülmektedir. Literatürde bu süre için oturma zamanı (settling time) ifadesi kullanılmaktadır. Daha önceki veriler tekrar göz önüne alınırsa, ikinci dereceden kayan kipli kontrol için 0,0103 saniye olan oturma zamanı, PID kontrolcü için 7,23 saniyedir. Oturma zamanının kontrolü sağlanmış bir sistemde ne denli önemli olduğunu görebilmek için manyetik levitasyon sistemlerinin günlük hayattaki kullanım alanlarına tekrardan bakmak gerekmektedir, bu alanlar; elektromanyetik yataklar, maglev trenleri, elektromanyetik vinçler, rüzgâr tünelleri, hassas makineler için titreşim izolasyonu, endüklemler ocaklarda metal eritme, roket güdümü projeleri, fotolitografide plakaların yüksek hassasiyetle konumlandırılması, üretim esnasında metal levhaların kaldırılması olarak sıralanabilmektedir. Manyetik levitasyon işleminin bu alanlarda tercih edilmesinin, sürtünme problemini ortadan kaldırarak yüksek hız ve düşük malzeme deformasyonu sunması gibi nedenleri de göz önüne alınırsa sunulan yüksek hız avantajının daha da perçinlenmesi oturma zamanının düşük olmasıyla mümkün olmaktadır. Bir maglev treninin manyetik raylara olan mesafesindeki herhangi bir kaymanın mümkün olduğunca kısa bir sürede telafi edilmesi, insan taşımacılığı için oldukça büyük bir öneme sahiptir. CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi özelinde ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün oturma zamanı PID kontrolcünün oturma

zamanından yaklaşık olarak 700 kat daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden dolayı ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülerin tercih edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Tercih edilebilir bir kontrolcü tasarlamının bir diğer kriteri ise kontrolcünün referans takibini ideal bir biçimde gerçekleştirebilmesidir. Şekil 4.7'den anlaşılağı üzere PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün CE 152 Manyetik Levitasyon sistemi özelinde birbirlerine referans takibi konusunda bariz bir üstünlüğü bulunmamaktadır. Her iki kontrolcü de 100 saniye boyunca yürütölen simölasyon kapsamında oturma zamanına eriştikten sonra referans takibini sürdürmektedirler. Referans takibi özelinde çatırdama problemi nedeniyle ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün ihmal edilebilecek düzeyde bir dezavantajı bulunmektedir. Çatırdama problemi nedeniyle referans noktasındaki anlık sapmalar 0,000015 metrelik sapmalar olduğundan dolayı insan gözü tarafından algılanması mümkün olmayan titreşimler yaratmaktadır. Daha ideal bir şekilde ikinci dereceden kayan kipli kontrol tasarlamak için çatırdama problemini indirgeyebilmek adına yöntemler de mevcuttur. Bu sayede kayma yüzeyini daha isabetli bir şekilde takip edip, referans takibini iyileştirme çalışmaları yapılabilmektedir. Bu konuda; Guldner and Utkin (2000), Aimera and Sankeshwari (2000), Aimera and Sankeshwari (2013) gibi literatür çalışmaları yapılmıştır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada manyetik levitasyon sistemleri için doğrusal olmayan kontrol yöntemleri geliştirilmesi adına bir manyetik levitasyon sistemi olarak CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi baz alınarak yöntem geliştirilmesine gidilmiştir. CE 152 sistemi, tek giriş ve tek çıkışa sahip olması (SISO (Single Input Single Output)), belirgin bir şekilde doğrusal olmayan karakteristiği ve kararsız bir sistem olması sebebiyle sistem dinamikleri üzerinde çalışmak ve klasik veya modern kontrol teorilerini üzerinde uygulayabilmek adına ideal bir düzendir. Bu sebeple sistem tercihi CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nden yana kullanılmıştır. Kontrol yöntemlerinin söz konusu sistem üzerindeki denetim yetkinliğini görebilmek adına iki farklı kontrolcü ele alınmıştır. Bu kontrolcüler sırasıyla, PID kontrolcü ve ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüdür.

Çalışmada öncelikle sistemin matematiksel modelini elde edebilmek adına Newton'un hareket yasasından faydalanılmıştır. Cisme etkiyen tüm kuvvetlerin ele alındığı bu hareket yasasında daha hatasız ve isabetli bir çalışma için büyüklükleri fark etmeksizin tüm kuvvetler hesaplamalara dahil edilmiştir. Aşağı ve yukarı olmak üzere tek boyutlu bir manyetik levitasyon işlemi çalışması yürütüldüğünden, sistemdeki demir bilyeye etkiyen kuvvetlerin aşağı yönlü olanları ve yukarı yönlü olanı tespit edilerek zıt yönlü kuvvetlerin toplamının sıfır olması gerekliliğiyle bir akım tabanlı konum kontrol şeması ortaya konmuştur. Kontrol işlemleri, CE 152 Manyetik Levitasyon Sistemi'nin transfer fonksiyonu üzerinden yapılmıştır.

MATLAB Simulink üzerinden yürütülen simülasyon çalışmaları verileri incelendiğinde bir manyetik levitasyon işlemi için ikinci dereceden kayan kipli kontrolcünün, PID kontrolcüye kıyasla daha ideal bir tercih olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kontrolcülerin referans takibi ve oturma zamanı performansları kıyaslanarak mevzu bahis çıkarımlar yapılmıştır. Aynı zamanda her bir kontrolcünün kontrol sinyali ve hata sinyali grafiklerine de yer verilerek yapılan çıkarımların tutarlılığı desteklenmiştir.

Bu çalışmada ele edilen bulguları, daha olumlu hale getirebilmek adına ikinci dereceden kayan kipli kontrolcülerin çatırdama problemleri üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmak mümkündür. Buna ek olarak, farklı kontrol parametreleri belirleme

yöntemleri kullanılarak yerleşme zamanı ve referans takibi konusunda da performans iyileştirmeleri sağlanabilir. Her iki iyileştirme önerisi için de hali hazırda mevcut olan çeşitli literatür çalışmaları üzerinden denemeler yapılarak daha gürbüz bir kontrol sistemi elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abdelrahman, A., Sayeed, J., Youssef, M., 2018. Hyperloop transportation system: analysis, design, control and implementation. IEEE Transactions on Magnetics, 65(9), 7427-7436.
- Ajmera, Y. A., Sankeshwari, S. S. 2013. Fuzzy fractional order sliding mode controller for DC motor. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 6(4), 1876-1885.
- Andrews, C. 1995. Understanding permanent magnets, Proceedings:Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 18-21 September, Electrical Manufacturing & Coil Winding, 311-315, Rosemont, USA.
- Anonim, 2022. Web Sitesi: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/70139/mod_resource/content/0/GDM404_5.pdf, Erişim Tarihi: 13.05.2022.
- Anonymous, 2009a. Web Sitesi: <http://www.123seminarsonly.com/Seminar-Reports/037/46188628-Magnetic-Levitation.pdf>, Erişim Tarihi: 10.05.2022.
- Anonymous, 2009b. Web Sitesi: <https://www.britannica.com/facts/Laplaces-equation>, Erişim Tarihi: 05.05.2022.
- Anonymous, 2013. Web Sitesi: <https://www.elprocus.com/the-working-of-a-pid-controller/>, Erişim Tarihi: 13.05.2022.
- Anonymous, 2016a. Web Sitesi: https://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/deterministic_system.html, Erişim Tarihi: 10.05.2022.
- Anonymous, 2016b. Web Sitesi: <https://www.hvrmagnet.com/blog/wp-content/uploads/2021/01/lifting-electromagnet-on-excavator.jpg>, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- Anonymous, 2021a. Web Sitesi: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3e409719f4abba959f98b86d2b967fcbcf63622f/width:2000/crop:0,101:0,16388:0,798:0,68285/quality:high/magnetlager.jpg>, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- Anonymous, 2021b. Web Sitesi: http://www.xinhuanet.com/english/2021-07/20/c_1310072057.htm, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- Anonymous, 2022a. Web Sitesi: https://img.freepik.com/free-photo/maglev-train-runs-track_1112-9742.jpg?w=2000, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- Anonymous, 2022b. Web Sitesi: <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/258f90b81ce2953aab450ca988fc2de0/large.png>, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- Anton, H., Bivens, I., Davis S. 2002. Calculus, Multivariable Version. Wiley, 448, England.

- Araki, M. 2019. Control Systems, Robotics and Automation- Volume II. EOLSS Publications, 58-79, France.
- Brock, K., Gottzein, E., Mannlein, E., Pfefferl, J. 1975. Control aspects of a tracked magnetic levitation high speed test vehicle. IFAC Proceedings Volumes, 8(1), 743-759.
- Cole, M. O. T. Fakkaew, W. 2018. An active magnetic bearing for thin-walled rotors: vibrational dynamics and stabilizing control. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23(6), 2859-2869.
- Damodar, N., Dawn, P. 2008. Basic Econometrics. McGraw-Hill Education, 944, United States of America.
- Decarlo, R., Żak, S. 2008. A quick introduction to sliding mode control and its applications, Università' Degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Electricia ed Electronica, 22, Cagliari.
- Domke, H., Kapoor, M. 1974. Untersuchungen zur temperatursteuerung des schwebeschmelzverfahrens mit hilfe kombinierter magnetfelder. International Journal of Materials Research, 65(11), 691-696.
- Earnshaw, S. 1842. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Transactions of the Cambirdge Philophical Society. 97(7)–112.
- Eker, İ. 2010. Second-order sliding mode control with experimental application. ISA Transactions, 49(3), 394-405.
- El Najjar, S. 2013. Ripple free deadbeat control for nonlinear systems with time-delays and disturbances. Master's Thesis, The Islamic University of Gaza, Deanery of Higher Studes, Faculty of Enginnering, Electrical Engineering Department, 86, Gazza
- Erkan, K. 1999. Bulanık mantık ile doğru akım motor kontrolünün incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, F.B.E. Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 91, İstanbul.
- Eroğlu, Y. 2016. Manyetik levitasyon sisteminin kayan kip ve PID temelli referans takip kontrolü ve donanım içeren benzetim temelleri. Yüksek Lisans Tezi, Abdullah Gül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 88, Kayseri
- Estrada-Vargas, A., López-Mellado, E. Lesage, J. 2015. A black-box identification method for automated discrete event systems. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 14(3), 1321-1336.
- Geim, A. K., Dubonos, S. V., Lok, J. G. S., Henini, M., Maan, J. C. 1998. Paramagnetic meissner effect in small superconductors. Nature, 396(6707), 144-146.
- Geim, A., Simon, M. 1999. Magnet levitation at your fingertips. Nature, 400, 323–324.

- Guinand, F., Siarry, P., Monmarché, N. 2010. Artificial Ants: from collective intelligence to real-life optimization and beyond - toc and introduction. FSC, 576, France
- Guldner, J., Strasse, H., Utkin, V. Lab, D. Ave, N. 2006. The chattering problem in sliding mode systems. IFAC Proceedings Volumes, 39(5) 1-1.
- Hardy, R. 1990. Theory and applications of multi quadric- bioharmonic method 20 years of discovery 1968-1988. Computer & Mathematics with Applications, 19(8), 163-208.
- Honc, D. 2019. Modelling and identification of magnetic levitation model CE 152/Revised. R. Silhavy (Ed.), Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems 765, 35-43.
- Kim, Y., Jeon, G. 2004. Error reduction of sliding mode control using sigmoid-type nonlinear interpolation in the boundary layer. International Journal of Control, Automation and Systems, 2(4), 523-529
- Lee, H.-W., Kim, K.-C., Lee, J. 2006. Review of maglev train technologies. IEEE Transactions on Magnetics, 42(7), 1917-1925.
- Li, H., Li, S., Lu, J., Qu, Y., Guo, C. 2019. A novel strategy based on linear active disturbance rejection control for harmonic detection and compensation in low voltage AC microgrid. Energies. 12(20).
- Li, X., Anvari, B., Palazzolo, A., Wang, Z., Toliyat, H. 2018. A utility-scale flywheel energy storage system with a shaftless, hubless, high-strength steel rotor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(8), 6667-6675.
- Mughees, A., Mohsin, S. A. 2020. Design and control of magnetic levitation system by optimizing fractional order PID controller using ant colony optimization algorithm. IEEE Access, 8, 116704-116723.
- Rose-Innes, A., Rhoderick, E. 2015. Introduction to Superconductivity. Pergamon, 262, England.
- Shah, A, Huang, D., Huang, T., Farid, U. 2018. Optimization of buildings energy consumption by designing sliding Mode control for multizone VAV air conditioning systems. Energies, 11, 2911.
- Spain, E., Venkatanarayanan, A. 2014. Review of physical principles of sensing and types of sensing materials. Comprehensive Materials Processing, 5-46.
- Stanley, M. 1998. Modern Control System Theory and Design. Wiley-Interscience, 720, England.
- Sun, Y., Xu, J., Qiang, H., Chen, L. 2019. Adaptive sliding mode control of maglev system based on RBF neural network minimum parameter learning method. Measurement. 141, 217-226.
- Utkin, V., Lee, H. 2010. Chattering problem in sliding mode control systems. IFAC Proceedings Volumes, 49(3), 1.

- Wahyudie, A., Susilo, T., Nandar, C., Fayez, S., Errouissi, R. 2021. Simple robust PID tuning for magnetic levitation systems using model-free control and H control strategies. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(12), 3956-3966.
- Weh, H., Shalaby, M. 1977. Magnetic levitation with controlled permanent excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 13(5), 1409-1411.
- Wei Wei, W., Wenchao, X. Donghai, L. 2019. On disturbance rejection in magnetic levitation. *Control Engineering Practice*, 82, 24-35.
- Weinstock, R. 1976. On a fallacious proof of Earnshaw's theorem. *American Journal of Physics*, 44(4), 392-393.
- Zhou, H., Deng, H., Duan, J. 2018. Hybrid fuzzy decoupling control for a precision Maglev motion system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(1), 389-401.