

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK YASTIKLAMADA GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE KONUM
KONTROLÜ

Enes Mahmut GÖKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Kadir ERKAN

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK YASTIKLAMADA GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE KONUM
KONTROLÜ

Enes Mahmut GÖKER tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kadir ERKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Hüseyin ÜVET, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU, Üye
Antalya Bilim Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Kadir ERKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Manyetik Yastıklamada Görüntü İşleme ile Konum Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Enes Mahmut GÖKER

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecince tüm bilgilerini benimle paylaşarak oldukça verimli bir yüksek lisans dönemi geçirmemi sağlayan, her konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Kadir Erkan'a ve öğrencileri olan Yüksek Mekatronik Mühendisi Ahmet Fevzi Bozkurt'a, Gemi Makinalar İşletme Mühendisi Gökşen Elpeze'ye ve Maglev ekip üyeleri Ali Uğur'a ve Bayram Karaca'ya teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman arkamda duran canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz,2022

Enes Mahmut GÖKER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	12
2 MANYETİK ASKILAMA	13
2.1 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Manyetik Analizi ve Analitik Hesabı	13
2.2 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Havada Askılama Modeli	23
2.2.1 Gerilim Uyartımlı PID Kontrolör Tasarımı	27
2.2.2 Gerilim I-PD Kontrolör Tasarımı.....	32
2.2.3 Akım Uyartımlı PID Kontrolör Tasarımı.....	34
2.2.4 Akım Uyartımlı I-PD Kontrolör Tasarımı.....	37
2.2.5 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı (C-SMC)	39
2.2.6 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı (I-SMC).....	41
2.2.7 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı	43
3 KALICI MIKNATISLI SENKRON DOĞRUSAL MOTOR	46
3.1 Yatay Tahrik Mekanizmasının Modellenmesi	46

3.2 Artı Tipli Karma Manyetik Taşıyıcının Doğrusal Motor Altında Analizleri	51
3.3 Artı Tipli Karma Manyetik Taşıyıcının Doğrusal Motor Altında Benzetim Çalışmaları	57
3.3.1 PID Hız Kontrolör Tasarımı	58
3.3.2 PID Konum Kontrolör Tasarımı	61
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
4.1 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Manyetik Havada Askılama Çalışmaları	65
4.1.1 Gerilim Uyarımlı I-PD Kontrolör.....	67
4.1.2 Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör	74
4.1.3 Akım Uyarımlı Klasik Kayan Kipli Kontrolör (CSMC)	80
4.1.4 Akım Uyarımlı İntegral Kayan Kipli Kontrolör (I-SMC)	83
4.1.5 Akım Uyarımlı Burulma Kayan Kipli Kontrolör (T-SMC)	87
4.2. Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Doğrusal Motor ile Birlikte Çalışmaları	90
4.2.1 Doğrusal Motor Kuvvet Kazancı Deney Düzenegi	90
4.2.2 Doğrusal Motor Görüntü İşleme ile Konum Kontrolü	91
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	100
KAYNAKÇA	102
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	105

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa eksenini açısı değışimi
φ	Akı yoğunluğu
$T_{d\alpha}$	Alpha eksenini bozucu torku
J_{α}	Alpha eksenini eylemsizlik momenti
β	Beta eksenini açısı değışimi
$T_{d\beta}$	Beta eksenini bozucu torku
J_{β}	Beta eksenini eylemsizlik momenti
R	Bobin direnci
L	Bobin indüktansı
N	Bobin sarım sayısı
F_d	Bozucu kuvvet
m	Kütle
λ	Manyetik akı
S	Mıknatıs alanı
μ_0	Manyetik akı geçirgenlik sabiti
γ	Stabilite indeksi
g	Yerçekimi ivmesi
τ	Zaman eşdeğer sabiti
F_{dz}	z – eksenini bozucu kuvveti

KISALTMA LİSTESİ

LSM	Lineer Senkron Motor
LCD	Liquid-Crystal Display
LPF	Low-Pass Filter
MEC	Magnetic Equivalent Circuit
PM-LSM	Permanent Magnet Linear Synchroonous Motors



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 LCD-Taşıyıcı Aracın Enine Kesitinin Görünüşü (a) ve Sistem (b).....	3
Şekil 1.2 Düzlemsel Temassız Çelik Plaka Taşıma Sistemi	3
Şekil 1.3 Manyetik Havada Askılama Sistemi.....	4
Şekil 1.4 Karma Elektromıknatısların ve Doğrusal Motorların Yerleşimi	4
Şekil 1.5 Manyetik Havada Askılama Sistemi.....	5
Şekil 1.6 CAD Çizimi (a), Oluşturulan Sistem(b).....	6
Şekil 1.7 4 kutuplu Manyetik Havada Askılama Sisteminin Planar Doğrusal Motorla Birleştirilmesi (a), Planar Doğrusal Motor (b).....	6
Şekil 1.8 Deney Düzeneği (a), Deney Düzenekinin Kesit Görüntüsü (b)	7
Şekil 1.9 Taşıyıcı Sistemin Pozisyon Bulma Şeması.....	8
Şekil 1.10 Görüntü İşleme ile Taşıyıcının Konum ve Hız Belirleme Deneysel Çalışmaları	8
Şekil 2.1 Artı Kutuplu Karma Elektromıknatıs.....	13
Şekil 2.2 Artı Kutuplu Manyetik Yastık Hareket Eksenleri.....	14
Şekil 2.3 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Kontrol Metotları	14
Şekil 2.4 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Eş Devresi (a) İndirgenmiş Eş Devresi (b).....	16
Şekil 2.5 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Analiz Modeli	19
Şekil 2.6 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Akı Yoğunluğu	20
Şekil 2.7 Z Eksen Çekme Kuvvetinin (F_z) Sonlu Elemanlar Analizi	20
Şekil 2.8 Z Eksen Çekme Kuvvetinin (F_z) Analitik Hesaplanması	20
Şekil 2.9 Moment Değişimi Sonlu Elemanlar Analizi	21
Şekil 2.10 Moment Değişimi Analitik Hesaplanması	21
Şekil 2.11 α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı Olarak Farklı z Değerleri.....	22
Şekil 2.12 $z = 8 \text{ mm}$ ve $iz = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z 'nin Sonlu Elemanlar Analizi	22
Şekil 2.13 $z = 8 \text{ mm}$ ve $iz = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z 'nin Analitik Hesaplanması.....	23
Şekil 2.14 Z-Eksen Doğrusallaştırılmış Sistem Dinamiği	26
Şekil 2.15 Model Kutupları	27
Şekil 2.16 Sistemin Z Eksen PID Kontrolörünün Yapısı.....	28
Şekil 2.17 PID Kontrolör Simulink Modeli	30

Şekil 2.18 PID Kontrolör Kutup Ataması	31
Şekil 2.19 Basamak Referans Girişi PID Kontrolör z Eksen Cevabı.....	32
Şekil 2.20 I-PD Kontrolör Simulink Modeli	33
Şekil 2.21 I-PD Kontrolör Kutup Ataması.....	33
Şekil 2.22 Basamak Referans Girişi I-PD Kontrolör z Eksen Cevabı.....	34
Şekil 2.23 Basamak Referans Girişi I-PD Kontrolörü ile PID kontrolörünün z Eksen Cevabı Karşılaştırılması	34
Şekil 2.24 Z Ekseni Doğrusallaştırılmış Sistem Dinamiği.....	35
Şekil 2.25 Sistemin z Eksen PID Kontrolörün Yapısı	35
Şekil 2.26 PID Kontrolör Simulink Modeli	37
Şekil 2.27 Basamak Referans Girişi Akım Uyarımlı PID Kontrolör z Eksen Cevabı	37
Şekil 2.28 Akım Uyarımlı I-PD kontrolör Simulink Modeli.....	38
Şekil 2.29 Basamak Referans Girişi Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör z Eksen Cevabı	38
Şekil 2.30 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Simulink Modeli.....	41
Şekil 2.31 Basamak Referans Girişi CSMC Kontrolör z Eksen Cevabı.....	41
Şekil 2.32 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Kontrolör Simulink Modeli	42
Şekil 2.33 Basamak Referans Girişi I-SMC Kontrolör z Eksen Cevabı.....	43
Şekil 2.34 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Kontrolör Simulink Modeli.....	44
Şekil 2.35 Basamak Referans Girişi T-SMC Kontrolör z Eksen Cevabı.....	45
Şekil 2.36 Basamak Referans Girişi Kontrolör Karşılaştırılması	45
Şekil 3.1 Senkron Tipi Doğrusal Motor	46
Şekil 3.2 Doğrusal Motor Yapısı ve Akım Dönüşümleri	47
Şekil 3.3 Doğrusal Motor Faz Akım Dönüşümleri Benzetimi	48
Şekil 3.4 3 Faz Akımlarının 2 Faza Dönüşümleri $i_d=0$ $i_q=5A$	49
Şekil 3.5 Doğrusal Motor İtme Kuvvet Modelinin Blok Diyagramı	51
Şekil 3.6 Doğrusal Motorla Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Sürülmesi	52
Şekil 3.7 3 Boyutlu FEM Analiz Modelinde Kullanılan Doğrusal Motorun Sargı Yapısı	53
Şekil 3.8 3 Boyutlu FEM Analizde Kullanılan Ağ Yapısı	54
Şekil 3.9 3 Boyutlu FEM Analiz İle Hesaplanan Manyetik Akı Dağılımı.....	54
Şekil 3.10 $i_d=0-2A$ $i_q=0 A$ Çekme Kuvveti	55

Şekil 3.11 $i_d=0-2A$ $i_q=0$ A İtke Kuvveti.....	55
Şekil 3.12 $i_d=0$ $i_q=0-2A$ Çekme Kuvveti.....	56
Şekil 3.13 $i_d=0$ $i_q=0-2A$ İtke Kuvveti	56
Şekil 3.14 Doğrusal Motorla Yatay Eksende Diyagonal Sürmeye İlişkin 3 Boyutlu FEM Analiz Modeli ile Elde Edilen İtke Kuvveti Akım İlişkisi.....	57
Şekil 3.15 Konum Kontrolör Blok Diyagramı	58
Şekil 3.16 Doğrusal motor PID Hız Kontrolör Diyagramı	58
Şekil 3.17 Hız PID kontrolör Simulink Modeli	60
Şekil 3.18 Basamak Referans Girişi Hız Pıd Kontrolör Cevabı	60
Şekil 3.19 Basamak Girişine Karşı Hız Hatası.....	61
Şekil 3.20 Basamak Referans Girişi Akım Çıkışları, (a) 2 Faz Akımları, (b) 3 Faz Akımları	61
Şekil 3.21 Doğrusal Motor PID Hız Kontrolör Blok Diyagramı	62
Şekil 3.22 Konum ve Hız PID Kontrolör Simulink Modeli	63
Şekil 3.23 Basamak Referans Girişi PID Kontrolör Cevabı (a) Konum (b) Konuma Bağlı Hız	63
Şekil 3.24 Basamak Girişine Karşı Konum Hatası.....	64
Şekil 3.25 Basamak Referans Girişi Akım Çıkışları, (A) 2 Faz Akımları, (B) 3 Faz Akımları	64
Şekil 4.1 Artı Tipli Hibrit Elektromıknatısın Manyetik Havada Askılama Parametre Belirleme Düzenegi.	65
Şekil 4.2 Deney Düzenegi (a), Taşıyıcı Sistem (b), Akım Sensör (c), Sürücü Kartı (d).....	66
Şekil 4.3 Düşürme Deneyi Grafiği.....	68
Şekil 4.4 Gerilim Uyarımlı I-PD Simulink Ana Ekranı	69
Şekil 4.5 Sensor Bloğu İçyapısı	70
Şekil 4.6 Amplifier Bloğu İç Yapısı.....	70
Şekil 4.7 dSPACE Control Desk Kontrol Arayüzü	71
Şekil 4.8 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	72
Şekil 4.9 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	73
Şekil 4.10 β Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	74
Şekil 4.11 Akım Uyarım Sürücü Panosu	75

Şekil 4.12 Düşürme Deneyi Grafiği	76
Şekil 4.13 Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör Ana Ekranı	77
Şekil 4.14 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	78
Şekil 4.15 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	79
Şekil 4.16 β Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	80
Şekil 4.17 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), CSMC_z Bloğunun İçyapısı (b)	81
Şekil 4.18 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	82
Şekil 4.19 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	83
Şekil 4.20 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), Kontrolör İçyapısı (b)	84
Şekil 4.21 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	85
Şekil 4.22 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	86
Şekil 4.23 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), Kontrolör İçyapısı (b)	87
Şekil 4.24 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	88
Şekil 4.25 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)	89
Şekil 4.26 Doğrusal Motor Kuvvet Kazancı Ölçümü Deney Düzeneği	90
Şekil 4.27 Yatay Eksende Hareketine İlişkin Kuvvet Akım Grafiği	91
Şekil 4.28 Motor Sürücü Panosu	91
Şekil 4.29 Quanser Q8 Kontrol Kartı	92
Şekil 4.30 Matlab Simulink Ana Çalışma Ekranı	92
Şekil 4.31 Kamera Bloğu İç Yapısı	93
Şekil 4.32 Görüntü İşleme Aşamasında Uygulanan Adımlar	94
Şekil 4.33 Orijinal Görüntü (a), Filtrelenmiş Görüntü (b), Sobel Kenar Bulma Görüntüsü (c), Bulunan Kenarda Referans Alınacak Noktanın Belirlenmiş Hali (d)	95

Şekil 4.34 Konum Kontrol Bloğu İç Yapısı.....	98
Şekil 4.35 Basamak Referans Girişi Konum Cevabı	98
Şekil 4.36 Basamak Referans Girişi Hız Cevabı.....	99
Şekil 4.37 2 Faz i_d ve i_q Akım Çıktıları (a) 3 Faz Akım Çıktıları (b)	99



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Model Parametreleri	19
Tablo 2.2 Artı Kutuplu Elektromıknatıs Model Parametreleri.....	26
Tablo 2.3 PID ve I-PD Kontrolör Kat Sayıları.....	30
Tablo 2.4 PID ve I-PD Kontrolör Kat Sayıları.....	36
Tablo 2.5 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	40
Tablo 2.6 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	42
Tablo 2.7 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	44
Tablo 3.1 Doğrusal Motor Analiz Parametreleri	53
Tablo 3.2 PID_v Kontrolör Kat Sayıları ve Model Parametreleri	59
Tablo 3.3 PID_x Kontrolör Kat Sayıları ve Model Parametreleri	62
Tablo 4.1 Düşürme Deneyi Deneysel Sonuçları.....	67
Tablo 4.2 Artı Kutuplu Elektromıknatısın Parametreleri	68
Tablo 4.3 I-PD Kontrolör Katsayıları	69
Tablo 4.4 Çekme Kuvveti Deneysel Sonuçları	75
Tablo 4.5 Artı Kutuplu Elektromıknatısın Parametreleri	76
Tablo 4.6 I-PD Kontrolör Katsayıları	77
Tablo 4.7 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	81
Tablo 4.8 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	84
Tablo 4.9 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri	87
Tablo 4.10 Kuvvet Akım İlişkisi.....	90
Tablo 4.11 Mesafe Sensörü Kalibrasyonu	93
Tablo 4.12 Kamera Kalibrasyon Değerleri.....	97
Tablo 4.13 PID_x ve PID_v Kontrolör Parametreleri	98

Manyetik Yastıklamada Görüntü İşleme ile Konum Kontrolü

Enes Mahmut GÖKER

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Kadir ERKAN

Günümüzde, gelişen imalat sanayisinde ihtiyaç duyulan temiz odalar için taşıma sistemlerinin önemi gittikçe artmaktadır. Kimyasal alanlar ve ileri teknolojiye sahip olan malzemelerin üretilmesinde ve taşınma esnasında ortamda titreşim, ses, toz gibi partiküllerin olmaması gerekmektedir. Mevcut olan taşıma sistemleri bu konularda yetersiz kalmaktadır. Bu gibi problemlerin çözümü için elektromanyetik kuvvetler kullanılarak taşıyıcının temassız bir şekilde havada askıda kalmasını sağlayan manyetik levitasyon teknolojisi geliştirilmiştir. Bu taşıma sistemleri mekanik temassız bir şekilde çalıştığından, sürtünme ve aktarım mekanizmaları kayıpları olmadığı için hareket halinde yüksek enerji tüketiminin önüne geçilerek enerji verimliliği sağlamaktadır. Ayrıca taşıma işlemlerinde yüksek hassasiyetli hareket kabiliyeti ve konumlama yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Birden fazla taşıyıcının aynı platformda kullanılması durumunda ise taşıyıcıların yerlerinin tespit edilmesi ve istenilen konumlara gönderilmesi için kamera teknolojisinin kullanılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada konveksiyonel 4 kutuplu taşıyıcı sistem yerine yeni artı tipli 4 kutuplu elektromıktanıs ve sabit mıknatıslı karma yapılı taşıyıcı sistem kullanılmıştır. Konveksiyonel 4 kutuplu taşıyıcı sistemi 4 parçadan oluşurken artı tipli 4 kutuplu taşıyıcı sistem 2 parçadan oluşmaktadır. Doğrusal motor ile birlikte kullanılarak doğrusal hareket temassız bir şekilde sağlanmaktadır.

Taşıyıcı sistem yapısı gereği kararsızdır, kararsızlığın giderilmesi için aktif kontrolör tasarlanmıştır. Modele dahil edilmeyen ya da doğrusal olmayan karakteristiğin ihmal edilen etkilirinin çalışan sistem üzerinde giderilmesi ve performansında iyileştirilmeler yapılması için farklı kontrolörler tasarlanmış, benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı sistemin doğrusal hareketi için hız ve konum kontrolörleri tasarlanmış ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Deneysel sistemde tasarlanan kontrolörler uygulanarak görüntü işleme ile taşıyıcının konum kontrolü yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik levitasyon, 4 kutuplu karma mıknatıs, sabit mıknatıslı doğrusal motor, görüntü işleme.

Position Control With Image Processing For Magnetically Carrier

Enes Mahmut GÖKER

Department of Mechatronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kadir ERKAN

Nowadays, transportation systems are becoming increasingly important for the clean rooms needed in the developing manufacturing industry. There should be no particles such as vibration, sound, dust in the environment during the production and transportation of materials with chemical fields and advanced technology. Existing transport systems are insufficient in these matters. In order to solve such problems, magnetic levitation technology, which allows the carrier to hang in the air without contact, has been developed by using electromagnetic forces. Since these transport systems work without mechanical contact and there is no loss of friction and transmission mechanisms, they provide energy efficiency by preventing high energy consumption in motion. In addition, high-precision mobility and positioning are possible in transportation processes. If more than one carrier is used on the same platform, it is important to use camera technology to detect the carriers and send them to the desired locations.

In this study, instead of the convectional 4-pole carrier system, a new cross-type 4-pole electromagnet and permanent magnet hybrid carrier system is used. While the convectional 4-pole carrier system consists of 4 parts, the plus-type 4-pole carrier system consists of 2 parts. By using it with linear motor, linear motion is provided without contact.

The carrier system is inherently unstable, and an active controller is designed to eliminate the instability. Different controllers have been designed, simulation studies and experimental studies have been carried out in order to eliminate the neglected effects of nonlinear characteristics that are not included in the model on the operating system and to improve its performance. For the linear motion of the carrier system, velocity and position controllers were designed and simulation studies were carried out. By applying the controllers designed in the experimental system, the position of the carrier was controlled by image processing.

Key Words: Magnetic Levitation, 4-pole hybrid electromagnet, permanent magnet linear synchronous motor, image processing.



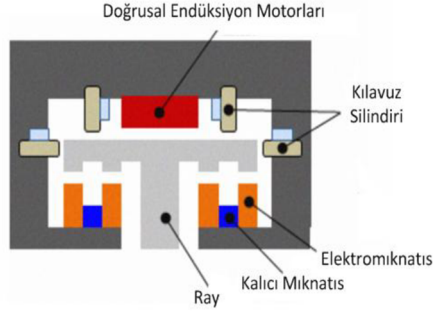
1.1 Literatür Özeti

Üretim alanlarındaki zorlu isterlerin karşılanması ve özel ortamların ihtiyaçları teknolojiyi bu sorunlara çözüm üretecek şekilde ilerletmektedir. Üretim alanlarının en temel sorunlarından birisi üretilen malzemelerin taşınmasıdır. Özellikle temiz odalar ve yüksek teknolojiye sahip olan malzemelerin üretilmesinde ve üretilen malzemelerin taşınma esnasındaki ortamda; titreşim, ses, toz ve yağ gibi partiküllerin olması taşımadaki hassasiyeti olumsuz etkilemekte, taşınacak malzemenin zarar görmesine sebep olabilmektedir. Manyetik havada askılama sistemleri bu olumsuzlukların önüne geçerek zorlu çalışma ortamlarına kolaylıkla uygulanabilmektedir. Elektriksel tahrik sistemlerinin kullanılması ek olarak kullanılan enerji kaynaklarını (hidrolik, pnömatik vb) ortadan kaldırır, titreşiminin önüne geçer, ortamda yağ, toz gibi partikül oluşturmaz, hareket kabiliyetini artırır. Manyetik havada askılama sistemi temassız hareket kabiliyetine sahiptir ve aktarma ekipmanlarına ihtiyaç duymadığı için aşınma oluşmaz ve bakım maliyetleri azdır. Yüksek hassasiyette hız ve pozisyon kontrol gerektiren özel çalışma ortamları için ekonomik açıdan katma değeri yüksek ileri teknolojik çözümler sunmaktadır. Ayrıca malzemelerin taşınması sırasında çevreyi koruma ve enerji verimliliği konuları ele alındığında manyetik havada askılama sistemleri ön plana çıkmaktadır.

Manyetik havada askılama sistemleri 1960 yıllarından beri araştırılmaktadır. Farklı tip ve boyutlardaki kalıcı mıknatısların kalıcı mıknatıslı manyetik havada askılama sisteminin performans etkileri araştırılmıştır [1]. Bu sistemlerde kalıcı mıknatıs kullanmanın avantajları sunulmuştur [2]. Morishita vd. güç tasarrufu sağlayan elektromanyetik süspansiyon sistemini geliştirmişlerdir. Literatürde sıfır güç kontrol metodu olan geçen kontrol yönteminde, kalıcı mıknatısların elektromıknatıslar ile karma yapıda kullanılmasıyla havada askılama için

harcanan güç sıfıra yakınsamaktadır. Bu kontrol metoduna göre; kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıstan oluşan karma yapıda; elektromıknatıslar kalıcı mıknatısların hava aralığı mesafesini kontrol ederken, kalıcı mıknatıslar da test aracının ve araca yerleştirilen yükün toplam ağırlığını havada askılamak için gerekli çekim kuvvetini üretmektedirler. Kalıcı mıknatısların oluşturduğu çekim kuvvetiyle sistemin ağırlığının eşit olduğu durumda havada askılamak için elektromıknatıs bobinlerinden çekilen akım sıfıra yakındır. Yaptıkları deneysel çalışmada 8 kg test düzeneği ve 4 kg yük ile toplamda 12 kg ağırlığını 1500-mAh batarya ile 8 saat boyunca havada askılamıştır. [3-4]'te karma elektromıknatıslar kullanılmış ve bu yapının elektromanyetik analizine dayanan optimal tasarımı üzerinde durulmuştur.[4]'te karma elektromıknatıs havada askılama sistemlerinin farklı kütleler için kolaylıkla uygulanabildiğini öne sürmüş ve büyük (500 kg) ve küçük (5 kg) ölçekli sistemler için avantajlı olduğu gösterilmiştir.[5]'de elektromekanik sistemin dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve sıfır güç kontrol metodunu frekans tanım bölgesinde incelemiştir. [6-7]'de elektromıknatıs bobinlerinin tasarımları incelenmiş ve 0.8 kg ağırlığında bir küre havada tutulmuştur.

Özel ortamlar için tasarlanan taşıma sistemleri için, doğrusal motorla hareket ettirilen askılama mekanizmaları en önemli teknolojik yaklaşımların başında yer almaktadır.[8]'de doğrusal motor kullanılarak manyetik olarak kılavuzlanan LCD cam konveyör sistemi geliştirilmiştir. Şekil 1.1'de enine kesitin görünüşü ve taşıma platformu gösterilmiştir.



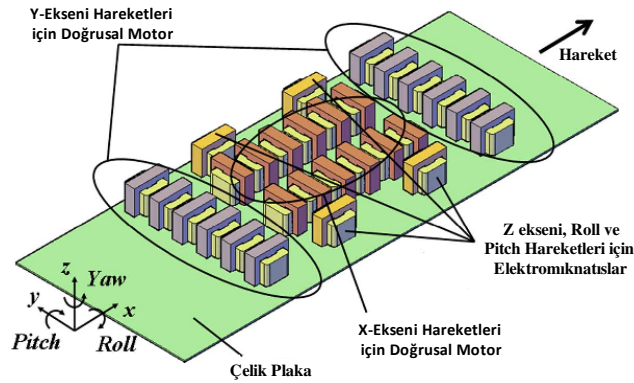
(a)



(b)

Şekil 1.1 LCD-Taşıyıcı Aracın Enine Kesitinin Görünüşü (a) ve Sistem (b).

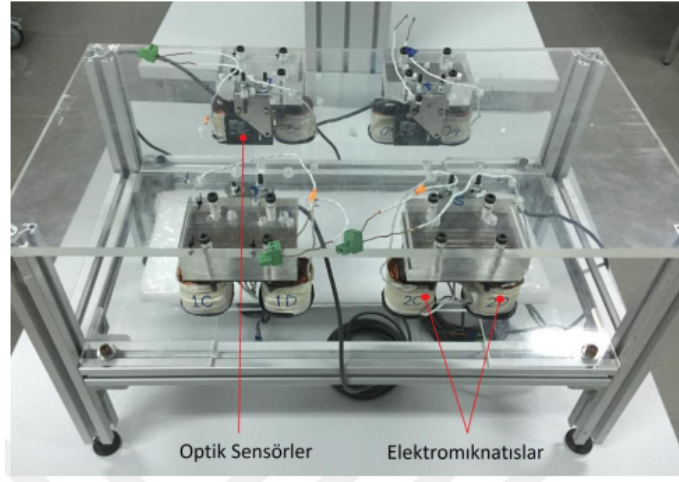
Endüstride kullanılan çelik sac plakaların taşınmasında manyetik askılama sistemleri kullanılmıştır [9-10]. Choi vd. temasız çelik plaka taşıma sistemi için hem manyetik askılama hem de doğrusal hareketleri tek bir sistemde birleştirerek yeni bir itme-çekme kuvveti üreten mekanizmayı önermiştir. Şekil 1.2’de bu sistem gösterilmiştir. Taşıma sisteminde x ve y eksenlerine yerleştirilmiş olan doğrusal motorları yatay eksenlerde itki kuvveti üretirken, z eksenini doğrultusunda hareketi için 4 elektromıknatıs kullanılarak çekme kuvveti üretmektedir. Sistemin sonlu elemanlar analizi yapılmış ve deneysel çalışmalarla sistem incelenmiştir [9].



Şekil 1.2 Düzlemsel Temassız Çelik Plaka Taşıma Sistemi

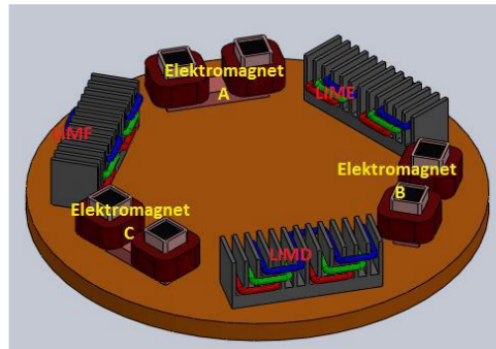
Endüstride taşıyıcı bantlar ve merdaneler ile taşınan çelik plakaların taşınma sırasında zarar görmemesi ve deformasyon oluşmaması için manyetik havada askılama temelli taşıma sistemi tasarlanmıştır. Bu taşıyıcı sistem için sonlu

elemanlar analizi yapılmış, sistem modellenmiş ve farklı kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Şekil 1.3'te manyetik havada askılama sistemi gösterilmiştir [11].



Şekil 1.3 Manyetik Havada Askılama Sistemi

Taşıma, ortamların farklılık göstermesi nedeniyle sadece yatayda değil aynı zamanda dikey ve eğimli ortamlarda da yapılmaktadır. Bunun için taşıyıcının 6 serbestlik derecesinde kontrolü yapılması için esnek taşıma sistemleri [12-13]'de önerilmiştir. Bu sistemde 3 tane doğrusal indüksiyon motoru ve havada askılama için kutup başları 120 derecelik açılar ile dairesel düzleme yerleştirilmiştir. Manyetik havada askılama için karma mıknatıs yapısı kullanılmıştır. Sistemin kontrolü için ayrıklaştırılmış (decentralized) ve merkezileştirilmiş (centralized) kontrol yöntemleri uygulanmıştır.



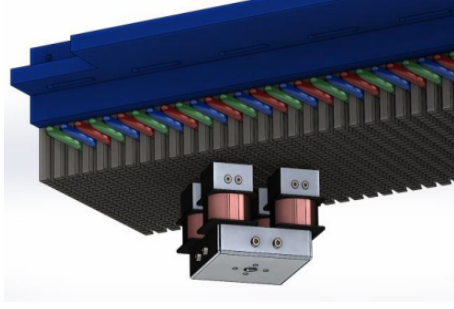
Şekil 1.4 Karma Elektromıknatısların ve Doğrusal Motorların Yerleşimi

[14]'de manyetik karma elektromıknatıslar ile doğrusal motorları tek bir nüvede birleştirerek yeni bir karma yapı önermiştir. Yeni nüve yapısı için sonlu elemanlar analizi yapılmış, sistem modellenmiş ve farklı kontrolcüler tasarlanarak sıfır güç kontrolü başarılı bir şekilde yapılmıştır.

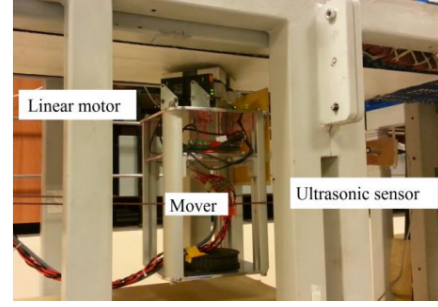


Şekil 1.5 Manyetik Havada Askılama Sistemi.

Bucak vd. 2016 yılında 4 kutuplu karma elektromıknatıs ve sabit mıknatıslı lineer senkron motordan oluşan temassız taşıma sistemi oluşturmuşlardır. Manyetik askılama sistemi için sıfır güç kontrol metodu uygulanmış ve doğrusal hareketler için doğrusal senkron motor tasarlamışlardır. Taşıyıcının doğrusal senkron motor altında hareketi için vektör kontrolü yaparak PI kontrolcü tasarlamışlardır [15].



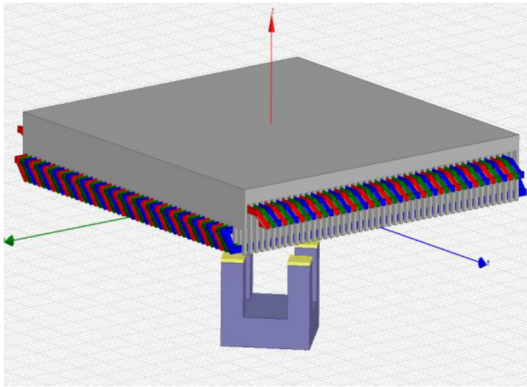
(a)



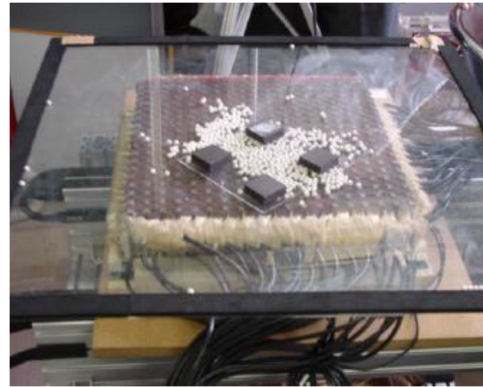
(b)

Şekil 1.6 CAD Çizimi (a), Oluşturulan Sistem(b).

Esnek taşıma sistemleri için yön değiştirme amaçlı planar senkron motor yapısı kullanılmaktadır. Planar motorlar; hassas konumlanma ve hareket kontrolüne imkan sağlar. X ve y yönlerine yerleştirilmiş olan motor sargıları farklı frekans ve genlikte uyarılarak taşıyıcı sistemin istenilen yönde hareket ettirilmesi sağlanabilmektedir. Şekil 1.7’de taşıyıcı sistem ve planar motor verilmiştir. [16]’da manyetik havada askılama sistemi için elektromanyetik analizleri yapılarak sistemin doğrusal modeli çıkartılmış ve farklı kontrolcüler tasarlanarak askılama işlemleri yapılmıştır. Doğrusal senkron motor ve planar motorun taşıyıcı sisteme olan itki kuvvetlerinin analizleri yapılmıştır.



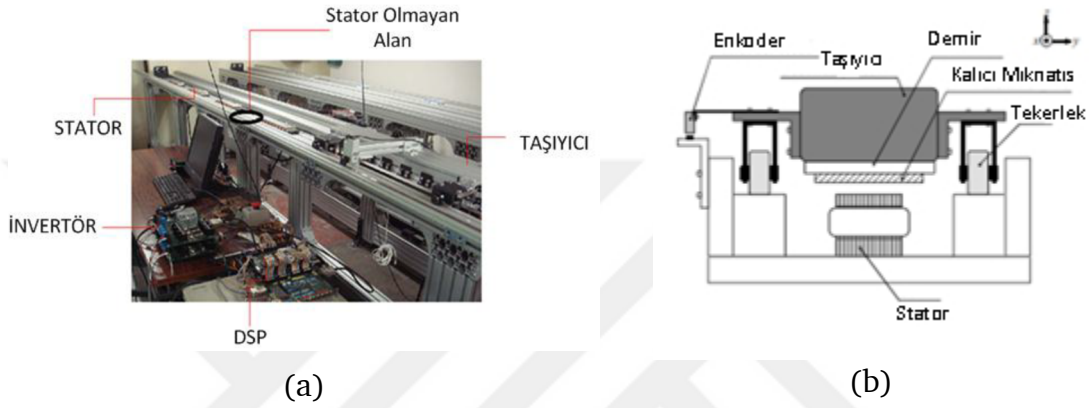
(a)



(b)

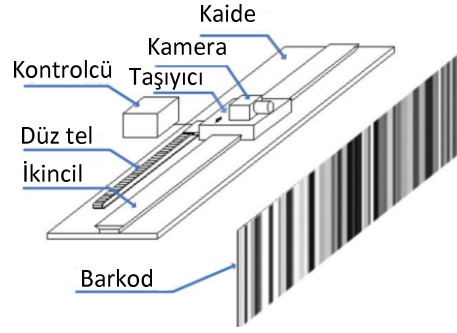
Şekil 1.7 4 kutuplu Manyetik Havada Askılama Sisteminin Planar Doğrusal Motorla Birleştirilmesi (a), Planar Doğrusal Motor (b)

Kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor (PM-LSM) ile uzun mesafe esnek taşıma sistemi [17-18] önerilmiştir. Önerilen bu sistemde taşıma sisteminin maliyetini azaltmak için belirli yerlere PM-LSM yerleştirilmiştir. Şekil 1.8’te sistem gösterilmiştir. Yapılan çalışmada taşıyıcıya belirli yerlerde hızlandırma ve yavaşlatma için itki kuvveti verilerek sürekli enerji harcamasının önüne geçilmiştir. Konum kontrolünü için taşıyıcının motor üzerindeki konum bilgisi optik sensör ve doğrusal enkoder kullanımı ile sağlanmıştır.



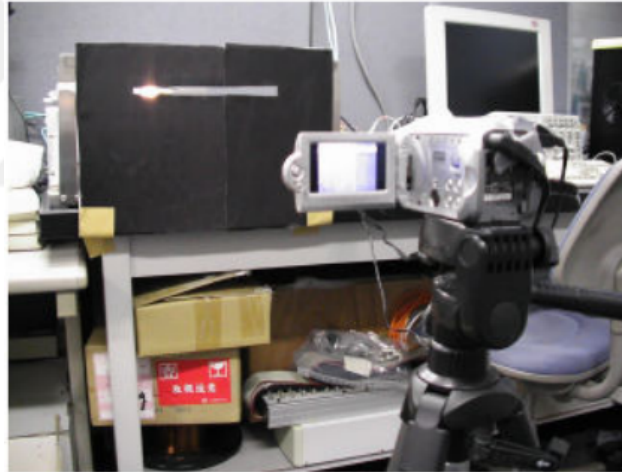
Şekil 1.8 Deney Düzeneği (a), Deney Düzeneğinin Kesit Görüntüsü (b)

Kamera teknolojilerinin gelişmesi ile nesne takip sistemleri, plaka tanımlama sistemleri, yol çizgileri takip sistemleri gibi çalışmalarda büyük gelişmeler elde edilmiştir [19-21]. PM-LSM konum kontrolleri için farklı metotlar (doğrusal enkoderler, mesafe sensörleri ve kameralar) yer almaktadır [22-25]. [22]’da hassas konum belirlemek için çizgi taramalı kamera kullanılmıştır. Her konum için tanımlanmış olan çizgiler kameradan okunarak taşıyıcının konumu yüksek hassasiyette belirlenmiştir.



Şekil 1.9 Taşıyıcı Sistemin Pozisyon Bulma Şeması

[24]'de taşıyıcının üzerinde bulunan aydınlatma ile konum ve hız belirlemesi yapılmıştır. Işığın yayılmasından kaynaklı motor hızı ve konumundaki bozulmaların önüne geçilebilmek için çift örnekleme oranlı gözlemci kullanılmıştır. Gözlemcinin etkinliği benzetim çalışmalarında ve deneysel olarak doğrulanmıştır.



Şekil 1.10 Görüntü İşleme ile Taşıyıcının Konum ve Hız Belirleme Deneysel Çalışmaları

1.2 Tezin Amacı

Temiz odalar ve hassas taşıma gerektiren yerlerde geleneksel taşıma işlemlerinin üretmiş olduğu toz, gürültü, yağ atıkları taşımayı olumsuz etkilemektedir. Bu gibi durumlar için tasarlanmış olan manyetik havada askılama sistemleri oldukça önem arz etmektedir. Bu teknolojiyi kullanmanın avantajları:

- Gürültüsüz çalışma,
- Titreşim ve toz üretmemesi,
- Yüksek hassasiyette konumlama yapılabilmesi,
- Havada askılama halinde sıfıra yakın güç tüketmesi,
- Mekanik temassız olduğundan dolayı aşınma, sürtünme yapmaması,
- Bakım maliyetinin az olması,
- Zorlu ortam koşullarında çalıştırılabilir olmasıdır.

Artı tipli karma elektromıknatıslı (elektromıknatıs ve kalıcı mıknatıs) manyetik havada askılama sistemleri askılama için yardımcı mekanik temaslı elemanlara ihtiyaç duymadan kendi başına havada askılama yapabilmektedir. Karma elektromıknatıs yapısı manyetik taşıma sistemlerinin en önemli bileşenlerindendir. Bu taşıma sistemlerinin havada askılama güçleri sıfır güç kontrol algoritmasıyla teorik olarak sıfırdır. Taşıyıcı sisteme yükleme ve boşaltma durumlarında anlık olarak enerji harcamaktadır. Denge noktasında (kalıcı mıknatısların çekim kuvveti ile taşıyıcı ağırlığının eşit olduğu durumda) enerji ihtiyacı yaklaşık olarak sıfırdır. Bundan dolayı şebekeden bağımsız taşınabilir küçük güçlü güç kaynakları (piller) ile kolayca kontrol edilebilirler. Bu tez çalışmasında taşıyıcı sistemin havada askılama çalışmaları deneysel olarak yapılmıştır. Havada askılama ve yüklenme anlarındaki tepki hızlarını iyileştirmek için temel I-PD kontrolörlerin yanına ek kayan kipli kontrolörler tasarlanarak sistemin performansında iyileştirmeler yapılmıştır.

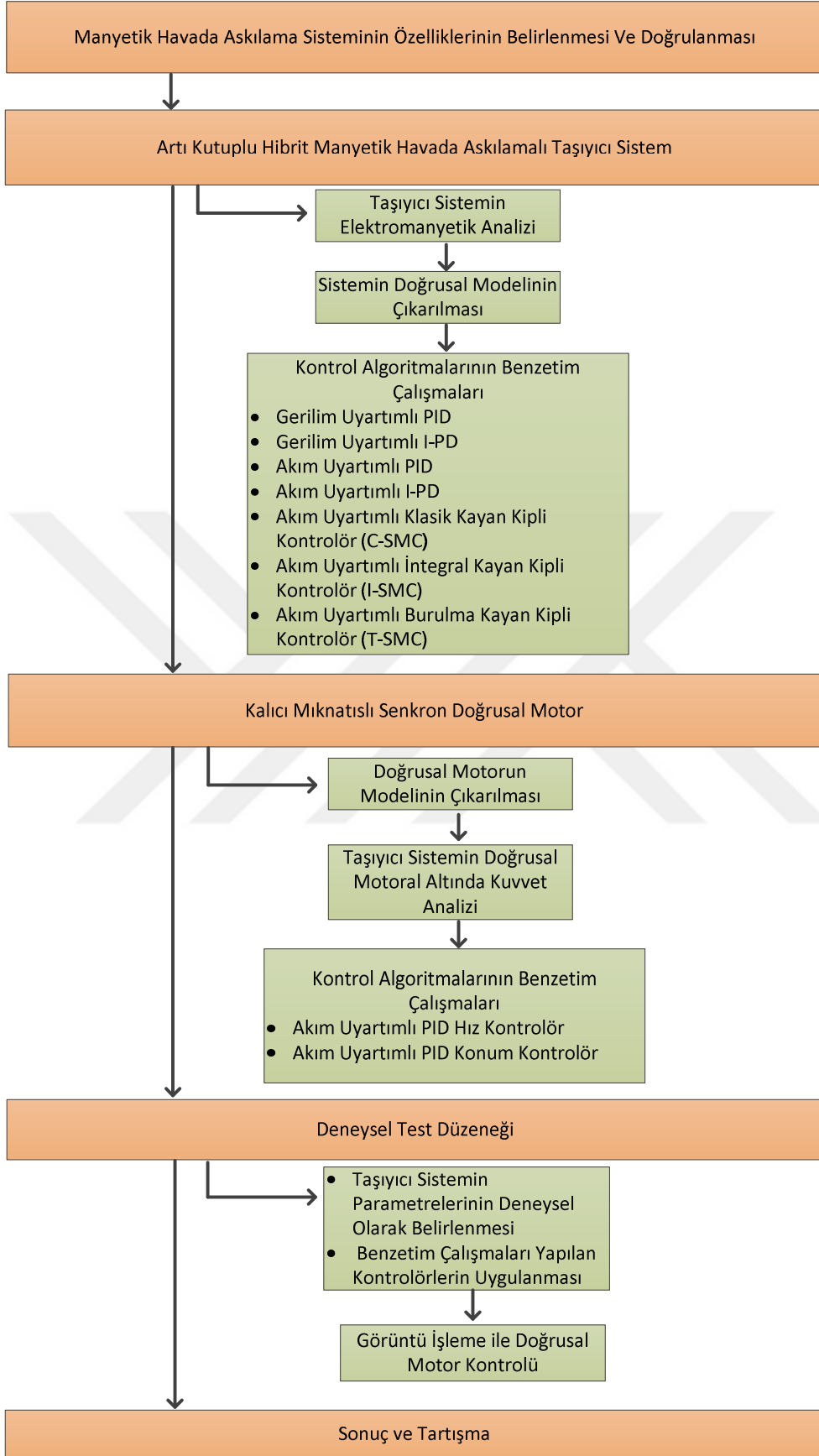
Taşıyıcı sistemin üzerinde bulunan kalıcı mıknatıslar doğrusal motorun senkron olarak çalışmasını sağlamaktadır, böylelikle kalıcı mıknatıslar hem havada askılama sisteminde hem de itki sisteminde kullanılmıştır. Bu taşıyıcı sistemin doğrusal motor altında sürülmesi literatürde kalıcı (sabit) mıknatıslı doğrusal senkron motor olarak ifade edilmektedir. Motor fazlarının ayrı olarak sürülmesi ile birden çok taşıyıcının birlikte çalışması mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında tek bir taşıyıcı sistem kullanılmıştır, gelecek çalışmalara temel olacaktır.

Taşıyıcı sistemler taşınacak olan malzemelerin bir yerden başka bir yere götürülmesi için kullanılmaktadır. Taşıyıcı sistemin gideceği konumlar için taşıyıcı sistemin o anki konumunun bilinmesi gerekmektedir. Mesafe sensörü ya da kamera ile konum tespitleri yapılarak hassas konum kontrolü yapılabilir. Bu tez kapsamında kamera kullanılarak konum ve hız kontrolleri deneysel olarak yapılmış ve ileriki sürü algoritma çalışmalarına temel oluşturmaktadır.

Esnek manyetik havada askılama taşıma sisteminde; doğrusal motor hareket düzleminde, artı tipli karma manyetik havada askılama sistemi kullanılarak temassız bir şekilde havada tutma işlemi ve kamera ile taşıyıcı sistemin konum ve hız kontrolleri yapılmıştır.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK-1001 (MAG-112M210) proje kapsamında yapılan araştırma çalışmalarından oluşturulmuştur.

Tezde kullanılacak olan yöntemler ve işlem basamakları aşağıdaki akış diyagramında verilmiştir.



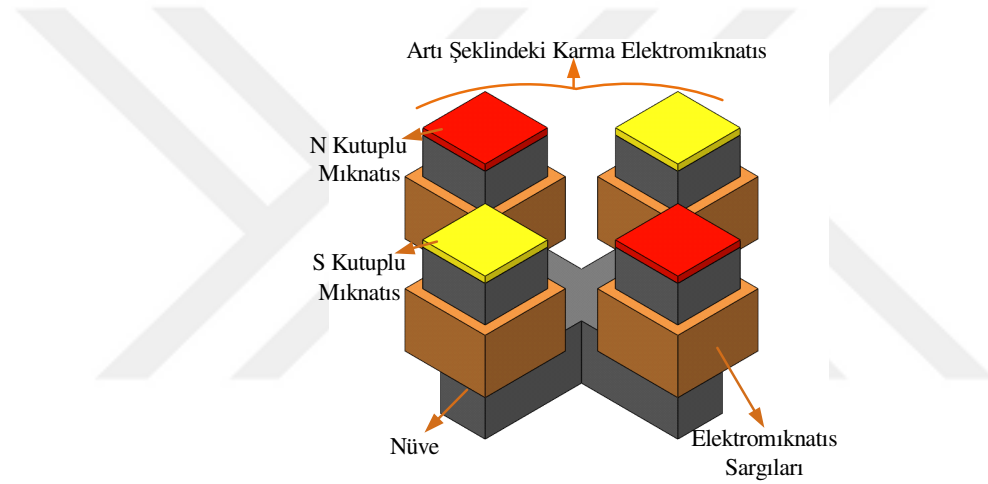
1.3 Hipotez

Taşıyıcı sistem olarak kalıcı mıknatıslar ve elektromıknatıslar kullanılarak artı tipli karma manyetik havada askılama taşıyıcı sistemi kullanılabilir. Kayan kipli kontrolcüler kullanarak referans takip ya da bozucu girişe karşı sistem tepki süresi kısaltılabilir. Doğrusal senkron motorlar aktif ray olarak kullanılarak taşıyıcı sisteme hareket kabiliyeti sağlayabilir. Kamera verisi konum bilgisi olarak kullanılabilir, taşıyıcı sistemin doğrusal motor altında konumu belirlenebilir ve istenilen konuma hareket ettirilebilir.



Bu bölümde artı tipli karma elektromıknatısın manyetik analizleri, modellenmesi ve farklı kontrolcüler tasarlanarak benzetim çalışmaları anlatılmış ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

2.1 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Manyetik Analizi ve Analitik Hesabı

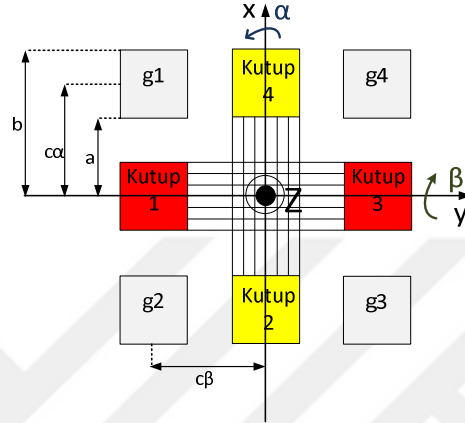


Şekil 2.1 Artı Kutuplu Karma Elektromıknatıs

Şekil 2.1’de artı kutuplu karma elektromıknatısın kutup başları ve nüve sargıları gösterilmiştir. 4 adet mıknatıs polaritesi karşılıklı aynı olacak şekilde silisli saçlarından oluşturulan nüvenin kutup başlarına yerleştirilmiştir. Kalıcı mıknatısların altına nüve bobin sargıları eklenerek karma elektromıknatıs yapısı oluşturulmuştur. Konveksiyonel 4 kutuplu maglev taşıyıcı nüveleri dört adet parçadan oluşturulurken, artı tipli 4 kutuplu ise iki adet U-tipin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu da birleşme noktalarındaki kaçak akıları azaltmaktadır.

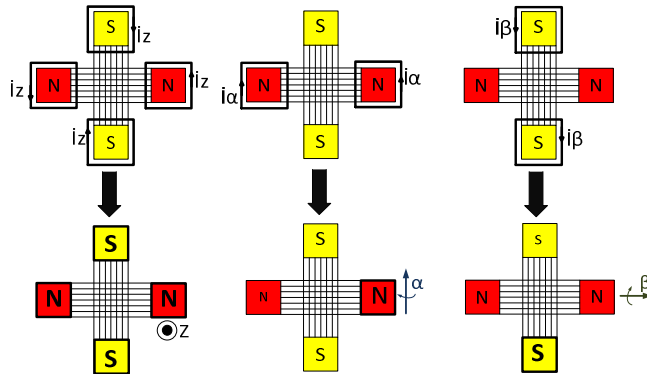
Artı kutuplu taşıyıcı sistemin 4 kuvvet noktası bulunmaktadır. Bu kuvvet noktalarında oluşan kuvvetler birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilirler. Her bir kutup başının hava aralığı ayrı kontrol edilen yapıya ayırık kontrol,

geometrik dönüşümler kullanılarak eksen dönüşümü ile kontrol edilen yapıya ise merkezi kontrol denilmektedir. Artı kutuplu manyetik yastık, hareket serbestliği bakımından 3 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar; doğrusal hareket olan z eksenini, x-ekseni etrafında α eğimi ve y eksenini etrafındaki β eğimi dönel hareketleridir. Şekil 2.2’de hareket eksenleri gösterilmiştir. g_x her kutup başının hava aralığı değerleridir.



Şekil 2.2 Artı Kutuplu Manyetik Yastık Hareket Eksenleri

Her bir ekseninde hareket kontrolünü sağlayacak olan akımlar merkezi eksen akımlarına çevrilir ve kontrol işlemi benimsenecek metoda bağlı olarak ayrı ayrı tanımlanır. i_z merkezi akımı kutup başlarını kuvvetlendirecek yönde, i_α ve i_β merkezi akımları dönme eksenini yönündeki kutupları kuvvetlendirecek yönde belirlenmiştir. Şekil 2.3’te büyük punto ve kalınlaştırılmış çizgilerle gösterilen kutup başlarında oluşan kuvvetleri merkezi akımlarla kuvvetlendirilmiş, küçük punto ile gösterilenler de azaltılmış kutup başlarını gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Kontrol Metotları

Şekil 2.3'te gösterilen merkezi dönüşüm akımları ile gerçek sargı akımları arasındaki ilişki;

$$\begin{aligned}
 i_z &= \frac{1}{4}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) \\
 i_\alpha &= \frac{1}{4}(-i_1 + i_3) \\
 i_\beta &= \frac{1}{4}(i_2 - i_4)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_z \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}$$

şekline ifade edilir. Uyartım gerilimleri, akımlara benzer şekilde yazılabilmektedir;

$$\begin{aligned}
 e_z &= \frac{1}{4}(e_1 + e_2 + e_3 + e_4) \\
 e_\alpha &= \frac{1}{4}(-e_1 + e_3) \\
 e_\beta &= \frac{1}{4}(e_2 - e_4)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

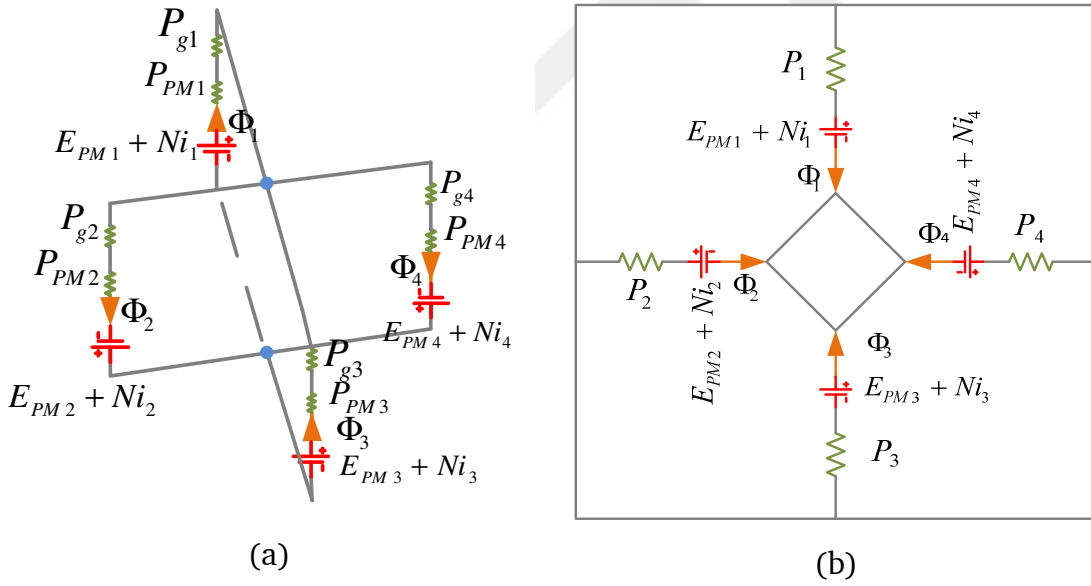
$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix}}_T \begin{pmatrix} e_z \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix}$$

Tüm kutup başları dikkate alındığında yer değiştirmeler ise aşağıdaki dönüşüme tabi tutulur.

$$\begin{aligned}
z &= \frac{1}{4}(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) \\
\alpha &= -\frac{1}{4c_\alpha}(g_1 - g_2 - g_3 + g_4) \\
\beta &= \frac{1}{4c_\beta}(-g_1 - g_2 + g_3 + g_4)
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -1 & c_\alpha & -c_\beta \\ -1 & -c_\alpha & -c_\beta \\ -1 & -c_\alpha & c_\beta \\ -1 & c_\alpha & c_\beta \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Manyetik yastıklama için çekme kuvvetleri ve moment değerlerinin bulunabilmesi için artı kutuplu elektromıknatısın manyetik eş değer devresinin çözülmesi gerekmektedir. Artı kutuplu elektromıknatısın manyetik eş devresi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Eş Devresi (a) İndirgenmiş Eş Devresi (b)

Şekil 2.4'te ifade edilen P manyetik geçirgenlikleri, E_{pm} sabit mıknatısların AT değerini, N sargı sayım sayısını, i ilgili uyartım akımlarını ve $\square$ kutup akılarını ifade etmektedir. Sabit mıknatıs laminasyonuna ait manyetik geçirgenlik 2.4.

denklemden verilmiştir. S kutup yüzey alanı, l_{pm} mıknatısın kalınlığını ve μ_0 manyetik geçirgenlik sabitini ifade etmektedir.

$$P_{PM} = \frac{\mu_0 S}{l_{PM}} \quad (2.4)$$

Şekil 2.2 referans alınarak her bir kutup için iki katlı integral hesabı yapılarak P_{g1} hava aralıklarına ilişkin manyetik geçirgenlik bulunabilir. Matlab *integral2()* komutu kullanılarak çift katlı integral çözülebilir.

$$\begin{aligned} P_{g1} &= \int_a^b \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy \\ P_{g2} &= \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \int_{-b}^{-a} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy \\ P_{g3} &= \int_{-b}^{-a} \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy \\ P_{g4} &= \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \int_a^b \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy \end{aligned} \quad (2.5)$$

İntegrallerin analitik sonuçlarının bulunması zordur ve uzun sürmektedir. Nümerik olarak hesaplanması ise daha kolaydır. Bu yüzden artı kutuplu manyetik yastığın modellenmesinde nümerik hesaplar kullanılmaktadır. P_i her bir kutup başında oluşan toplam manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

$$P_i = \frac{P_{PM} P_{gi}}{P_{PM} + P_{gi} \quad (i=1,2,3,4)} \quad (2.6)$$

Kalıcı mıknatısa ilişkin manyeto motor kuvveti ise;

$$E_{PM} = H_c l_{pm} \quad (2.7)$$

ifade edilir. Artı kutuplu manyetik yastıkta depolanan enerji miktarı ise;

$$W^* = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} (E_{PM} + N i_n)^2 P_n \quad (2.8)$$

hesaplanmaktadır. Çekme kuvveti ve her eksenlerde endüklenen elektromanyetik moment değerleri virtüel yerdeğiştirme prensibine göre hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned}
f_z(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) &= \frac{\partial W^*}{\partial z} \Big|_{i = const} \\
T_\alpha(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) &= \frac{\partial W^*}{\partial \alpha} \Big|_{i = const} \\
T_\beta(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) &= \frac{\partial W^*}{\partial \beta} \Big|_{i = const}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

2.9. denklemde kuvvet hesaplarının çözümünün zorluğu görülmektedir. Bu yüzden alternatif olarak buradaki modelleme yerine her bir kutup başında endüklenen çekme kuvveti hesabı temel alan yaklaşım kullanılacaktır. Böylelikle türev alma işlemlerine gerek kalmadan kolayca bulunmuş olunacaktır. Buna göre f_z manyetik çekme kuvveti;

$$f_z(z(t), i_z(t)) = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \cdot 4 = \frac{2\mu_0 S (E_{pm} + N i_z(t))^2}{(z(t) + l_{PM})^2} \tag{2.10}$$

ile ifade edilebilir. Manyetik akıların yüzey alanı üzerinden dağılmaksızın aktığı kabul edilerek, manyetik akı yoğunluğu (B) kolay bir şekilde hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
i &= 1, 2, 3, 4 \\
f_i &= \frac{B_i^2 S}{2\mu_0} \\
B_i &= \frac{\Phi_i}{S} \\
\Phi_i &= \sum_{n=1}^4 \Phi_{in}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Φ_{in} , i. kutuptan n.sargı bobininin oluşturduğu manyetik akı miktarıdır. Sonuç olarak çekme kuvveti ve momenti;

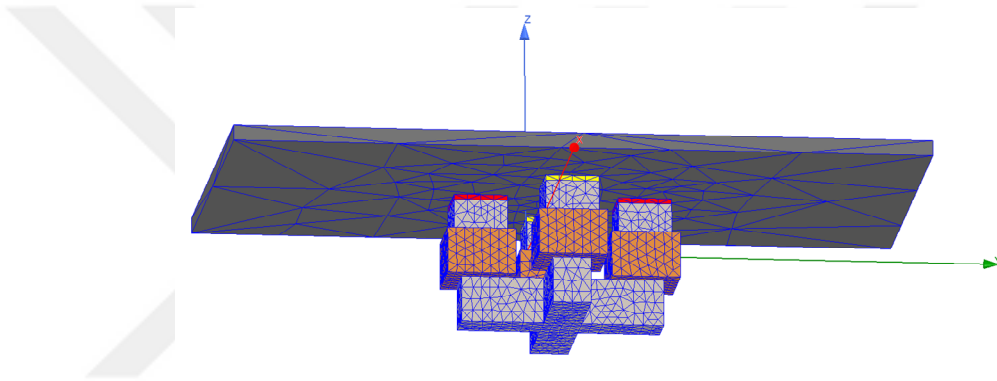
$$\begin{aligned}
f_z &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\
T_\alpha &= (f_1 - f_3) \left(\frac{b-a}{2} + a \right) \\
T_\beta &= (-f_2 + f_4) \left(\frac{b-a}{2} + a \right)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

hesaplanır.

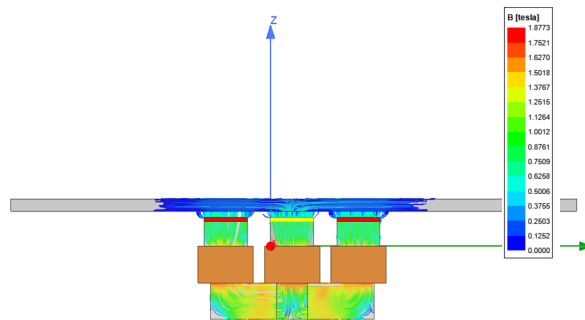
Tablo 2.1 Model Parametreleri

a (mm)	36,5	b (mm)	71,5	L_{pm} (mm)	3,5	N (turn)	200
q (mm)	10	z (mm)	5	H_c (kA/m)	939	i (A)	5

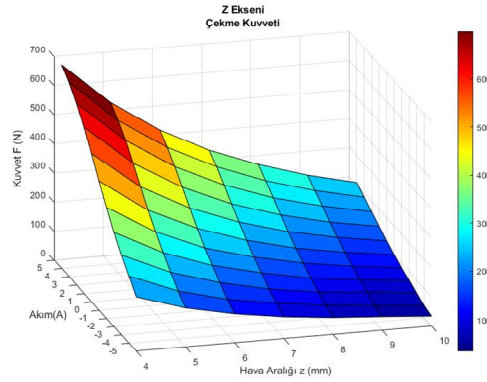
Tablo 2.1’de artı kutuplu elektromıknatısın model parametreleri verilmiştir. Şekil 2.2’de gösterilmiş olan uzaklıklar a ve b ’yi, mıknatıs kalınlığı L_{pm} ’yi, q plaka kalınlığını, z ; z eksenindeki hava aralığını, N ; bobin sarım sayısını, i ; bobinlerden geçen uyartım akımı değerini ifade etmektedir.

**Şekil 2.5** Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Analiz Modeli

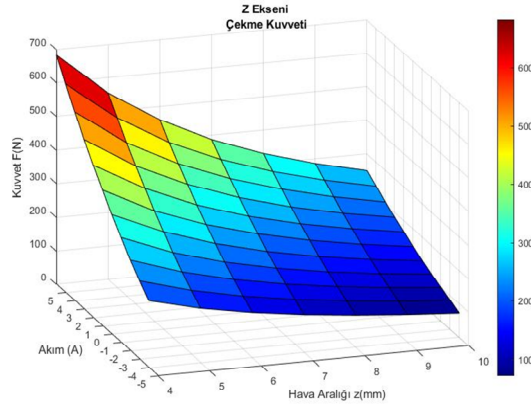
Şekil 2.5’ te Maxwell programının manyeto-statik analizi için yapılan artı tipli karma elektromıknatısın 3 boyutlu adaptif ağ yapısı (mesh) gösterilmiştir. Analizin doğru olabilmesi için artı tipli taşıyıcının manyetik akı geçişinin olduğu bölgelerde ağ sıklığının arttığı görülmektedir. Şekil 2.6’da artı kutuplu manyetik yastığın Maxwell akı yoğunluğu verilmiştir.



Şekil 2.6 Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Akı Yoğunluğu

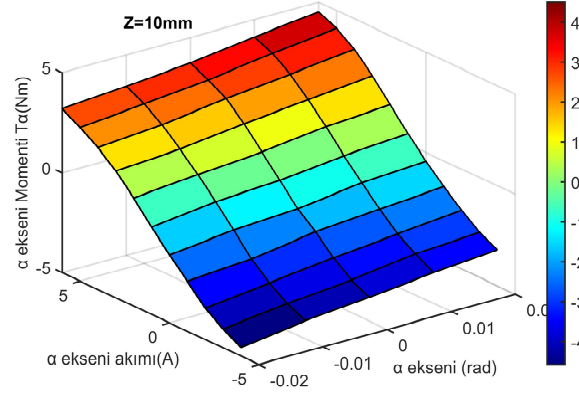


Şekil 2.7 Z Eksen Çekme Kuvvetinin (F_z) Sonlu Elemanlar Analizi

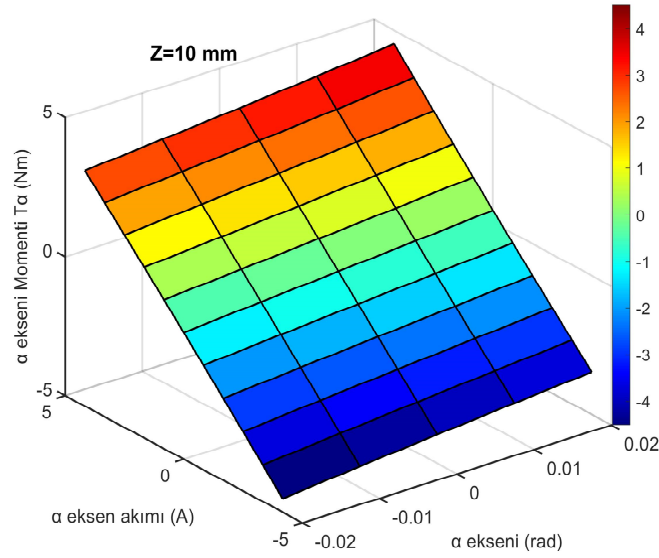


Şekil 2.8 Z Eksen Çekme Kuvvetinin (F_z) Analitik Hesaplanması

Şekil 2.8’de 2.12. denklem ile Z eksenindeki çekme kuvvetinin (F_z) hava aralığına ve z eksen akımına (i_z) bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 2.7’de ise sonlu elemanlar analizi ile elde edilen F_z kuvveti verilmektedir. F_z için sonuçlara bakıldığında analitik model sonuçlarıyla sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonuçlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Tasarlanan modelin z eksenindeki çekim kuvveti açısından doğru olarak kabul edilir.



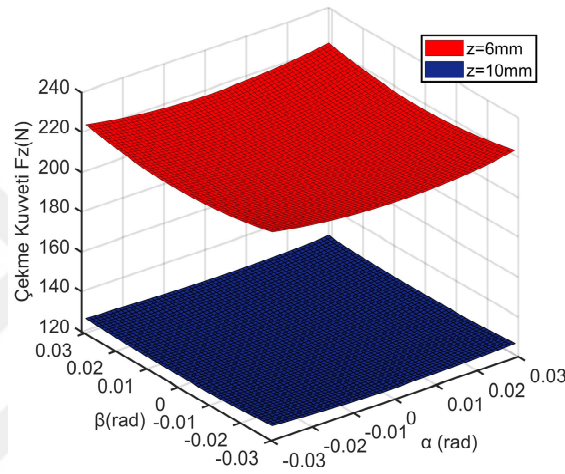
Şekil 2.9 Moment Değişimi Sonlu Elemanlar Analizi



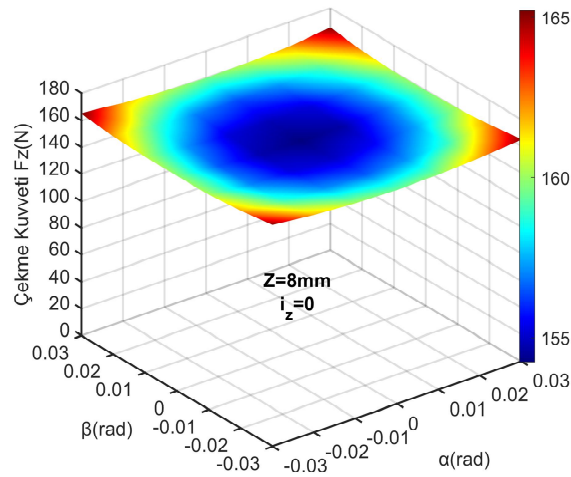
Şekil 2.10 Moment Değişimi Analitik Hesaplanması

Şekil 2.10'da 2.13. denklem ile açılal yer değiştirme momenti α eksenindeki dönme ve α akımına bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 2.9'da ise sonlu elemanlar analizi ile elde edilen T_α momenti verilmektedir. Artı kutuplu elektromıknatıs yapısı gereği simetriktir. Bu yüzden β eksenindeki dönme momentide α eksenindeki dönme momentiyile aynı olacağı için verilmemiştir. Moment için sonuçlara bakıldığında analitik model sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonuçlarıyla yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Tasarlanan model dönme eksenlerindeki moment değerleri açısından teyit edilmiştir.

Merkezi tip modellemede ayrıştırılan eksenlerin birbirlerine etkisini gözlemlemek için sabit i_z akımı, farklı z eksenli hava aralığı değerlerinde α ve β eksenlerinde açısal deplasmanlar değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiş ve F_z çekme kuvvetinde kuplaj etkisi gözlemlenmiştir. Analitik model ile karşılaştırmak için denklem 2.12 kullanılmıştır. Şekil 2.11’de $i_z=0$ için ve hava aralığının 10 mm ve 6 mm arasındaki değerler incelendiğinde, hava aralığının daha düşük olduğu yerlerde (6 mm) kuplaj etkisini gösterirken daha yüksek olan (10 mm) yerde kuplaj etkisi azalmaktadır.

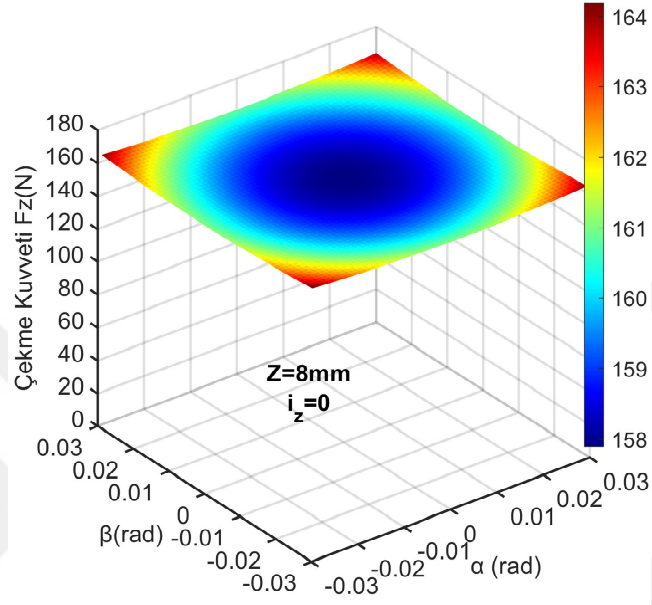


Şekil 2.11 α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı Olarak Farklı z Değerleri



Şekil 2.12 $z = 8$ mm ve $i_z = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z ’nin Sonlu Elemanlar Analizi

Şekil 2.12’de görüldüğü üzere dönme açısı arttıkça oluşan kuvvet artmaktadır. Bu kuvvetlerin maksimum ve minimum değerler arasındaki fark incelendiğinde %6 lik bir farkın olduğu görülmektedir. Dönmeden dolayı değişen hava aralığının 8 mm’den küçük hava aralığında artarken daha düşük hava aralığı değerlerinde azalma göstermektedir.



Şekil 2.13 $z = 8 \text{ mm}$ ve $i_z = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z ’nin Analitik Hesaplanması

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13 karşılıklı incelendiğinde, F_z için analitik model ile sonlu elemanlar metoduyla yapılan analiz sonuçlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş olan bu modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Yüksek hava aralığı değerlerinde kuplaj etkisinin azalması sebebiyle ayrıştırılmış eksen takımlarının kontrolünde kuplaj etkisinin ihmal edilebileceğini öngörülmektedir. DeneySEL çalışmalar bu kabulün doğruluğunu ispatlamaktadır.

2.2 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Havada Askılama Modeli

Artı tipli karma elektromıknatıs yapısı gereği karasızdır. Bu sebeple kapalı çevrim aktif kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesi gerekmektedir. Sistem modeli ön görülen çalışma aralığında doğrusallaştırarak kontrolörler tasarlanmıştır.

Ferromanyetik gövde direnci, manyetik doyum, histerezis fuko kayıpları ve akı kaçakları modellemeye ihmal edilmiştir.

Doğrusallaştırmanın yapıldığı çalışma noktası, dönme eksenlerinin olmadığı noktadır. Bu noktada;

$$\begin{aligned}(z, \alpha, \beta) &= (z_0, 0, 0) \\ (i_z, i_\alpha, i_\beta) &= (i_{z_0}, 0, 0)\end{aligned}\quad (2.13)$$

olmalıdır. Doğrusallaştırma noktasındaki Z eksen yönündeki hareket dinamiği;

$$m\Delta\ddot{z}(t) = f_z(z(t), i_z(t)) - mg - F_d(t) \quad (2.14)$$

Çekim kuvveti olarak ifade ettiğimiz f_z ise denklem 2.10'daki gibi ifade edilir. Elektromıknatısın havada askılama sistemi için doğrusal modeli, 2.13. denklemdeki gibi seçilerek elektromanyetik çekim kuvvetinin doğrusallaştırılması ile bulunur. Sistemin doğrusallaştırılmış modeli etrafındaki küçük oynamalar;

$$\begin{aligned}f_z(z(t), i_z(t)) &= f(z_0 - \Delta z(t), i_{z_0} + \Delta i_z(t)) \\ &= f_z(z_0, i_{z_0}) + K_A \Delta z(t) + K_B \Delta i_z(t)\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$K_A = -\left.\frac{\partial f_z}{\partial z}\right|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{4\mu_0 S (E_{PM} + Ni_{z_0})^2}{(z_0 + l_{PM})^3} \quad (2.16)$$

$$K_B = \left.\frac{\partial f_z}{\partial i_z}\right|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{4\mu_0 SN (E_{PM} + Ni_{z_0})}{(z_0 + l_{PM})^2} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 2.14 tekrar düzenlenecek olursa;

$$m\Delta\ddot{z}(t) = K_A \Delta z(t) + K_B \Delta i_z(t) - F_d(t) \quad (2.18)$$

elde edilir. m ; kütle (kg), F_d ; bozucu giriş kuvveti (N) olarak ifade edilir. Denklem 2.18'in hava aralığına göre laplace dönüşümü yapılacak olursa,

$$Z(s) = \frac{K_B}{ms^2 - K_A} I_z(s) - \frac{1}{ms^2 - K_A} F_d(s) \quad (2.10)$$

elde edilir. Açısal yer değiştirme eksen dinamikleri;

$$J_\alpha \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = T_\alpha(\theta(t), i_\alpha(t)) \quad (2.11)$$

$$T_\alpha(\theta(t), i_\alpha(t)) \cong T_\alpha(z_0, \theta(t), 0, i_{z_0}, i_\alpha(t), 0) \cong K_C \Delta\theta(t) - K_D \Delta i_\alpha(t)$$

$$K_C = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\partial T_\alpha(\theta, 0)}{\partial \theta}$$

$$K_D = \lim_{i_\alpha \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial i_\alpha} \left\{ \lim_{\theta \rightarrow 0} T_\alpha(\theta, i_\alpha) \right\} \quad (2.12)$$

ile ifade edilir. Artı kutuplu maglev taşıyıcı simetrik bir yapıya sahip olduğundan β eksen dinamiği α eksen dinamiği ile aynı özellikleri göstermektedir. Bu sebeple β eksen dinamik denklemleri tekrar eklenmemiştir.

Denklem 2.10'da kontrol sinyali akım kaynağı formunda verilmiştir. Manyetik havada askılamada kullanılan bobinler akım kaynağı yerine gerilim kaynağı kullanılarak enerjilendirilebilir. Bu açıdan, dinamik denklemler tekrar ifade edilirse;

$$e(t) = R_z i_z(t) + N \frac{d}{dt} \Phi = R_z i_z(t) + \mu_0 N S \frac{d}{dt} \frac{N i_z(t) + E_{PM}}{z(t) + l_{PM}} \quad (2.13)$$

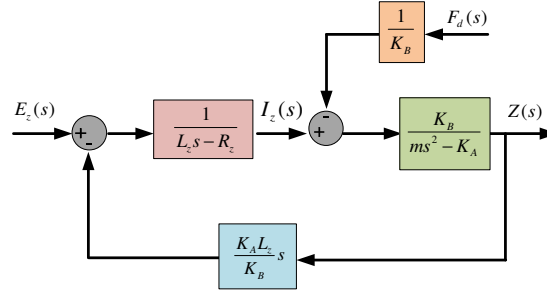
elde edilir ve bu denklem doğrusallaştırılırsa;

$$\Delta e_z(t) = R_z \Delta i_z(t) + L_z \Delta \dot{i}_z(t) + \frac{K_A L_z}{K_B} \Delta \dot{z}(t) \quad (2.14)$$

şeklinde elde edilir. Denklemin hava aralığına göre laplace dönüşümü alındığında;

$$I_z(s) = \frac{1}{L_z s - R_z} \left[E_z(s) - \frac{K_A L_z}{K_B} s Z(s) \right] \quad (2.15)$$

bulunur. Z eksen için doğrusallaştırılmış sistem dinamiği blok diyagramlarıyla Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 2.14 Z-Eksenli Doğrusallaştırılmış Sistem Dinamiği

$\Delta z(t)$, $\Delta \dot{z}(t)$ ve $\Delta i_z(t)$ durum değişkenleri olarak ele alındığında Şekil 14'deki doğrusal model durum uzayında;

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_A}{m} & 0 & \frac{K_B}{m} \\ 0 & -\frac{K_A}{K_B} & -\frac{R_z}{L_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ L_z \end{pmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{pmatrix} F_d(t) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Açısal yer değiştirmeler dikkate alındığında (α, β) dinamikleri de z eksenli denklemlerindekiler gibi hesaplanmaktadır. Tablo 2.2'de artı kutuplu elektromıknatısın model parametreleri çıkarılmıştır.

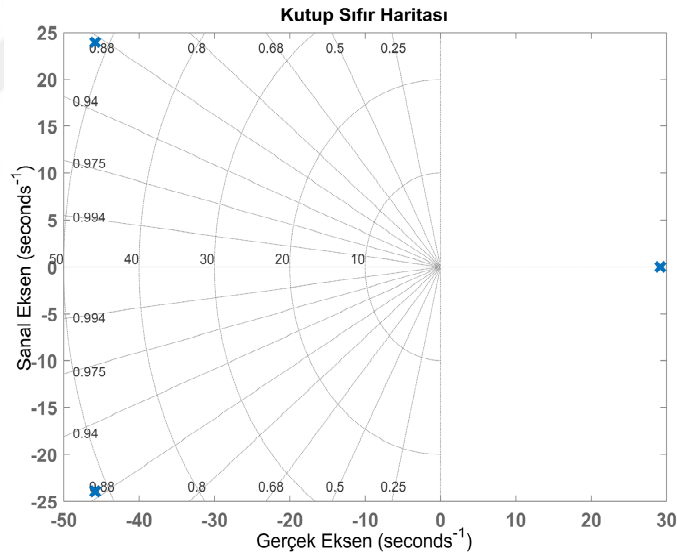
Tablo 2.2 Artı Kutuplu Elektromıknatıs Model Parametreleri

Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer
m	10.00	z_0	19.30	α_0, β_0	0.00
[kg]		[mm]		[rad]	
$J_{\alpha, \beta}$	0.30	i_{z0}	0.00	$i_{\alpha 0}, i_{\beta 0}$	0.00
[kg.m ²]		[A]		[A]	
S	$12 \cdot 10^{-4}$	K_A	12473	K_C	79.28
[A ²]		[N/m]		[Nm/rd]	
β	19.85	K_B	9.88	K_D	2.38
[AT/N]		[N/A]		[Nm/A]	
R_z, α, β [Ω]	1.00	$L_{z, \alpha, \beta}$	0.016	E_{pm}	3970
		[H]		[AT]	

Artı kutuplu karma elektromıknatısın havada askılanmasının kontrolünde 4 adet kontrol girişi vardır. Bu kontrol girişleri merkezi kontrol eksen dönüşümleri yapılarak 3 eksen (z ve α , β eksen) modellenenabilir. Z eksen modeli α , β eksen modellerinin benzeridir ve farklılık sadece ilgili parametrelerde ortaya çıkmaktadır.

Dikey yönlü (z) sistemin açık çevrim kutupları incelendiğinde (Şekil 2.15) kompleks düzlemin sağ yarı düzleminde kökünün olduğu görülmektedir. Bu da sistemi kararsızlığını göstermektedir. Kökün sol yarı düzleme ötelenmesi için kök ataması ile kontrolörün tasarlanması gerekmektedir.

$$Z(s) = \frac{K_B}{(R_z + L_z s)(m_z^2 - K_A) + K_A L_z s} E(s) - \frac{R_z + L_z s}{(R_z + L_z s)(m_z^2 - K_A) + K_A L_z s} F_d(s) \quad (2.17)$$

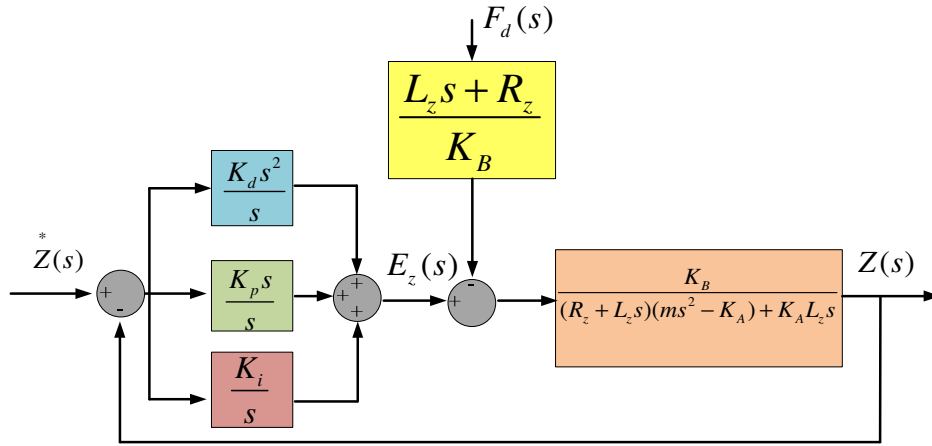


Şekil 2.15 Model Kutupları

2.2.1 Gerilim Uyarımlı PID Kontrolör Tasarımı

PID kontrolörler literatürde en fazla kullanılan kontrolörlerdir. PID kontrolörlerin yapısı oldukça basittir, kontrolör parametre sayısının az olması ve fiziksel gerçekleştirilmenin kolay yapılması sayesinde birçok alanda kullanılmaktadırlar. Artı

kutuplu karma elektromıknatısın z eksen kontrolörünün PID yapısı Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Sistemin Z Eksen PID Kontrolörünün Yapısı

Blok diyagramın transfer fonksiyonu;

$$\frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{Z(s)}{Z^*(s)} = \frac{K_B(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{K_B(K_d s^2 + K_p s + K_i) + s[R_z + L_z s(ms^2 - K_A) + K_A L_z s]} \quad (2.18)$$

şeklinde. Kapalı çevrim transfer fonksiyonunda kontrolör kat sayılarının hesaplanması için kanonik polinom yaklaşımı kullanılmıştır [26]. Bu yaklaşım eş değer zaman sabiti ve kararlılık indisleri kullanılarak, uygun kararlı bir karakteristik polinom çıkartılmasını ve kontrolör parametrelerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Sistem için karakteristik denklem;

$$\begin{aligned} P(s) &= K_B(K_d s^2 + K_p s + K_i) + s[R_z + L_z s(ms^2 - K_A) + K_A L_z s] \\ &= L_z m s^4 + R_z m s^3 + K_B K_d s^2 + (K_B K_p - R_z K_A) s + K_i K_B \\ &= a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

γ kararlılık indisleri ve τ eşdeğer zaman sabiti;

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}}$$

$$i = (1, 2, 3, \dots)$$
(2.20)

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}$$

ile bulunur. Kararlılık indisleri parametre değişimlerinde çıkış dalga şeklinin daha kararlı ve kontrolün gürbüz olmasını, eş değer zaman sabiti ise sistem cevap hızına etki eder. Karakteristik denlemlerin katsayıları;

$$a_0 = K_i K_B = \frac{a_1^2}{a_2 \gamma_1} = \frac{\left(\frac{R_z^3 m}{L_z^2 \gamma_3^2 \gamma_2} \right)^2}{\frac{R_z^2 m}{L_z \gamma_3} \gamma_1} = \frac{R_z^4 m}{L_z^3 \gamma_3^3 \gamma_2^2 \gamma_1}$$

$$a_1 = (K_B K_P - R_z K_A) = \frac{a_2^2}{a_3 \gamma_2} = \frac{R_z^3 m}{L_z^2 \gamma_3^2 \gamma_2}$$

$$a_2 = K_B K_d = \frac{a_3^2}{a_4 \gamma_3} = \frac{(R_z m)^2}{L_z m \gamma_3} = \frac{R_z^2 m}{L_z \gamma_3}$$
(2.21)

şeklinde elde edilmektedir. Denklem 2.21 temel alınarak kontrolör katsayıları;

$$K_P = \frac{L_z^2 \gamma_3^2 \gamma_2 R_z K_A + R_z^3 m}{L_z^2 \gamma_3^2 \gamma_2 K_B}$$

$$K_i = \frac{R_z^4 m}{L_z^3 \gamma_3^3 \gamma_2^2 \gamma_1 K_B}$$

$$K_d = \frac{R_z^2 m}{K_B L_z \gamma_3}$$
(2.22)

bulunur. Eş değer zaman sabiti (τ) ve kararlılık sınırları ise;

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = \gamma_3 \gamma_2 \gamma_1 \frac{L_z}{R_z}$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}$$

$$(\gamma_n = \gamma_0 = \infty)$$
(2.23)

3. ve 4. Dereceden polinomlar için Routh-Hurwitz kararlılık analizi ile

$$\gamma_i \gamma_i^* (i = 1 \approx n-1)$$
(2.24)

sonucuna varılır. 5 ve üstündeki derecelerde ise;

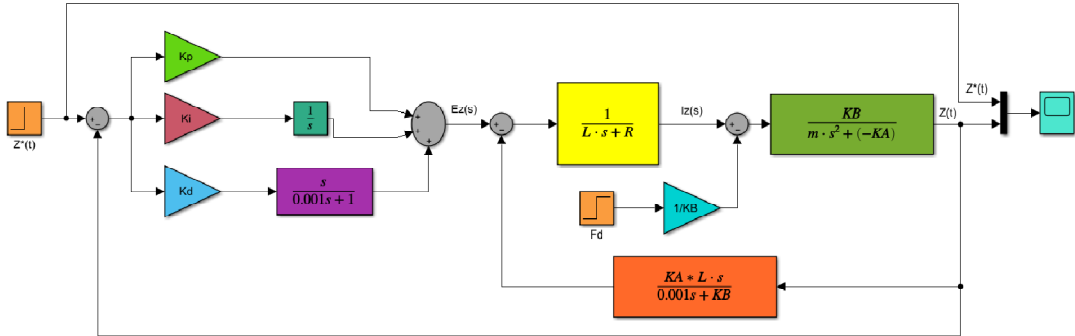
$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^* (i = 1 \approx n-1) \quad (2.25)$$

şartı ile kararlılık sağlanmıştır. Kessler ilk 1960'lı yıllarda γ değerlerinin 2 olması gerektiğini önermiştir. Manabe ise 1980'li yıllarda $\gamma_1 = 2.5$ ve diğerlerinin 2 olarak alınmasını önermiştir [27-28]. Tablo 2.3'de PID ve I-PD kontrolör katsayıları verilmiştir.

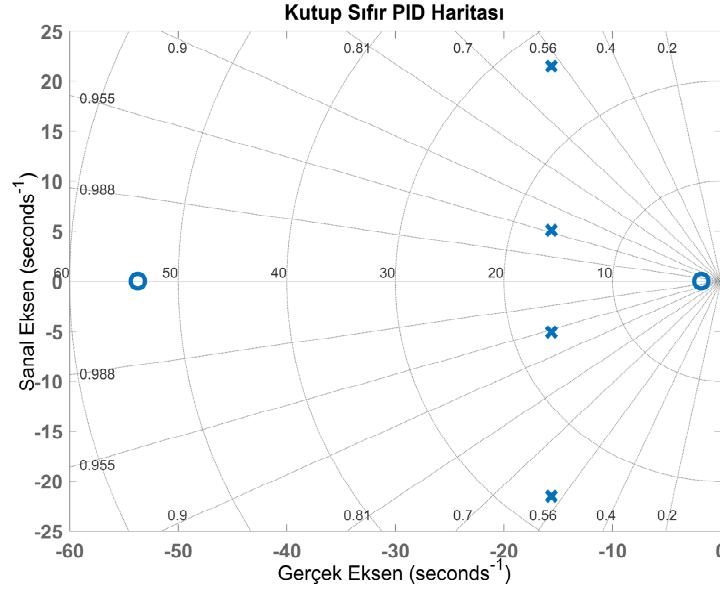
Tablo 2.3 PID ve I-PD Kontrolör Kat Sayıları

K_p	K_d	K_i
1756	32	3088

Şekil 2.17'de Matlab-Simulink modeli verilmiştir. Bu benzetimde girilen hava aralığı referans değerine karşı sistemin cevabı gözlemlenmiştir.

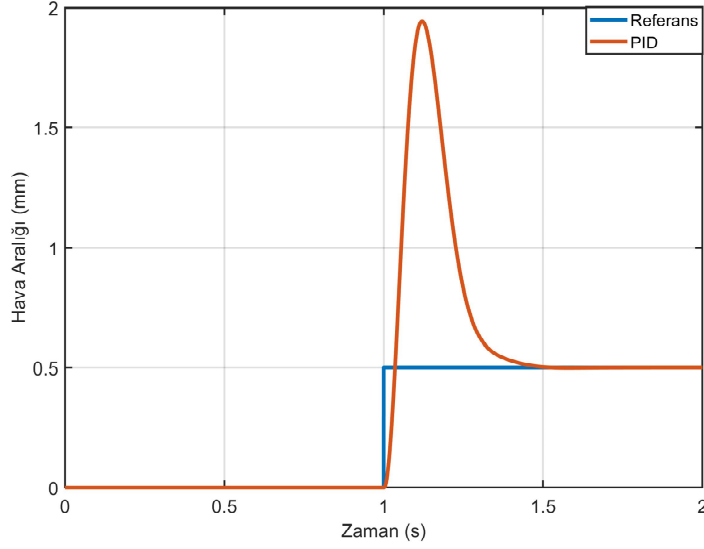


Şekil 2.17 PID Kontrolör Simulink Modeli



Şekil 2.18 PID Kontrolör Kutup Ataması

Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de verilmiş olan parametreler kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.18’deki kutup sıfır haritası incelendiğinde, sistemin iki tane sıfırının olduğu ve bir tanesinin orjine yakın bir noktada olduğu görülmektedir. Sistem kararlı olmasına rağmen hava aralığına referans sinyali verildiğinde geçici olarak cevapta bozulmaların olduğu görülmüştür. Şekil 2.19’a bakıldığında 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık PID kontrolörünün 1.5 milimetreyi geçerek üst aşım oluşturduğu görülmüştür. Gerçek sistemde bu üst aşımın sistemi kararsızlığa (mekanik kısıtlar ve doğrusal olmayana karakteristik) götürmesine neden olur. PID kontrolörün yerine I-PD kontrolör kullanılarak bu problem çözülebilir.



Şekil 2.19 Basamak Referans Girişi PID Kontrolör z Eksen Cevabı

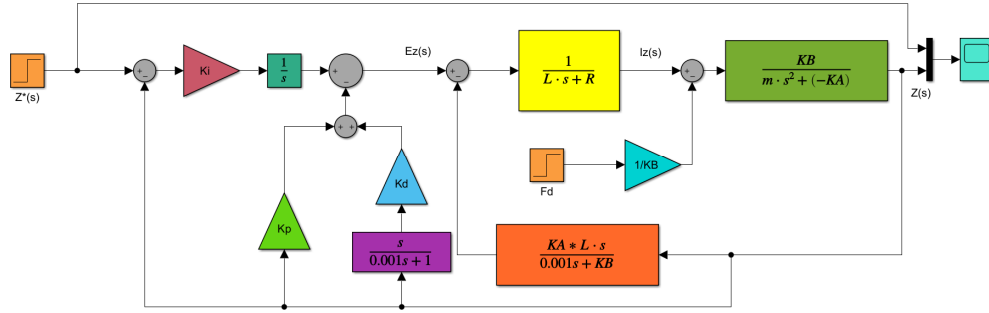
2.2.2 Gerilim I-PD Kontrolör Tasarımı

PID kontrolörde giriş olarak verilen basamak referans sinyalindeki değişiklikler oransal (P) ve türevsel (D) katsayılar neticesinde büyük giriş sinyalleri üretir. Büyük genlikli giriş sinyalleri sistemde üst aşımına sebep olurken kontrolörün doyuma gitmesine neden olabilir. I-PD kontrolöründe ilk olarak integral (I) bloğu kullanıldığı için hata sinyaline ilk etkiyi integral yapar. Böylelikle sisteme uygulanacak giriş sinyalini sınırlar. Oransal ve türevsel ifadeler kapalı çevrimden geri besleme olarak sisteme entegre edilmektedir [26].

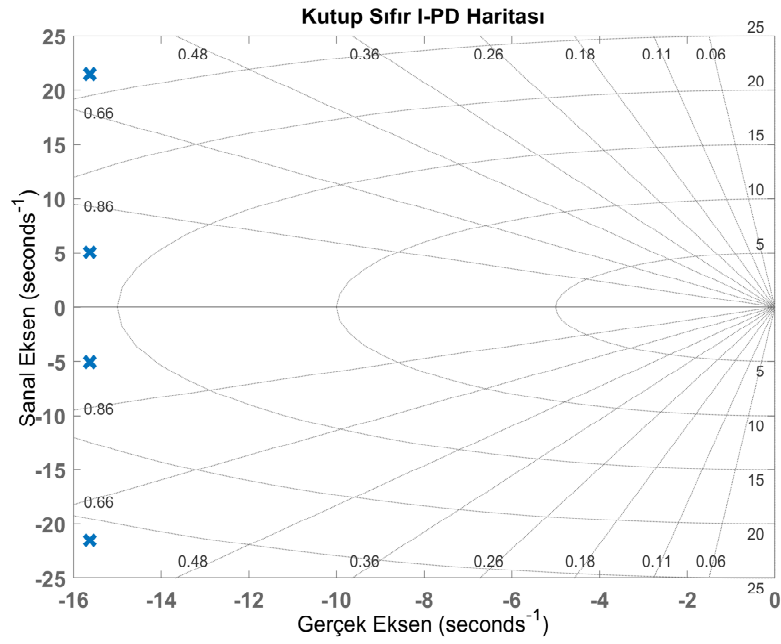
Blok diyagramın transfer fonksiyonu çıkarıldığında;

$$\frac{Z(s)}{Z^*(s)} = \frac{K_B K_i}{s^4(mL_z) + s^3(mR_z) + s^2(K_B K_d) + s(K_p K_B - K_A R_z) + K_B K_i} \quad (2.26)$$

ifade edilir.



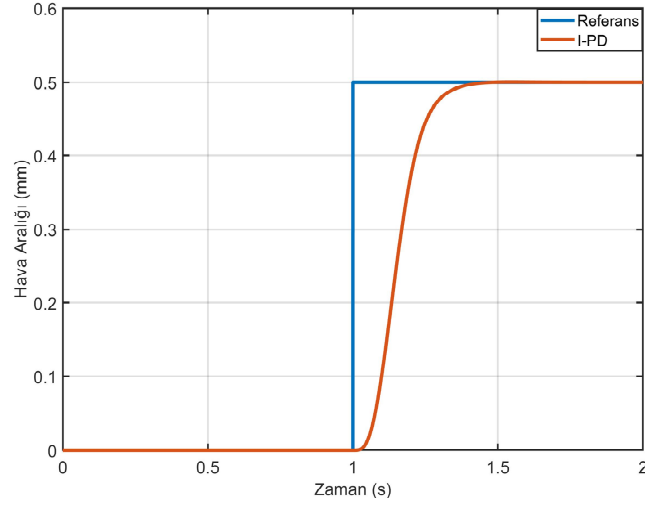
Şekil 2.20 I-PD Kontrolör Simulink Modeli



Şekil 2.21 I-PD Kontrolör Kutup Ataması

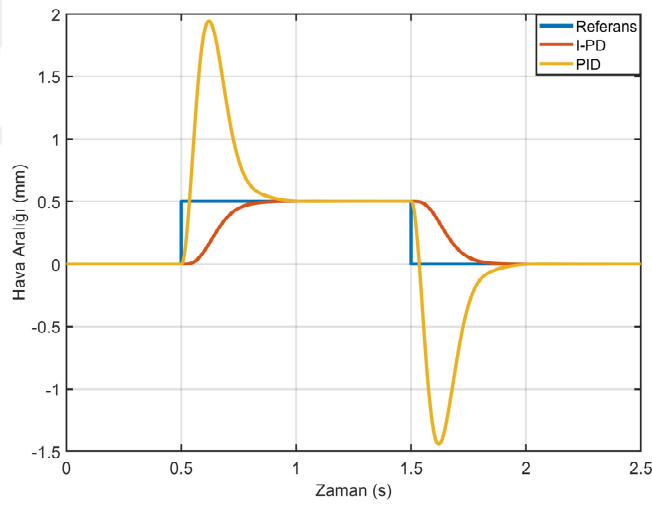
Şekil 2.20’de I-PD kontrolörün benzetim blok diyagramı verilmiştir. Bu benzetim çalışmasında referans hava aralığı değeri verilmiş ve I-PD kontrolörüyle sistemin bu hava aralığında kontrol edilmesi sağlanmıştır. Şekil 2.21’de kutup atamaları verilmiş ve sıfırların ortadan kalktığı görülmüştür.

PID’ de kullanılmış olan parametreler kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.22’de, 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık I-PD kontrolörünün üst aşım oluşturmada sistemi referans değere ulaştırdığı görülmektedir.



Şekil 2.22 Basamak Referans Girişi I-PD Kontrolör z Eksen Cevabı

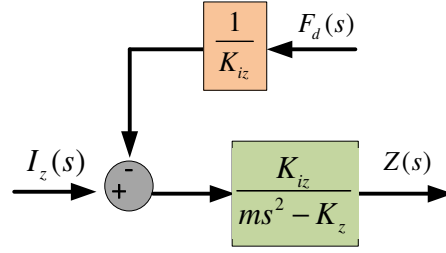
Şekil 2.23’de PID ile I-PD kontrolörlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Bu karşılaştırmaya bakıldığında PID kontrolörü yerine I-PD kontrolörünün kullanılması kontrol açısından daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 2.23 Basamak Referans Girişi I-PD Kontrolörü ile PID kontrolörünün z Eksen Cevabı Karşılaştırılması

2.2.3 Akım Uyarımlı PID Kontrolör Tasarımı

Artı tipli karma elektromıknatısın z ekseni akım uyarımlı kontrolünün modeli denklem 2.10’da verilmiştir. Z ekseni doğrusallaştırılmış sistem dinamiği Şekil 2.24’ te verilmiştir.

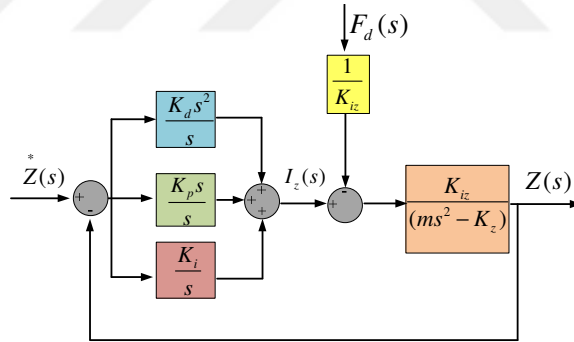


Şekil 2.24 Z Eksen Doğrusallaştırılmış Sistem Dinamiği

$\Delta z(t), \Delta \dot{z}(t)$ ve $\Delta i_z(t)$ durum değişkenleri olarak ele alındığında Şekil 2.24'deki doğrusal model durum uzayında;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_z}{m} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_{iz}}{m} \end{pmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{pmatrix} F_d(t) \\ q_z &= \begin{pmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{pmatrix} \quad A_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_z}{m} & 0 \end{pmatrix} \quad B_z = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_{iz}}{m} \end{pmatrix} \quad B_{z1} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{pmatrix} \\ \dot{q}_z &= A_z q_z + B_z \Delta i_z(t) + B_{z1} F_d(t) \end{aligned} \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilir. Artı tipli karma elektromıknatısın z eksen kontrolörünün PID yapısı Şekil 2.25'de verilmiştir.



Şekil 2.25 Sistemin z Eksen PID Kontrolörün Yapısı

Blok diyagramın transfer fonksiyonu çıkarıldığında ;

$$\begin{aligned} \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{Z(s)}{Z^*(s)} &= \\ \frac{K_{iz} (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{K_{iz} (K_d s^2 + K_p s + K_i) + s[ms^2 - K_z]} \end{aligned} \quad (2.28)$$

elde edilir. Kapalı çevrim transfer fonksiyonunda kontrolör kat sayılarının hesaplanması için kanonik polinom yaklaşımı kullanılmıştır. Sistem için karakteristik denklem;

$$\begin{aligned}
 P(s) &= K_B(K_d s^2 + K_p s + K_i) + s[ms^2 - K_A] \\
 &= ms^3 + K_B K_d s^2 + (K_B K_p - K_A)s + K_i K_B \\
 &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \\
 a_0 &= K_i K_B \\
 a_1 &= K_B K_p - K_A \\
 a_2 &= K_B K_d \\
 a_3 &= m
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Karakteristik denklemler çözüldüğünde;

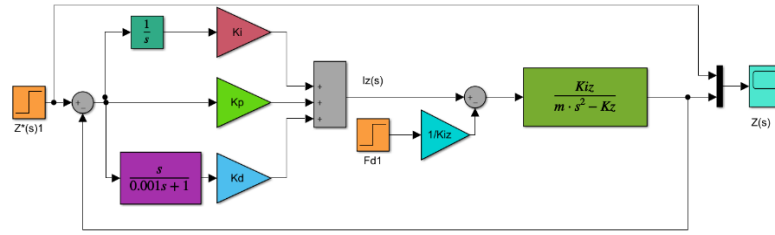
$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{K_A \gamma_1^2 + \gamma_3 m \gamma_2^2}{K_B \gamma_1^2} \\
 K_i &= \frac{\gamma_2^2 \gamma_3 m}{K_B \gamma_1^3} \\
 K_d &= \frac{\gamma_2 \gamma_3 m}{K_B \gamma_1}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

parametreleri elde edilir. Tablo 2.4'te PID ve I-PD kontrolör katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.4 PID ve I-PD Kontrolör Kat Sayıları

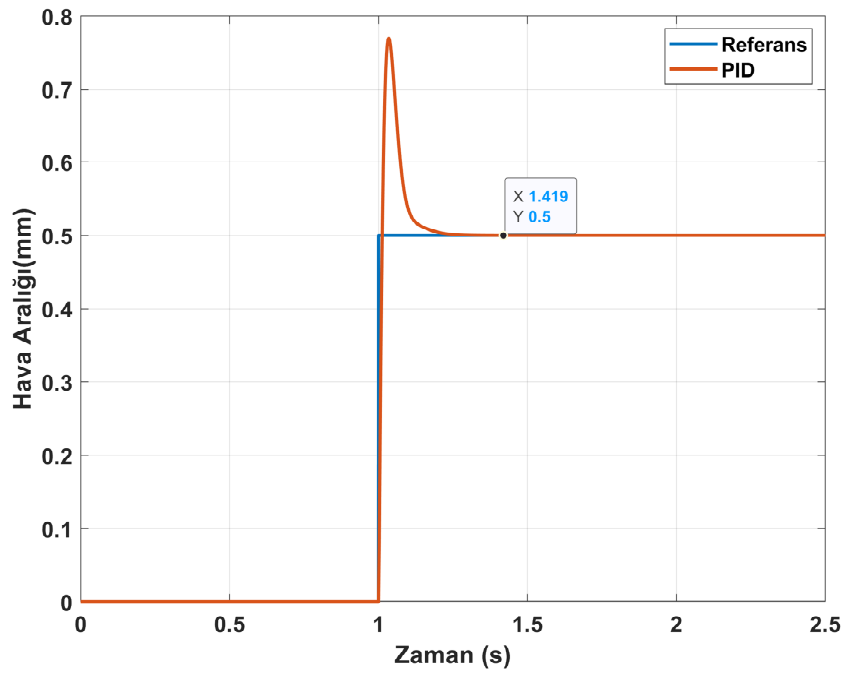
Kp	Kd	Ki
6287	94	75472

Şekil 2.26'da Matlab-Simulink modeli verilmiştir. Bu benzetimde girilen hava aralığı referans değerine karşı sistemin cevabı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.26 PID Kontrolör Simulink Modeli

Tablo 2.2 ve Tablo 2.4'te verilmiş olan parametreler kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.27'de 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık PID kontrolörünün 0.3 milimetreyi geçerek üst aşım oluşturduğu görülmektedir. Gerçek sistemde bu üst aşımın sistemi kararsızlığa (mekanik kısıtlar ve doğrusal olmayana karakteristlik) götürmesine neden olabilmektedir. I-PD kontrolör kullanılarak PID kontrolörün sebep olduğu üst aşımının önüne geçilebilmektedir.



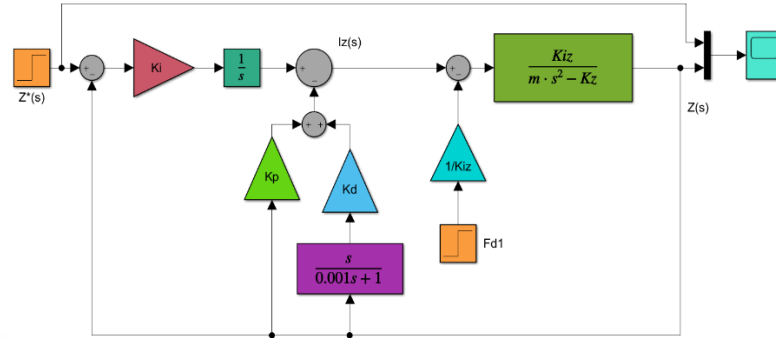
Şekil 2.27 Basamak Referans Girişi Akım Uyarımlı PID Kontrolör z Eksen Cevabı

2.2.4 Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör Tasarımı

Akım uyarımlı I-PD kontrolörün blok transfer fonksiyonu çıkartıldığında;

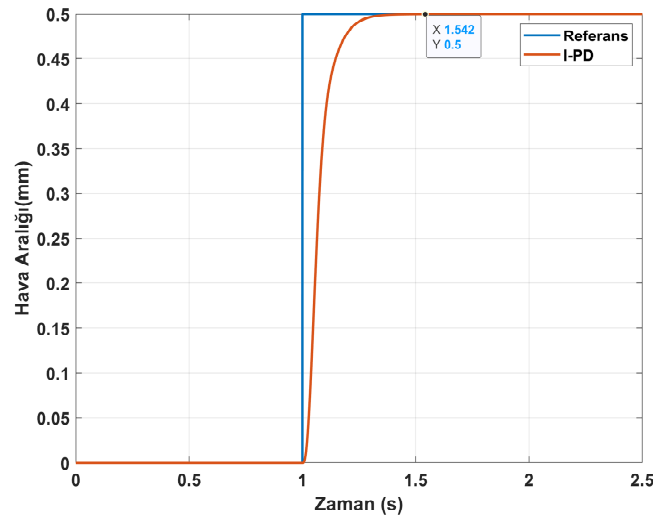
$$\frac{Z(s)}{Z^*(s)} = \frac{K_B K_i}{ms^3 + (K_B K_d)s^2 + (K_P K_B - K_A)s + K_B K_i} \quad (2.31)$$

ile ifade edilir. Benzetim çalışmaları için oluşturulan simulink modeli Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28 Akım Uyarımlı I-PD kontrolör Simulink Modeli

Akım uyarımlı PID kontrolörü için kullanılmış olan parametreler, I-PD kontrolörde kullanılarak sistem hava aralığı kontrolü sağlanmıştır. Şekil 2.29’da 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık I-PD kontrolörünün üst aşım oluşturmada 0.542 saniyede daha yumuşak bir şekilde cevap verdiği görülmüştür.



Şekil 2.29 Basamak Referans Girişi Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör z Eksen Cevabı

2.2.5 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı (C-SMC)

Kayan kipli kontrol (sliding mode control), değişken yapılı doğrusal olmayan bir kontrol tekniğidir. Kayan kipli kontrol belirsizlik (parametrik belirsizlikler, bozucu girişler) içeren dinamik sistemlerin gürbüz kontrolüne belirli şartlarda imkan sağlayan bir kontrolördür.

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= \left(\frac{K_z}{m}\right)z + \left(\frac{K_{i_z}}{m}\right)i_z + \left(\frac{1}{m}\right)F_d \\ a_z &= \left(\frac{K_z}{m}\right), b_z = \left(\frac{K_{i_z}}{m}\right), d_z = \left(\frac{1}{m}\right)F_d \\ \ddot{z} &= a_z z + b_z i_z + d_z\end{aligned}\quad (2.32)$$

Z eksen dinamiğine ilişkin gerçek model, nominal model ve parametre belirsizlikleri ve zamanla değişen bozucu girişi dikkate alındığında;

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= (a_{zn} + \Delta a_z)z + (b_{zn} + \Delta b_z)i_z + d_z \\ \ddot{z} &= (a_{zn})z + (b_{zn})i_z - \tau \\ \tau &= -\Delta a_z z - \Delta b_z i_z - d_z\end{aligned}\quad (2.33)$$

ile ifade edilir. a_{zn} ve b_{zn} nominal model parametrelerini, Δa_z ve Δb_z sistem parametrik belirsizliklerini ve τ ise toplam bozucu ve belirsizlikleri temsil etmektedir. Sistemin referans takip hatası;

$$\tilde{z} = z_r - z \quad (2.34)$$

şeklinde tanımlanabilir. z_r referans değeri ifade eder. Kayan kipli kontrol tasarımında kayma fonksiyonu PD kontrolör yapısına benzer kayma fonksiyonu ifadesiyle;

$$\sigma_{PD} = \lambda_c z + \dot{z} \quad (2.35)$$

şeklinde ifade edilir. Klasik kayan kipli kontrolörün kapalı çevrim performansı modelin doğruluğuna bağlıdır. Kontrol performansı 2.36 numaralı denklemde geçen k_2 katsayısı ile artırılabilir. Fakat çıkış sinyali çatırtı (chattering) etkisi göstermeye başlayarak sistemi kararsızlığa götürebilir. Bu sebeple, sistemin kontrolü için I-PD kontrolör ve kayan kipli kontrolörler beraberinde kullanılarak

karma bir yapı önerilmiş ve daha gürbüz bir yapı ortaya konulmuştur. Kontrolör yapısı;

$$\begin{aligned} i_{I-PD-CSMC} &= i_{I-PD} - i_{CSMC} \\ i_{I-PD} &= Kpz + Kd\dot{z} + Ki \int_0^t z dt \\ i_{CSMC} &= k_1 \sigma_{PD} + k_2 \operatorname{sgn}(\sigma_{PD}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

i_{I-PD} nominal kontrolörü, i_{CSMC} doğrusal olmayan anahtarlama kontrolörünü k_1 , k_2 kontrol kazançlarını ifade eder. I-PD kontrolörü sistemin kararlılığını sağlarken kayan kipli kontrolör ise model belirsizlikleri ve dış bozucuları bastırma görevini ifa etmektedir. Sistemin modelinde sürekli olmayan işaret fonksiyonu çatırtı etkisine neden olduğu için yerine aynı özelliklerde sürekli bir fonksiyon olan;

$$\operatorname{sgn}(\sigma_{PD}) \cong \frac{\sigma_{PD}}{|\sigma_{PD}| + \varepsilon} \quad (2.37)$$

kullanılmıştır. Burada ε küçük değerli pozitif bir sabit olup sınır katman kalınlığını (boundary layer thickness) ifade etmektedir. Bu durumda doğrusal olmayan kontrol işareti;

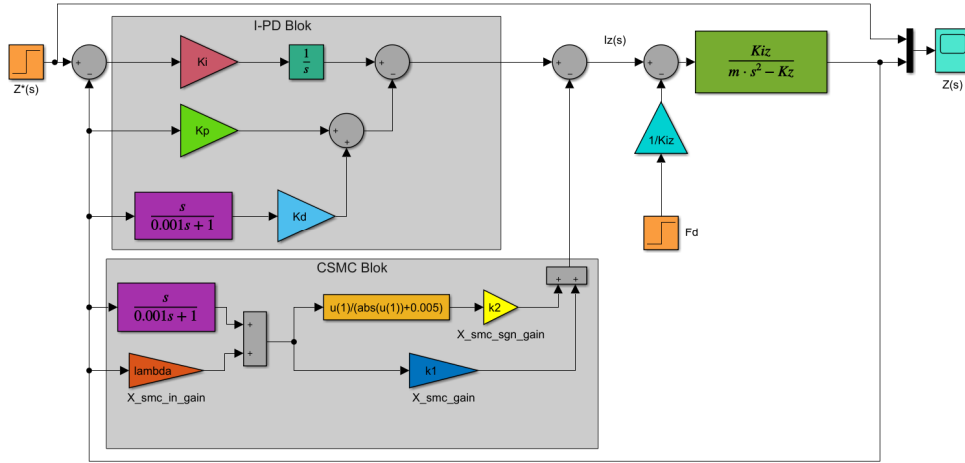
$$i_{CSMC} \cong k_1 \sigma_{PD} + k_2 \frac{\sigma_{PD}}{|\sigma_{PD}| + \varepsilon} \quad (2.38)$$

şeklinde tasarlanmıştır.

Tablo 2.5 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

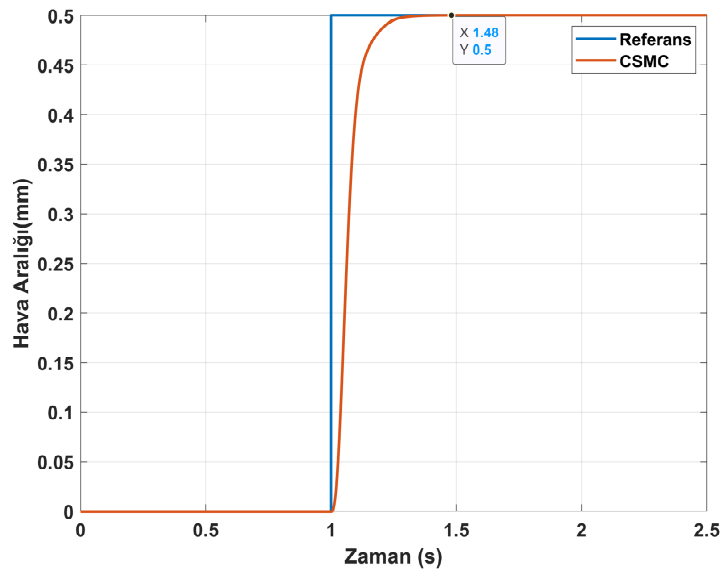
λ_c	k_1	k_2	ε
100	-3.5	0.1	0.005

Şekil 2.30'da I-PD ve klasik kayan kipli kontrolörlerinin benzetim çalışmaları verilmiştir.



Şekil 2.30 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Simulink Modeli

Şekil 2.31’de 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık klasik kayan kipli kontrolörünün üst aşım oluşturmada 0.48 saniyede, akım uyarımlı I-PD kontrolörüne göre daha hızlı bir şekilde cevap verdiği görülmektedir.



Şekil 2.31 Basamak Referans Girişi CSMC Kontrolör z Eksen Cevabı

2.2.6 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı (I-SMC)

Klasik kayan kipli kontrolör sistem durumlarının kayma fonksiyonu ile eşlenip kayma modu olarak ifade edilen ikinci faza ulaşması durumunda model belirsizliklerine ve dış bozuculara karşı güçlü bir gürbüzlük gösterir. Başlangıç durumundan kayma fonksiyonuna ulaşılan kadar geçen sürede gürbüzlük

özelliklerini gösterememektedirler [29]. Klasik kayan kipli kontrolörün bu olumsuzluğunu ortadan kaldırmak için integral kayan kipli kontrolör önerilmektedir [30]. Kayma fonksiyonu klasik kayan kipli kayma fonksiyonuna ek olarak integral parametresi eklenerek;

$$\sigma_{In-PD} = \lambda_c \tilde{z} + \dot{\tilde{z}} + k_3 \int_0^t \tilde{z} dt \quad (2.39)$$

elde edilir. Sistem durumlarını kayma yüzeyine yönlendiren kontrol denklemleri;

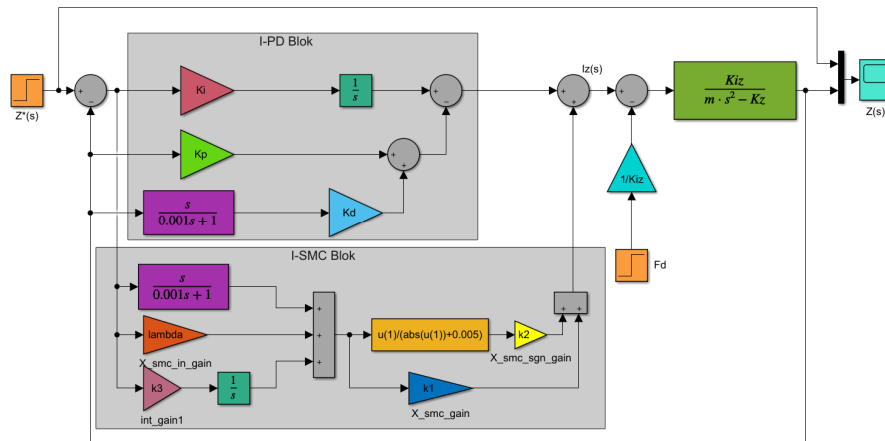
$$\begin{aligned} i_{I-PD-ISM} &= i_{I-PD} + i_{ISM} \\ i_{I-PD} &= K_p z + K_d \dot{z} + K_i \int_0^t z dt \\ i_{ISM} &\cong k_1 \sigma_{In-PD} + k_2 \frac{\sigma_{In-PD}}{|\sigma_{In-PD}| + \varepsilon} \end{aligned} \quad (2.40)$$

şeklinde ifade edilir.

Tablo 2.6 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

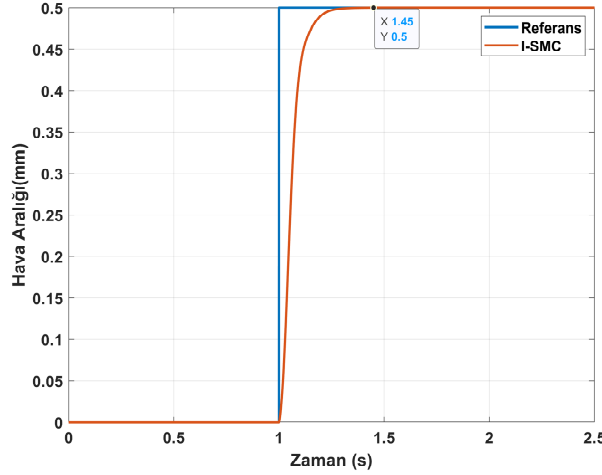
λ_c	k_1	k_2	k_3	ε
100	3.5	0.1	4000	0.005

Şekil 2.32’de I-PD ve integral kayan kipli kontrolörlerinin benzetim blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.32 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Kontrolör Simulink Modeli

Şekil 2.33’de 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık integral klasik kayan kipli kontrolörünün üst aşım oluşturmada 0.45 saniyede, klasik kayan kipli kontrolöre göre daha hızlı bir şekilde cevap verdiği görülmüştür.



Şekil 2.33 Basamak Referans Girişi I-SMC Kontrolör z Eksen Cevabı

2.2.7 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Tasarımı

Klasik kayan kipli ve integral kayan kipli kontrolörler modellenmeyen dinamiklerden dolayı giriş sinyalinde çatırtıya ve dış bozucululara karşı gerekli gürbüzlüğü işaret fonksiyonu ya da sigmoid fonksiyonuyla pratik açıdan sağlarlar. Fakat ideal anahtarlama durumuna karşılık düşmediği için kontrol edilen sistemin belirsizliklere karşı gürbüzlüğü sınırlamaktadır. Klasik kayan kipli ve integral kayan kipli kontrolör yapılarında, çıkış işaretinde kontrol teriminin ortaya çıkmasını sağlayacak alınması gereken türev derecesini ifade eden bağıl derece “1” olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek bağıl dereceli sistemlerde çatırtı etkisini ortadan kaldırırken gürbüzlük özelliklerini koruyan burulma kayan kipli kontrolörler sisteme uygulanabilir [31]. Kayma fonksiyonu klasik kayan kipli kayma fonksiyonuyla aynı olup;

$$\sigma_{T-PD} = \lambda_c z + \dot{z} \quad (2.41)$$

şeklinde ifade edilir. Sistem durumlarını kayma yüzeyine sürecektir kontrol denklemleri;

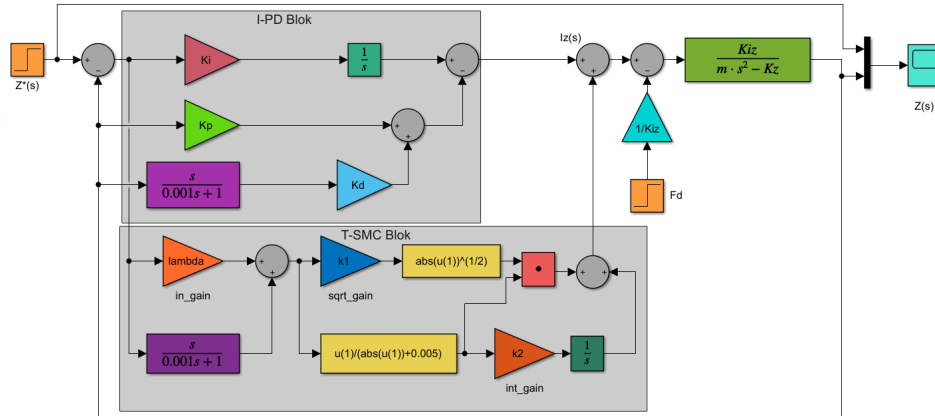
$$\begin{aligned}
i_{I-PD-T-SMC} &= i_{I-PD} + i_{T-SMC} \\
i_{I-PD} &= Kpz + Kdz + Ki \int_0^t z dt \\
i_{T-SMC} &\cong k_1 \sqrt{|\sigma_{T-PD}|} \cdot \frac{\sigma_{T-PD}}{|\sigma_{T-PD}| + \epsilon} + \dot{\vartheta}_1^{\lambda} \\
\dot{\vartheta}_1 &= k_2 \frac{\sigma_{T-PD}}{|\sigma_{T-PD}| + \epsilon}
\end{aligned} \tag{2.42}$$

şeklinde ifade edilir.

Tablo 2.7 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

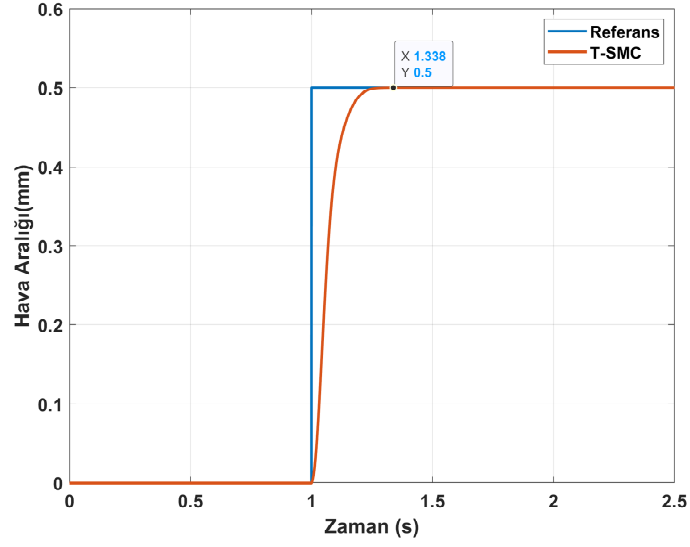
λ_c	k_1	k_2	ϵ
65	10	15	0.005

Şekil 2.34’de I-PD ve burulma kayan kipli kontrolörlerinin benzetim çalışmaları verilmiştir.



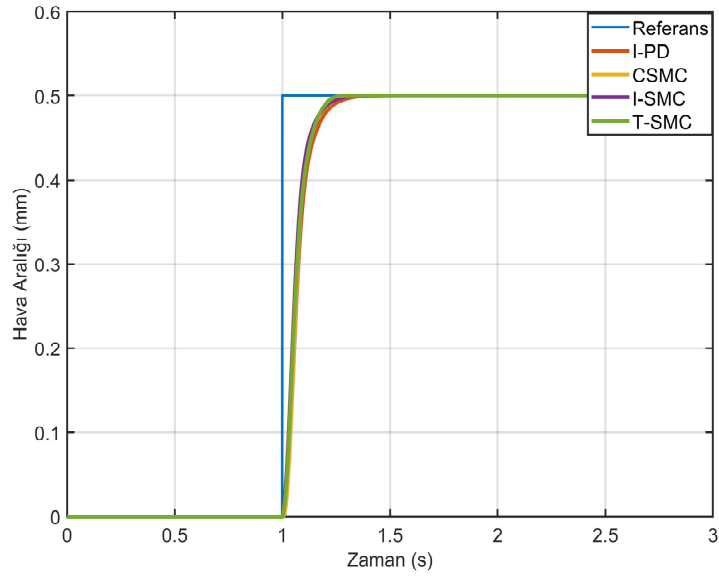
Şekil 2.34 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Kontrolör Simulink Modeli

Şekil 2.35’de 1. saniyede verilmiş olan 0.5 mm referans sinyaline karşılık integral klasik kayan kipli kontrolörünün üst aşım oluşturmada 0.338 saniyede daha hızlı bir şekilde cevap verdiği görülmüştür.



Şekil 2.35 Basamak Referans Girişi T-SMC Kontrolör z Eksen Cevabı

Şekil 2.36’da tüm akım uyarımlı kontrolörlerin basamak girişine karşı cevapları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Z eksen cevabını en hızlı burulma kayan kipli kontrolör vermiştir.



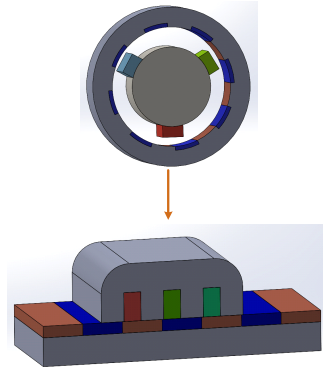
Şekil 2.36 Basamak Referans Girişi Kontrolör Karşılaştırılması

Bu bölümde doğrusal motorun modellenmesi, artı tipli taşıyıcının motor ile birlikte analizleri, taşıyıcı sistemin hız ve konum kontrolü için kontrolör tasarımları ve benzetim çalışmaları anlatılmıştır.

Artı tipli karma elektromıknatısın yatay eksenindeki tahriki ile havada askılama mekanizmasının ayrıklaştırılması sistemin kontrolü açısından önem arz etmektedir. Havada askılama kontrolü elektromıknatısın sargıları ile kontrol edilirken, yatay eksenindeki hareketi doğrusal motorun faz sargıları ile kontrol edilmektedir. Doğrusal motor faz sargıları enerjilendirildiğinde oluşacak olan manyetik alanın havada askılama mekanizmasını etkilememesi gerekmektedir. Bu sorun elektrik motorlarda alan yönlendirme kontrolü (vektör kontrol) olarak bilinen yöntemin motor sargılarına uygulanmasıyla çözülmektedir.

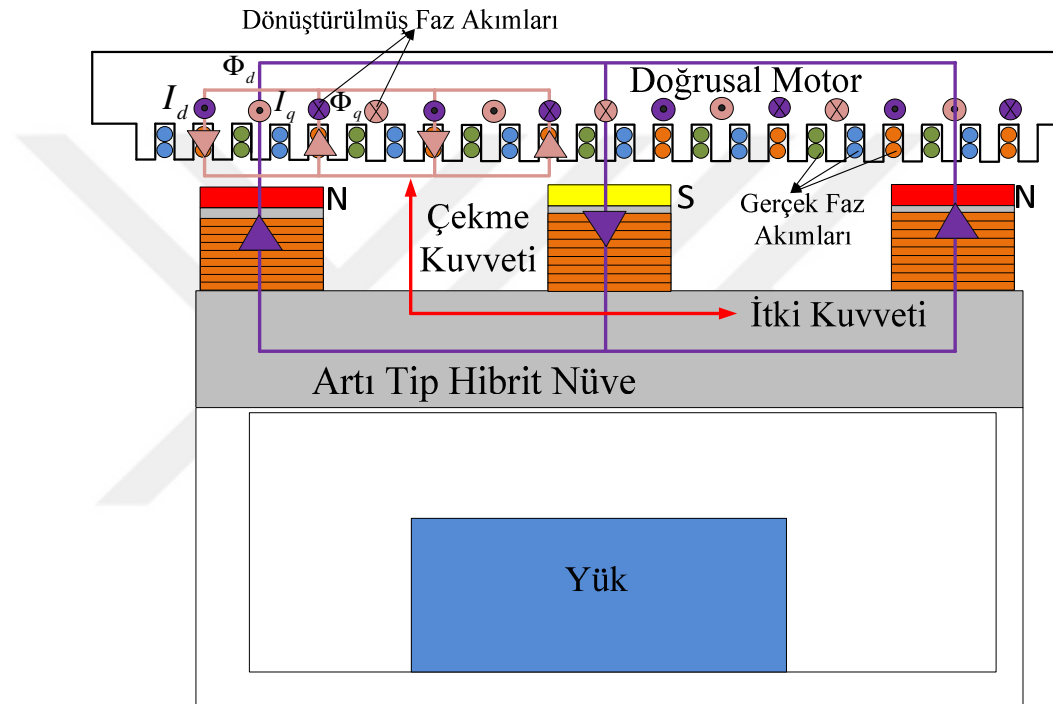
3.1 Yatay Tahrik Mekanizmasının Modellenmesi

Doğrusal motor, dönel senkron motorun kesiti alınarak açılmış hali olarak tanımlanabilir. Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Senkron Tipi Doğrusal Motor

Doğrusal motorun modeli dönel senkron motorlarda olduğu gibi 3-fazlı fiziksel yapı dikkate alınarak, kuvvet denklemi 3 faz akımlarına bağlı olarak ifade edilebilirken aynı zamanda alan yönlendirmeli kontrol için Clarke-Park dönüşümü ile 2-fazlı motor modeli oluşturulması mümkündür. Bu tezde Clarke-Park modeli kullanılarak 2- fazlı motor modeli çıkartılarak 3-fazlı senkron doğrusal motorun kontrolü yapılmıştır. Şekil 3.2’de tek eksen doğrusal motorun altında manyetik havada askılama sistemi gösterilmiştir. Bu sistem kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor olarak ifade edilir.



Şekil 3.2 Doğrusal Motor Yapısı ve Akım Dönüşümleri

Doğrusal motorun üzerinde bulunan oluklara faz sargıları (A-B -C) yerleştirilmiştir. Bu faz sargılarına gerilim ya da akım kaynağı uygulanarak yatay ekseninde hareket etmesini sağlayacak elektromanyetik alan oluşturulur. Elde edilen elektromanyetik alan artı tipli karma elektromıknatısın kalıcı mıknatıslarını sürükleyerek itme kuvvetinin oluşmasını sağlamaktadır. İtme kuvvetinin etkisi ile taşıyıcı sistem yatay ekseninde hareket etmiş olur. Manyetik havada askılama sisteminin konumunun daha hassas ve doğru bir şekilde kontrol etmek amacıyla doğrusal motorun faz sargılarında oluşan elektromanyetik alanın istenilen formda şekillendirilmesine dayanan kontrol tekniğine alan yönlendirmeli kontrol olarak

tanımlanır. Alan yönlendirmesi; havada askılama alanı ve endüklendiği bölgedeki tahrik alanı olarak ikiye ayrılır. 3 faz gerçek sargı akımları, dönüşüm matrisi kullanılarak aralarında 90° elektriksel açı bulunan 2 ayrı akıma dönüştürülür. Dönüşüm matrisi;

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta-120) & -\sin(\theta+120) \end{pmatrix}$$

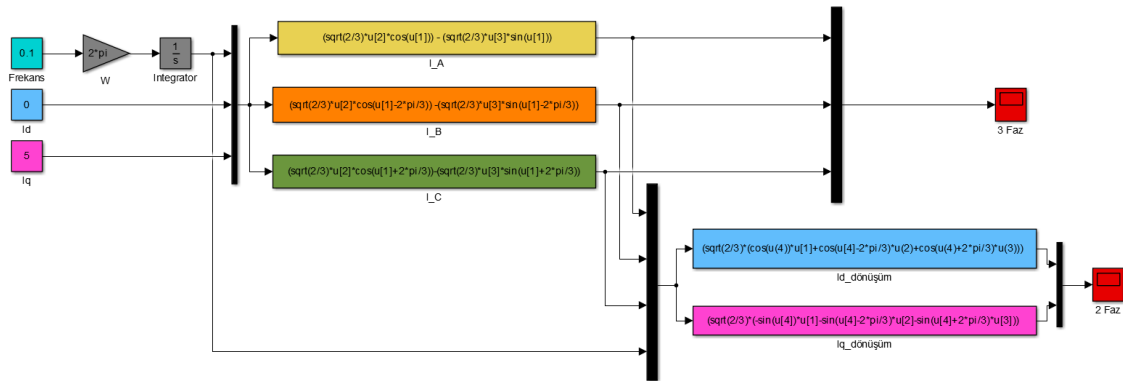
$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = T * \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ile ifade edilir. Ters dönüşüm matrisi ise;

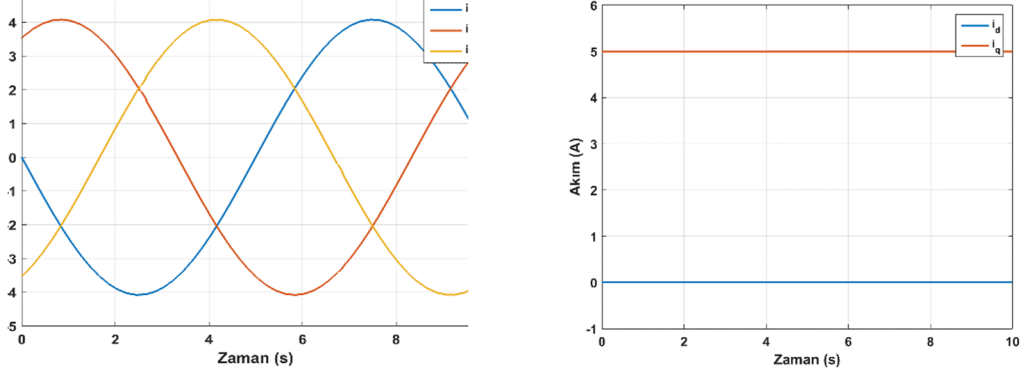
$$T' = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta-120) & -\sin(\theta-120) \\ \cos(\theta+120) & -\sin(\theta+120) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = T' * \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

ifade edilir. Faz akım dönüşüm ve ters dönüşüm matrislerinin benzetim çalışması Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Dönüşüm akımları ise Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Doğrusal Motor Faz Akım Dönüşümleri Benzetimi



Şekil 3.4 3 Faz Akımlarının 2 Faza Dönüşümleri $i_d=0$ $i_q=5A$

D eksen (uyarma alanı) ve q (itki kuvvet alanı) eksenleri dik açılı eşdeğer devreleri ile temsil edilir. D-eksen ve q eksen sargılarının gerilim denklemi;

$$\begin{aligned} V_d &= R_d i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \lambda_q \\ V_q &= R_q i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \lambda_d \end{aligned} \quad (3.3)$$

İle ifade edilir. V_d ve V_q q ve d eksenlerinin gerilimlerini, i_d ve i_q eksen akımlarını R_q ve R_d dirençleri λ_d ve λ_q eksen akılarını, x ve dx/dt (v) elektromıknatısın konumunu ve hızını, τ_p ise kutuplar arası uzaklığı ifade eder. Eksenlerdeki akılar ise;

$$\begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_q \\ \lambda_d &= L_d i_d + \lambda_m \\ \lambda_m &= \Phi_0 N \end{aligned} \quad (3.4)$$

denklemleri ile ifade edilir. L_q ve L_d eksenlerin endüktanslarını λ_m kalıcı mıknatısın akısını Φ_0 başlangıç akısını ve N sarım sayısını ifade eder.

Denklemlerin düzenlenmesi ile denklem takımları;

$$\begin{aligned} V_d &= R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} v L_q i_q \\ V_q &= R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau_p} v (L_d i_d + \Phi_0 N) \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklinde elde edilir. Doğrusal motor tarafından elektromıknatısa uygulanan itki kuvveti eksen akılarına göre;

$$F_x = K(\lambda_q I_q - \lambda_d I_d)$$

$$F_x = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p (\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3.6)$$

ile ifade edilir. Dönel motorlar ile doğrusal motorların hava aralığı karşılaştırıldığında doğrusal motorların hava aralığı dönel motora göre 3-5 kat daha büyük olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak $L_d \cong L_q$ kabulü yapılır. Denklem 3.6 tekrar düzenlendiğinde;

$$F_x = \left(\frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p \right) (\Phi_0 N) i_q \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, p kutup sayısını göstermektedir. Sabit sayılar K harfiyle ifade edilecek olursa;

$$K = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p$$

$$K_f = K \lambda_m \quad (3.8)$$

eşitlikleri kullanılarak kuvvet denklemi

$$F_x = K_f i_q \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. Fazlara uygulanacak olan i_q akımı ve sonucunda oluşan λ_q akısı itki kuvvetini oluştururken i_d akımı ve sonucunda oluşan λ_d akısı çekme kuvvetini oluşturmaktadır. Eksen akımlarının ayrı ayrı kontrol edilmesiyle havada askılama ve yatay tahrik kuvvetleri ayrık kontrolü yapılabilmektedir. i_d akımının oluşturduğu çekme kuvveti, artı tipli karma manyetik taşıyıcı sistemin havada askılanma kontrolüne bozucu giriş olarak etki etmesi sebebiyle sıfır yapılır. Bu duruma ek olarak doğrusal motor üzerinde bulunan sargı olukları ve manyetik havada askılama ile doğrusal motor arasındaki hava aralığında salınımlara (cogging kuvveti) neden olmasıyla kontrol kalitesi düşmektedir. Bu salınımların minumum seviye indirilmesi için hem havada askılama kontrol sistemlerine hem

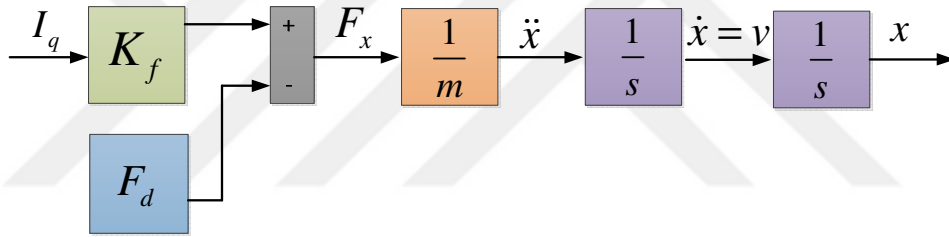
de doğrusal motor konum kontrol sistemlerine bozucu giriş gözlemcisi sisteme entegre edilmektedir.

Doğrusal motorla birleştirilmiş manyetik havada askılamanın mekaniksel hareket dinamiği, hava sürtünmesinin ihmalıyla, doğrusal motorun itki kuvveti manyetik taşıyıcı sistemin kütesinin ivmesi ile çarpımına eşit olacaktır. Sürtünmenin olmaması geleneksel mekaniksel temaslı sistemlere göre enerji ihtiyacını düşürecek ve bu alanda üstünlük sağlayacaktır.

Yatay eksendeki F_x itki kuvvetine ilişkin hareket denklemi;

$$m\ddot{x} = F_x - F_d \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir. m taşıyıcının kütesini, F_x itki kuvvetini, F_d bozucu kuvveti $\ddot{x}$ taşıyıcı sistemin ivmesini göstermektedir. Doğrusal motorla elektromıknatısın itki kuvvetine ilişkin blok diyagram Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Doğrusal Motor İtki Kuvvet Modelinin Blok Diyagramı

Taşıyıcı sistem q ekseninde hareket edeceği için $i_d \cong 0$ olmalıdır. Taşıyıcı sistem değişkenleri x ve i_q akımına bağlıdır. Doğrusal motorun itki kuvvet modelinin transfer fonksiyonu;

$$\frac{x(s)}{I_q(s)} = G(s) = \frac{K_f}{ms^2} \quad (3.11)$$

şeklinde elde edilmektedir.

3.2 Artı Tipli Karma Manyetik Taşıyıcının Doğrusal Motor Altında Analizleri

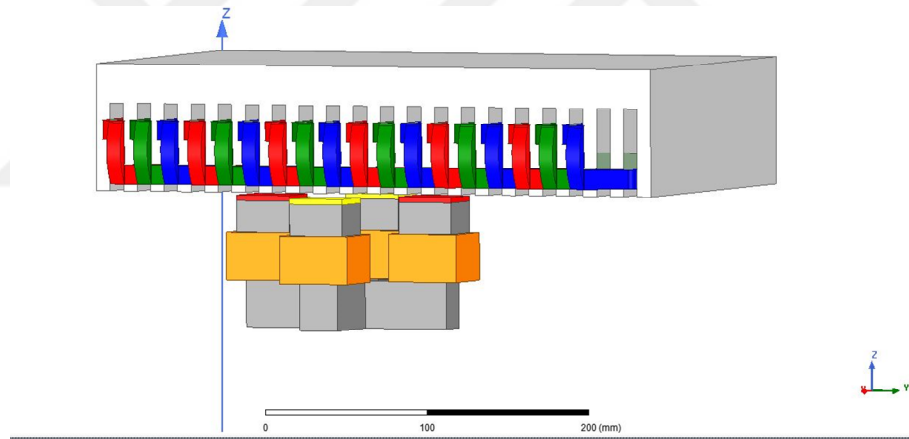
Manyetik taşıma sisteminin gerçekleştirilmesi için önerilen artı tipli karma manyetik havada askılama sistemi istenilen hızda yatay eksen boyunca hareket

edebilmeli ve referans değerin de durabilmelidir. Demir nüve altında askılanan taşıyıcı sistem 3 eksen de hareket yeteneğine sahiptir, doğrusal eksen de hareket yeteneğine sahip değildir. Bu yüzden doğrusal motor altında manyetik sistemin kullanılması gerekmektedir.

Artı tipli karma manyetik taşıyıcı sistemin doğrusal motor armatür sargıları ile birleştirildiğinde doğrusal senkron motor yapısına benzer bir yapı oluşturur. Faz sargılarında oluşan manyetik alan ile doğrusal motorlar arasında bir senkronizasyon vardır. Doğrusal motorun faz sargılarının indüklediği gezen manyetik alan v_s ile mekanik hız v aynıdır. Mekanik hız kutup adımına (τ) ve giriş frekansına (f) bağılı olarak değişmektedir.

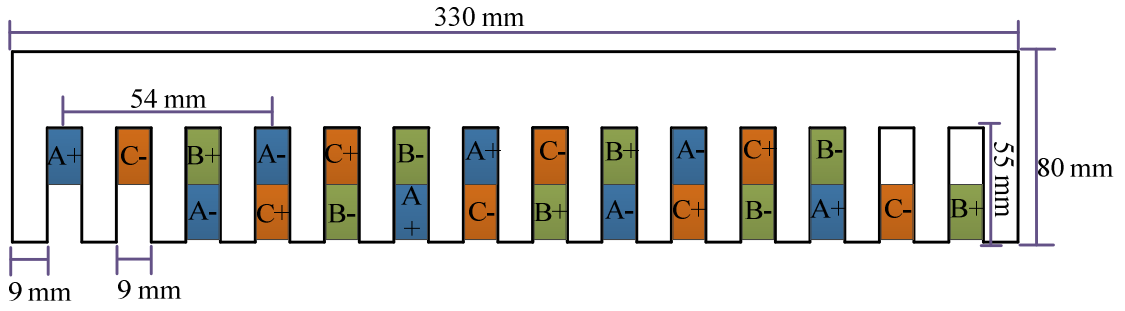
$$v = v_s = 2f\tau = \frac{\omega}{\pi}\tau \quad (3.12)$$

Şekil 3.6’da doğrusal motor ile taşıyıcı sistem entegrasyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Doğrusal Motorla Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Sürülmesi

Artı tipli elektromıknatısın doğrusal motor altında 3B FEM analizleri yapılmıştır. 3 boyutlu analiz için Şekil 3.7’de geometrik detayları verilen sistem kullanılmıştır. Doğrusal motor yapısında sargı tipi olarak 2 katmanlı sargı yapısını kullanılmıştır. Doğrusal motora ilişkin parametreler Tablo 3.1’de verilmiştir.



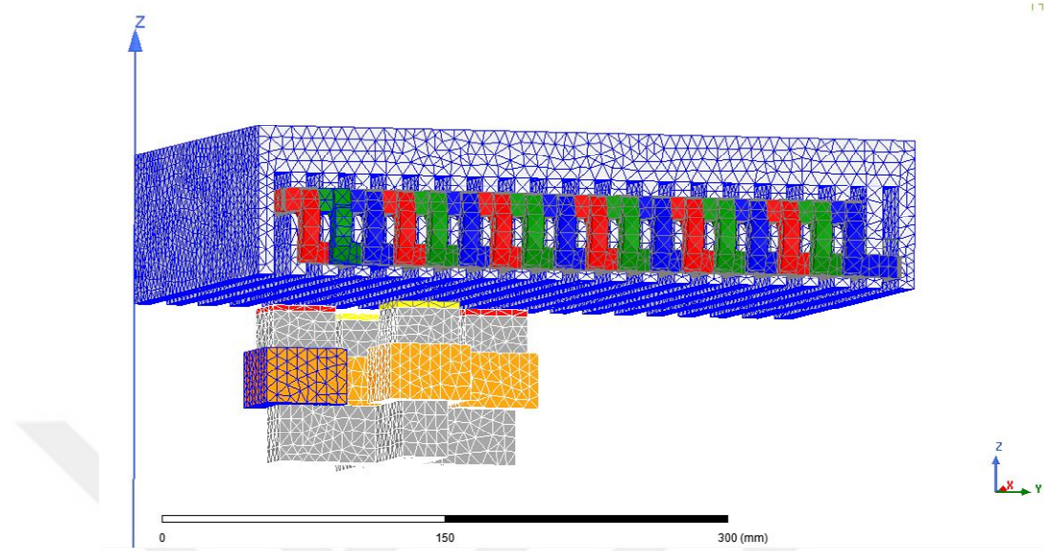
Şekil 3.7 3 Boyutlu FEM Analiz Modelinde Kullanılan Doğrusal Motorun Sargı Yapısı

Tablo 3.1 Doğrusal Motor Analiz Parametreleri

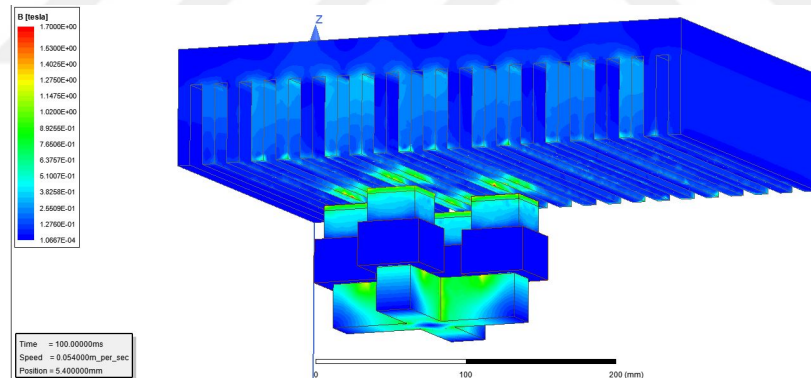
Parametreler	Değerler	Birimler
Çelik Nüve Uzunluğu	330	mm
Çelik Nüve Genişliği	243	mm
Çelik Nüve Kalınlığı	80	mm
Slot(Oluk) Adımı	9	mm
Slot(Oluk) Genişliği	9	mm
Slot(Oluk) Derinliği	55	mm
Kutup Adımı	54	mm
Slot(Oluk) Sayısı	42	adet
Faz Sayısı	3	adet
Her Faz için Sarım Sayısı	200	Sarım
Senkron Hız	54	mm/saniye
Hava aralığı	10	mm

3 boyutlu FEM analizinde oluşturulan mesh ağ yapısı Şekil 3.8’de verilmiştir. Motor sinüzoidal simetrik akım uyartımları uygulanmıştır. Doğrusal motor ile kuple artı şeklindeki manyetik havada askılanan taşıyıcı sisteme uygulanan i_d ve i_q akımının etkisi incelenmiştir. 3 Faz akımları 2 faz akımlarına dönüştürülüp sisteme uyartım akımı olarak verilmiştir. Transient analizine uyartım akım

frekansı ile senkron olacak şekilde 54 mm/saniyelik mekanik hareket tanımlanmıştır. 3 Boyutlu FEM analizine ilişkin manyetik alan yönleri ve akı değişimi Şekil 3.9’da verilmiştir.

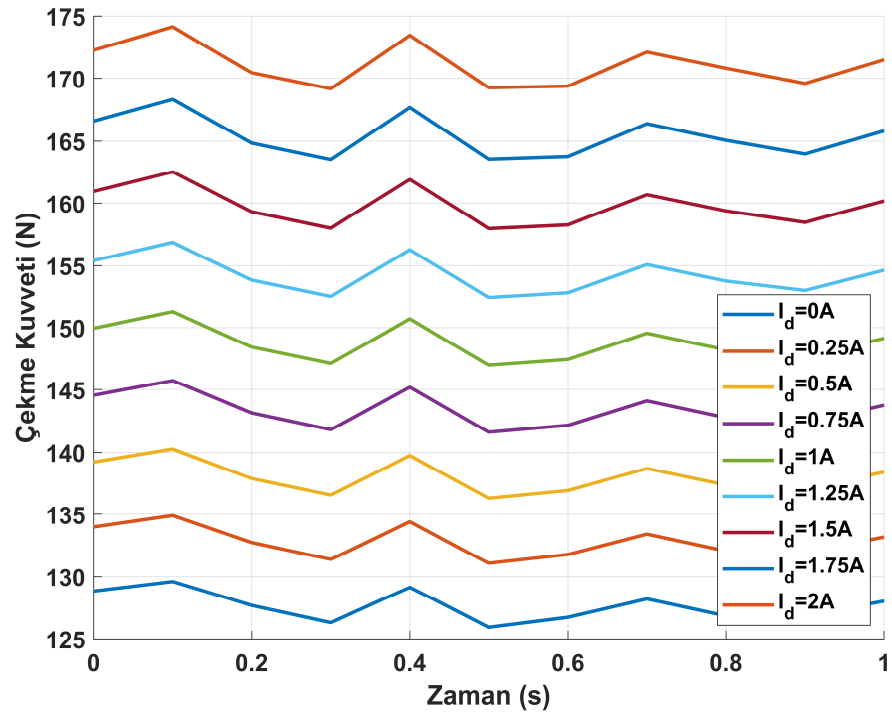


Şekil 3.8 3 Boyutlu FEM Analizde Kullanılan Ağ Yapısı

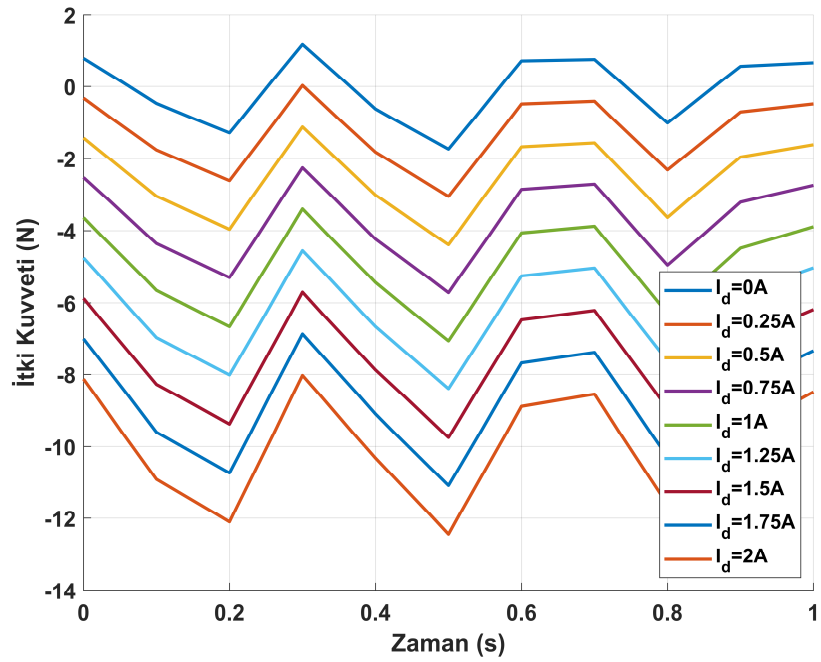


Şekil 3.9 3 Boyutlu FEM Analiz İle Hesaplanan Manyetik Akı Dağılımı

i_d akımı 0-2 A, i_q akımı 0 A olacak şekilde parametrik olarak tanımlanmış, çekme ve itki kuvvetleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir. i_d akımının itki kuvvetine etkisinin daha az olduğu görülmüş ve çekme kuvvetinin havada askılamaya olan etkisinin yüksek olduğu görülmüştür.



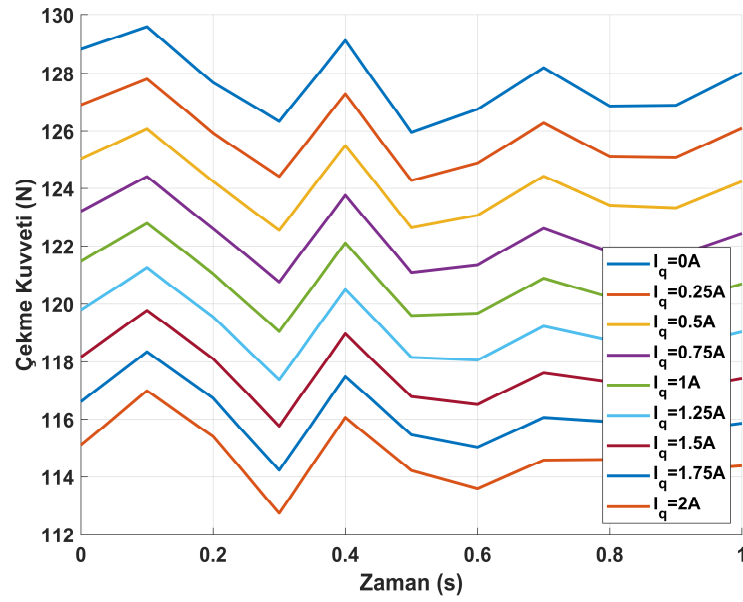
Şekil 3.10 $i_d=0-2A$ $i_q=0$ A Çekme Kuvveti



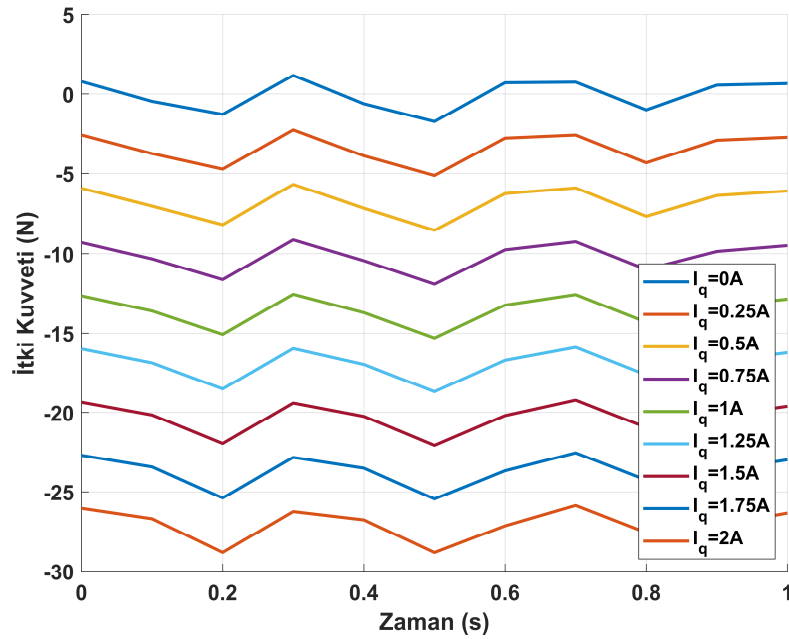
Şekil 3.11 $i_d=0-2A$ $i_q=0$ A İtme Kuvveti

i_d akımı 0 A, i_q akımı 0-2A olacak şekilde parametrik olarak tanımlanmış çekme ve itki kuvvetleri Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de verilmiştir. i_q akımının havada

askılamaya olan etkisinin az olduğu ve bu kuvvet artışının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. İtke kuvvetine ise etkisinin daha çok olduğu görülmüştür.



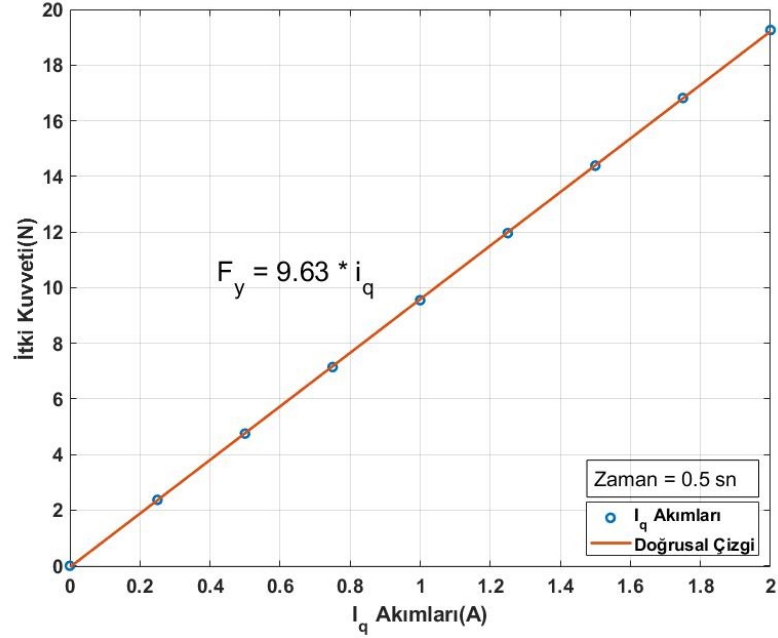
Şekil 3.12 $i_d=0$ $i_q=0-2A$ Çekme Kuvveti



Şekil 3.13 $i_d=0$ $i_q=0-2A$ İtke Kuvveti

i_q akımının itke kuvvetine olan etkisinin doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Oluşturulan doğrusal motorun itke kuvvet kazancı (K_f) doğrusal eğri denklemi

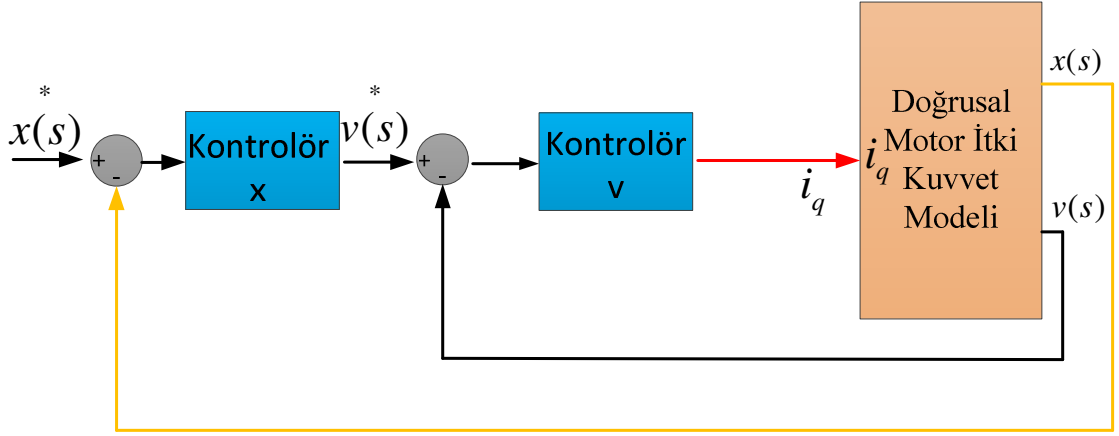
oluşturularak çıkartılabilmektedir. Matlab *polyfit* 0 fonksiyonu kullanarak 0.5 saniyedeki kuvvet değerleri alınarak eğri denklemi çıkartılmış ve kuvvet katsayısı 9.63 olarak bulunmuştur. Şekil 3.14’de buna ilişkin sonuçlar verilmiştir.



Şekil 3.14 Doğrusal Motorla Yatay Eksende Diyagonal Sürmeye İlişkin 3 Boyutlu FEM Analiz Modeli ile Elde Edilen İtki Kuvveti Akım İlişkisi.

3.3 Artı Tipli Karma Manyetik Taşıyıcının Doğrusal Motor Altında Benzetim Çalışmaları

Kullanılacak olan doğrusal motor 3 adet kontrol çıkışı (i_A , i_B , i_C) ile kontrol edilmektedir. Kontrol girişi olarak sargı akımları ya da sargı gerilimleri kullanılabilmektedir. Bu çalışmada kontrol girişi olarak akım dikkate alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Doğrusal motor için kapalı çevrim kontrol oluşturularak hız, konum kontrolleri yapılmaktadır. Benzetim çalışmalarında hem hız hem de konum kontrolörleri tasarlanarak kontrolleri yapılmıştır. Taşıyıcının belirlenen konuma doğru şekilde gidebilmesi için ilk olarak hız kontrolörü tasarlanmalıdır.

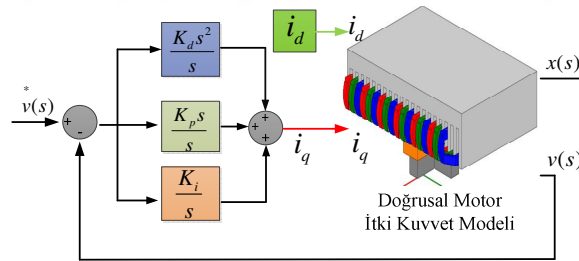


Şekil 3.15 Konum Kontrolör Blok Diyagramı

Şekil 3.15’de Taşıyıcı sistemin konum kontrolünün diyagramı verilmiştir. Konumlama için PID_x kontrolörü ve hız için PID_v kontrolörleri modele entegre edilerek iç içe kontrolör tasarımları yapılmıştır.

3.3.1 PID Hız Kontrolör Tasarımı

Doğrusal motorun PID kontrolörüyle hız kontrol blok diyagramı Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 Doğrusal motor PID Hız Kontrolör Diyagramı

Doğrusal motorun PID hız kontrolöründe itki kuvvet modeli ve Clarke-Park dönüşüm blokları bölüm 3.1’de verilmiştir. Sisteme verilen referans hız girdisi ilk olarak PID kontrolörüne girerek i_q akımına dönüştürür. İtki kuvvet akımı motor modeline giriş olarak uygulanarak hız ve konum çıktısı alınır. Senkron hız denklem 3.12 kullanılarak dönel açıya (ω) dönüştürülür. Ters Clarke-Park dönüşümü kullanarak 2 faz akımları 3 faz akımlarına dönüştürülerek sisteme uygulanır. Blok diyagramın transfer fonksiyonu;

$$C(s) = \frac{v(s)}{v(s)} = \frac{K_f * (K_d * s^2 + K_p * s + K_i)}{m * s^2 + K_f (K_d * s^2 + K_p * s + K_i)} \quad (3.13)$$

şeklinde elde edilir. Kapalı çevrim transfer fonksiyonunda kontrolör kat sayılarının hesaplanması için manyetik askılamada kullanılan kanonik polinom yaklaşımı kullanılabilir. Sistem için karakteristik denklem;

$$\begin{aligned} P(s) &= (m + K_f K_d) * s^2 + K_f K_p * s + K_f K_i \\ &= a_2 * s^2 + a_1 * s + a_0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Karakteristik denklemlerin katsatıları;

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{a_1}{a_0} = \frac{K_p}{K_i} \\ \gamma_2 &= \frac{a_1^2}{a_0 a_2} = \frac{K_f K_p^2}{K_i (m + K_f K_d)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

şeklinde elde edilir. Bu iki denklem çözülerek kontrolör katsayıları;

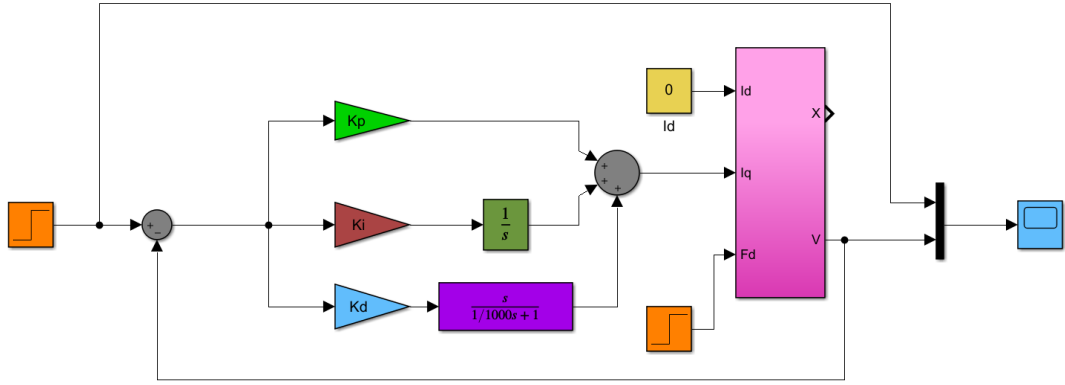
$$\begin{aligned} K_p &= 1 \\ K_i &= \frac{1}{\gamma_1} \\ K_d &= \frac{K_f \gamma_1 - \gamma_2 m}{K_f \gamma_2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

olarak bulunur.

Tablo 3.2 PID_v Kontrolör Kat Sayıları ve Model Parametreleri

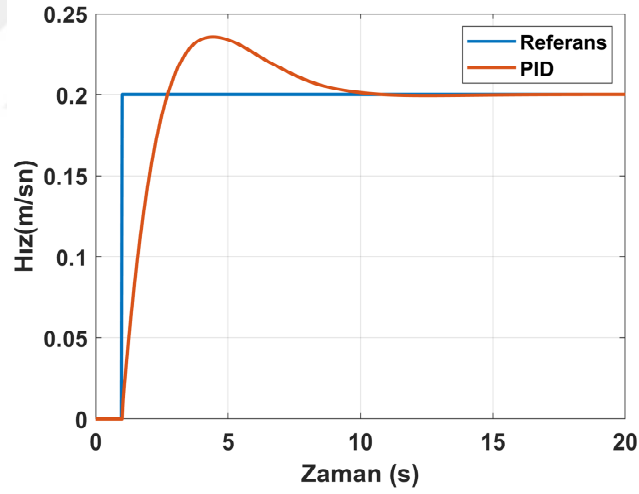
Kp	Kd	Ki	m	Kf
1	0.28	0.4	10	10.25

Şekil 3.17’de Matlab-Simulink modeli verilmiştir. Bu benzetimde girilen hız referans değerine karşı sistemin cevabı gözlemlenmiştir.



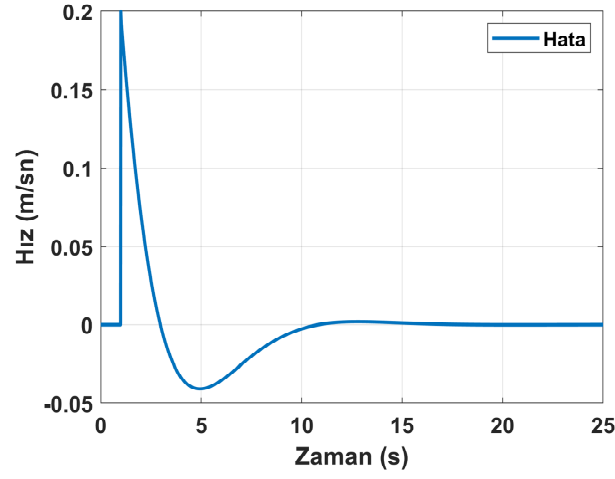
Şekil 3.17 Hız PID kontrolör Simulink Modeli

Tablo 3.2’de verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmasında 1. saniyede verilmiş olan 0.2 m/sn hız referansına karşılık sistem 0.04 m/sn üst aşım oluşturduğu ve sistemin yaklaşık olarak 12. saniyede oturduğu gözükmemektedir.



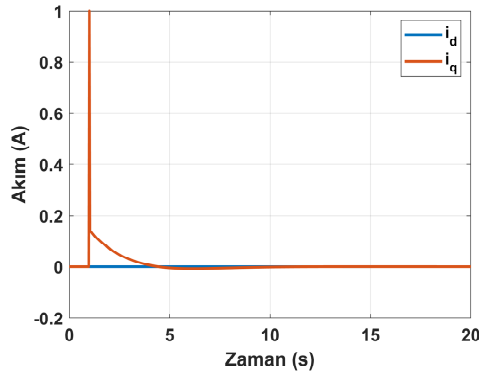
Şekil 3.18 Basamak Referans Girişi Hız Pıd Kontrolör Cevabı

Uygulanan basamak değerine karşı sistemin hatası Şekil 3.19’da verilmiştir.

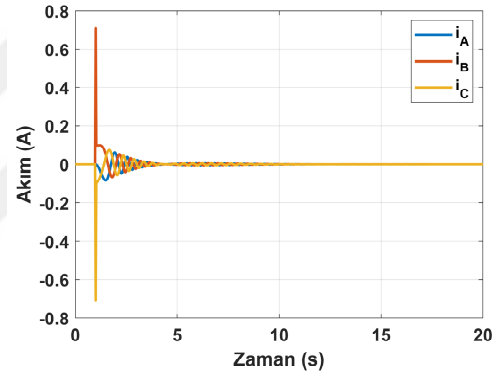


Şekil 3.19 Basamak Girişine Karşı Hız Hatası

Şekil 3.20'de basamak referans girişine karşı sistemin akım çıkışları verilmiştir.



(a)

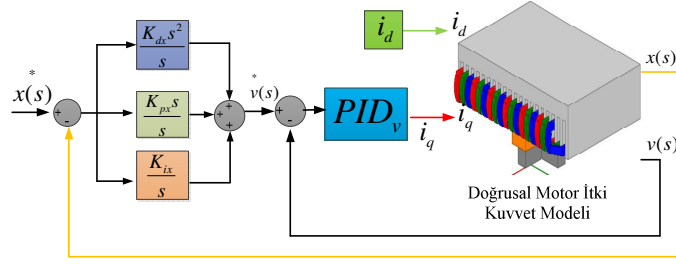


(b)

Şekil 3.20 Basamak Referans Girişi Akım Çıkışları, (a) 2 Faz Akımları, (b) 3 Faz Akımları

3.3.2 PID Konum Kontrolör Tasarımı

Doğrusal motorun PID kontrolörüyle konum kontrol blok diyagramı Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21 Doğrusal Motor PID Hız Kontrolör Blok Diyagramı

Şekil 3.21' incelendiğinde sistemin kontrolör parametrelerinin bulunması için tekrar sistemin konuma göre transfer fonksiyonunun çıkarılması gerekmektedir. Sistemin transfer fonksiyonu;

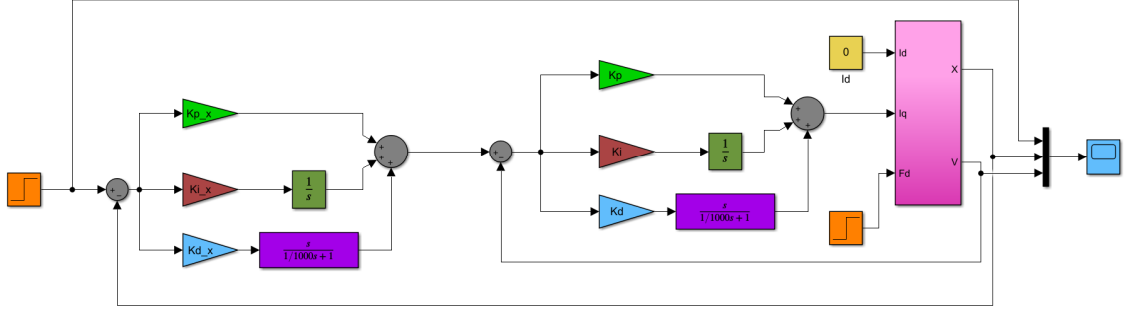
$$\frac{x(s)}{x^*(s)} = \frac{C(s) * (K_{dx} * s^2 + K_{px} * s + K_{ix})}{1 + C(s) * (K_{dx} * s^2 + K_{px} * s + K_{ix})} \quad (3.17)$$

şeklinde elde edilir. $C(s)$, hız kontrolörünün transfer fonksiyonunu ifade eder. 3.17 denklemi, değerler sembol olarak tanımlanıp Matlab Live Script yardımıyla çözülmüş, Manabe yöntemiyle konum kontrolörünün PID parametreleri bulunmuştur.

Tablo 3.3 PID_x Kontrolör Kat Sayıları ve Model Parametreleri

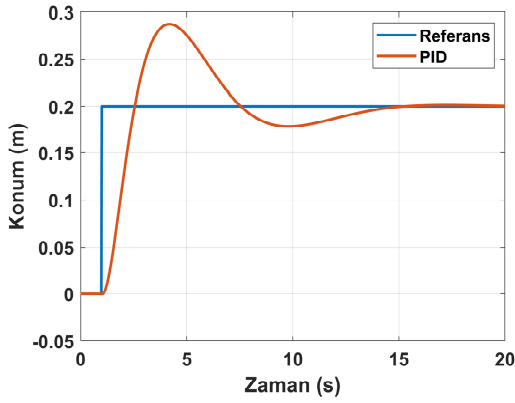
Kp_x	Kd_x	Ki_x	m	Kf
6.62	9.52	3.05	10	10.25

Şekil 3.22'de Matlab-simulink modeli verilmiştir. Bu benzetimde girilen konum referans değerine karşı sistemin cevabı gözlemlenmiştir.

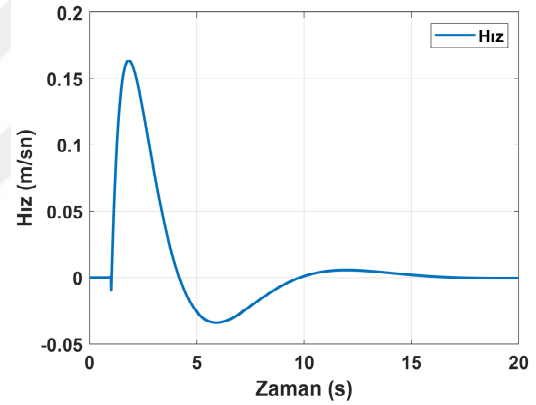


Şekil 3.22 Konum ve Hız PID Kontrolör Simulink Modeli

Tablo 3.3’de verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmasında 1. saniyede verilmiş olan 0.2 m konum referans sinyaline karşılık sistem 0.09 m üst aşım oluşturduğu ve sistemin yaklaşık olarak 15. saniyede referans değerine oturduğu gözükmemektedir.



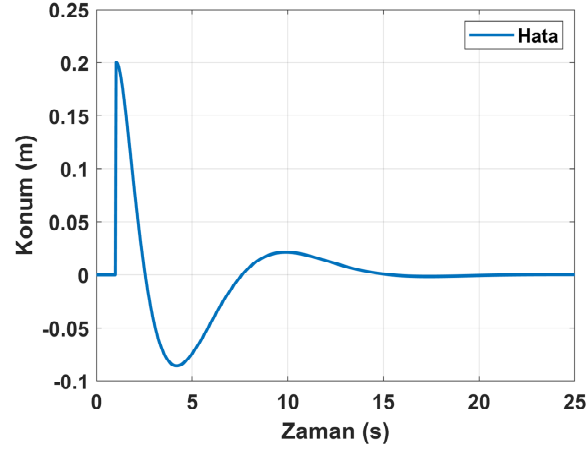
(a)



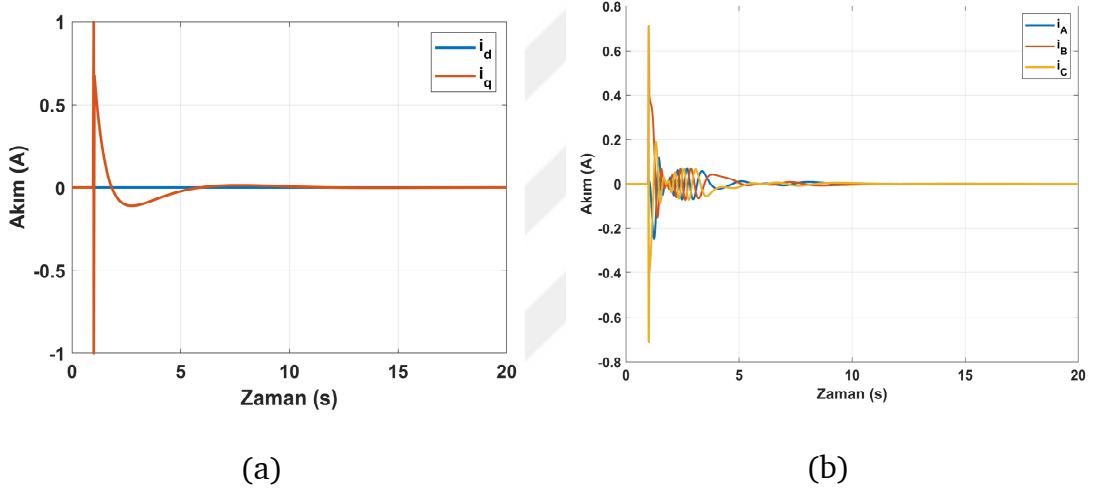
(b)

Şekil 3.23 Basamak Referans Girişi PID Kontrolör Cevabı (a) Konum (b) Konuma Bağlı Hız

Verilen basamak değerine karşı sistemin konum hatası Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.24 Basamak Girişine Karşı Konum Hatası

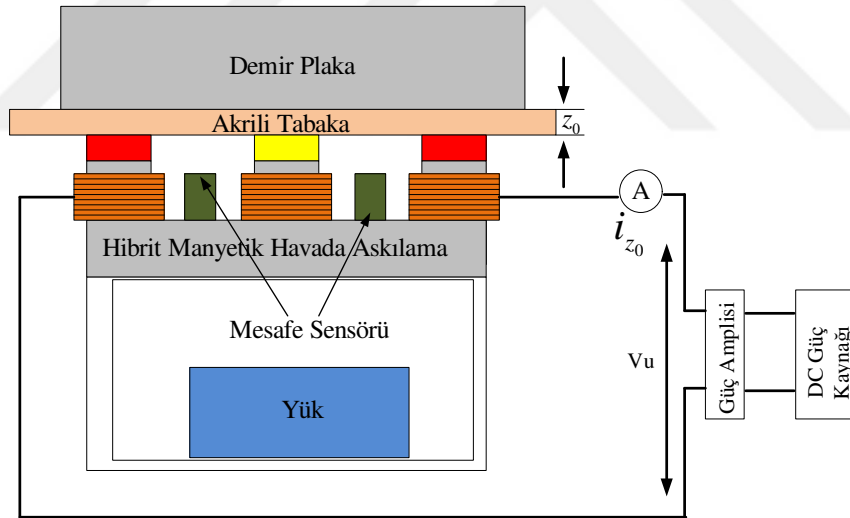


Şekil 3.25 Basamak Referans Girişi Akım Çıkışları, (A) 2 Faz Akımları, (B) 3 Faz Akımları

Bu bölümde artı tipli karma elektromıknatısın havada askılama deneysel çalışmaları, görüntü işleme çalışmaları ve taşıyıcı sistemin görüntü işleme ile doğrusal motor altında konum kontrolünün deneysel çalışmalarını anlatılmıştır.

4.1 Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Manyetik Havada Askılama Çalışmaları

Artı tipli karma elektromıknatısın havada askılama sistemi doğrusal motor altında kullanıldığı ve yapılan kabullerden dolayı bazı parametrelerinde modelden sapmalar görülmektedir. Dolayısıyla taşıyıcı sistemin havada askılanmasına ilişkin gerekli olan parametrelerin deneysel olarak elde edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.1 Artı Tipli Hibrit Elektromıknatısın Manyetik Havada Askılama Parametre Belirleme Düzenegi.

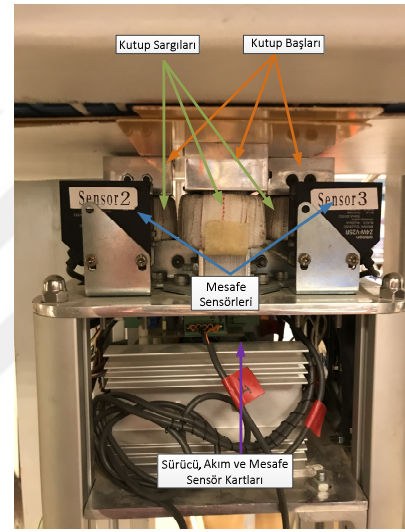
Şekil 4.1’de taşıyıcı sistem ile doğrusal motor arasında ölçüsü bilinen farklı kalınlıklarda akrili tabakalar yerleştirilmesiyle düşürme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.2’de deney düzenegi ve taşıyıcı sistem gösterilmiştir. Taşıyıcı sistemin havada askılama sistemi için Omron Z4F-W mesafe sensörleri, analog çıkış üreten LTS 15-

NP akım sensörleri, analog giriş ve çıkışlara sahip olan gerçek zamanlı bilgisayar olarak dSPACE1103 ve sürücü olarak OPA549-T yükselticiler kullanılmıştır.

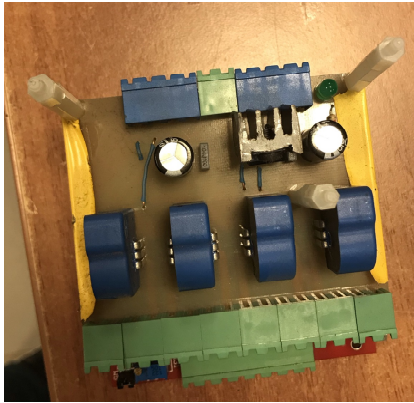
Mesafe sensörlerinin çıkışları akım çıkışlıdır. dSPACE girişleri voltaj olduğu için akım sinyallerini voltaj sinyaline çevirmek için 250 ohm direnç ve filtre kapasiteleri kullanılarak sensör arabirim baskı devre kartı oluşturulmuştur. Taşıyıcı sistemin havada askılama için gerekli olan kontrol algoritmaları Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş ve kontrolleri dSPACE üzerinden yapılmıştır.



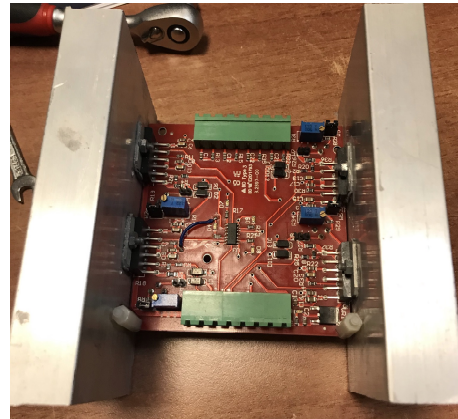
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2 Deney Düzeneği (a), Taşıyıcı Sistem (b), Akım Sensör (c), Sürücü Kartı (d)

Denklem 4.1’de verilen z eksenindeki elektomanyetik çekme kuvveti

$$f_z(z, i_z) = k \frac{(i_z + I_{pm})^2}{(z_0 + l_{pm})^2} \quad (4.1)$$

ile ifade edilmektedir. I_{pm} değeri sabit mıknatısın kalınlığına, I_{pm} ise sabit mıknatısın eşdeğer amper değerine eşittir. I_{pm} , k parametrelerinin $(z, i_z) = (z_0, i_{z_0})$ çalışma noktası için elde edilmesi gerekmektedir.

$$k \frac{(i_z + I_{pm})^2}{(z_0 + l_{pm})^2} = mg \quad (4.2)$$

$$i_{z_0} = \sqrt{\frac{mg}{k}} z_0 + l_{pm} \sqrt{\frac{mg}{k}} - I_{pm} \quad (4.3)$$

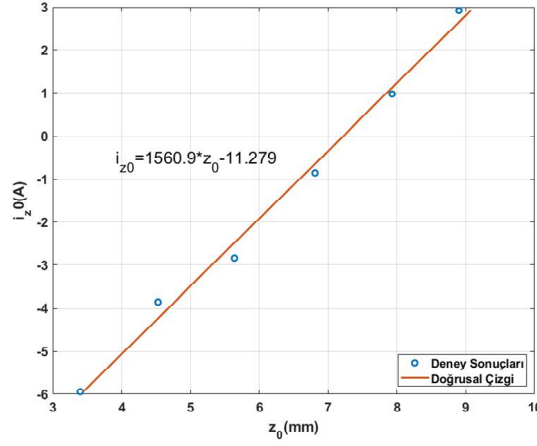
Akrilik tabaka kullanılarak yapılan düşürme deneyinde, çekme kuvvetinin temassız havada askılanan taşıyıcı sistemin ağırlığına eşit olduğu mesafelerdeki akım değerleri ölçülerek değerleri tablo haline getirilmiştir.

4.1.1 Gerilim Uyarımlı I-PD Kontrolör

Düşürme deneyi yapılarak Tablo 4.1 çıkarılmıştır. Tablo verileri Matlab *polyfit* fonksiyonu kullanılarak 1. dereceden eğri uydurma ile $k = 4.0264 \cdot 10^{-5}$ ve $I_{pm} = 19.86$ değerleri elde edilmiştir. i_z akımının 0 olduğu değere karşılık gelen z_0 noktası bulunmuş ve değerler denklem 4.2 kullanılarak K_A ve K_B değerleri bulunmuştur.

Tablo 4.1 Düşürme Deneyi Deneysel Sonuçları

Parametre	Değer (1)	Değer (2)	Değer (3)	Değer (4)	Değer (5)	Değer (6)
z_0 (mm)	3.40	4.53	5.64	6.81	7.93	8.90
i_{z_0} (A)	-5.94	-3.85	-2.84	-0.85	0.97	2.92



Şekil 4.3 Düşürme Deneyi Grafiği

Doğrusallaştırılmış modele ilişkin parametreler;

$$K_A = \frac{\partial f_z}{\partial z} \Big|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{2kI_{pm}^2}{(z_0 + l_{pm})^3} = 15425 (N / m)$$

$$K_B = \frac{\partial f_z}{\partial i_z} \Big|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{2kI_{pm}}{(z_0 + l_{pm})^2} = 9.88 (N / A)$$
(4.4)

bulunur. Açısal yerdeğiştirmelere ilişkin moment parametrelerinin doğrudan ölçümü oldukça zordur. Bu değerler 3B sonlu elemanlar analiz sonuçlarından bulunmuştur.

$$K_C = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\partial T_\alpha(\theta, 0)}{\partial \theta} \cong 79.28 (Nm / rad)$$

$$K_D = \lim_{i_\alpha \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial i_\alpha} \left\{ \lim_{\theta \rightarrow 0} T_\alpha(\theta, i_\alpha) \right\} \cong 2.38 (Nm / A)$$
(4.5)

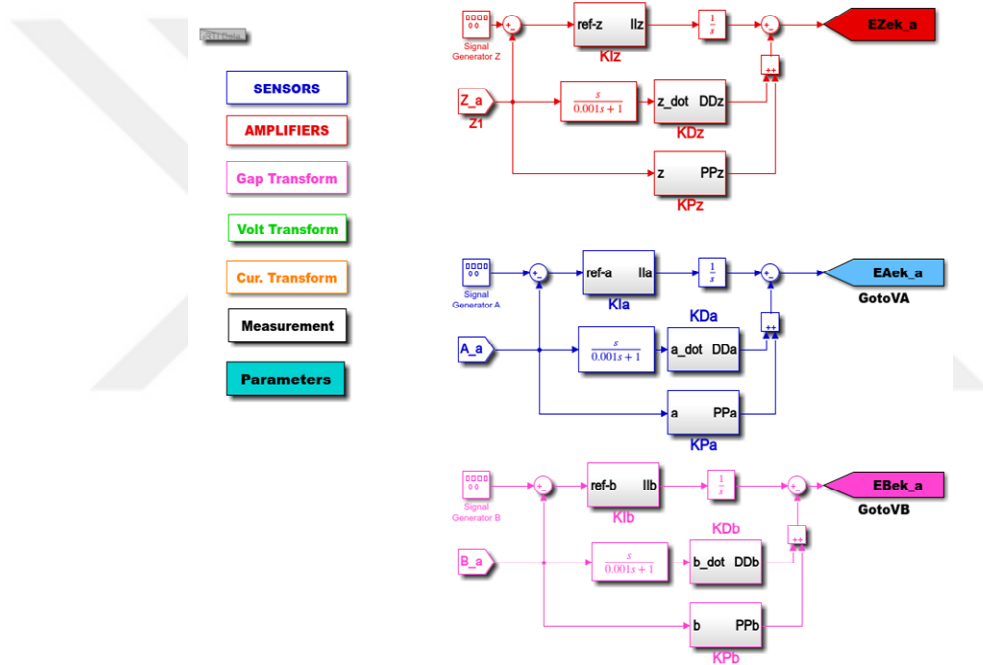
Tablo 4.2 Artı Kutuplu Elektromıknatısın Parametreleri

Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer
m [kg]	10.00	z ₀ [mm]	7.2	α ₀ , β ₀ [rad]	0.00
Jα, β [kg.m ²]	0.30	i _{z0} [A]	0.00	iα ₀ , iβ ₀ [A]	0.00
S [A ²]	12*10 ⁻⁴	K _A [N/m]	15425	K _C [Nm/rd]	79.28
β [AT/N]	19.85	K _B [N/A]	9.88	K _D [Nm/A]	2.38
Rz, α, β [Ω]	1.00	L _{z, α, β} [H]	0.016	E _{pm} [AT]	3970

Deneyisel olarak hesaplanan K_A ve K_B parametrelerine göre kontrolör parametreleri denklem 2.22 kullanarak yeniden hesaplanmış ve yapılan ihmallere ve sistemin daha kararlı (robust) olması için küçük kalibrasyonlar yapılarak nihai parametreler bulunmuştur. Tablo 4.3’ de I-PD parametreleri verilmiştir.

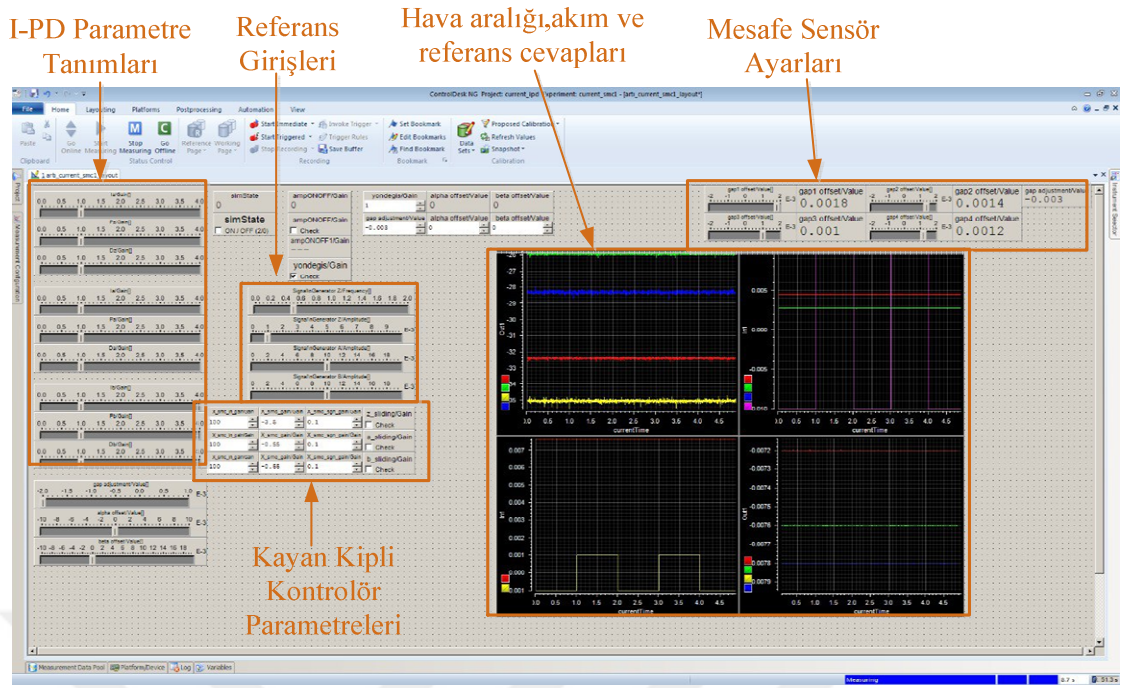
Tablo 4.3 I-PD Kontrolör Katsayıları

K_{p_z}	K_{d_z}	K_{i_z}	K_{p_α}	K_{d_α}	K_{i_α}	K_{p_β}	K_{d_β}	K_{i_β}
2055	87	5774	268	13	882	215	13	882



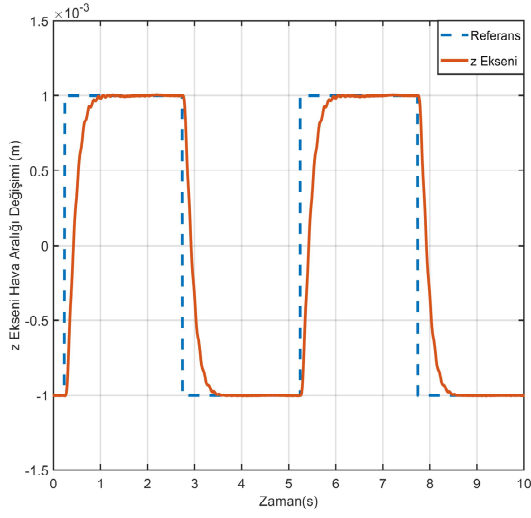
Şekil 4.4 Gerilim Uyarımlı I-PD Simulink Ana Ekranı

Şekil 4.4’te manyetik havada askılama sisteminin simulink ana ekranı verilmiştir. 3 ekseninde kontrolünün yapılması için z , α ve β eksenlerinde gerilim çıkışlı I-PD kontrolörleri tasarlanmıştır. Referans girişleri periyodik işaret üreten bloklar ile sağlanmıştır. Sensörlerden gelen verilerin elde edilmesi için “sensors” alt bloğu oluşturulmuştur. Şekil 4.5’te sensors bloğun içyapısı verilmiştir.

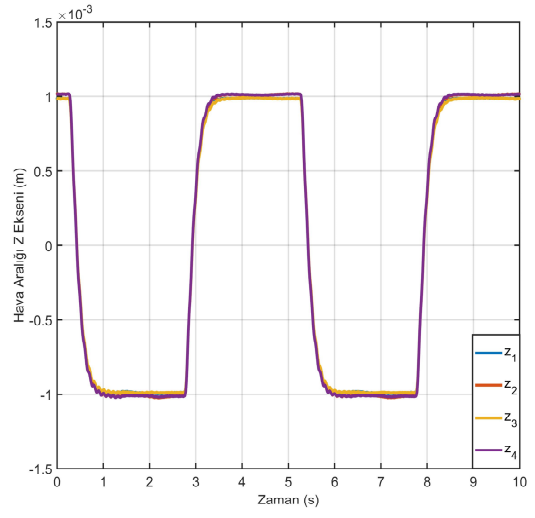


Şekil 4.7 dSPACE Control Desk Kontrol Arayüzü

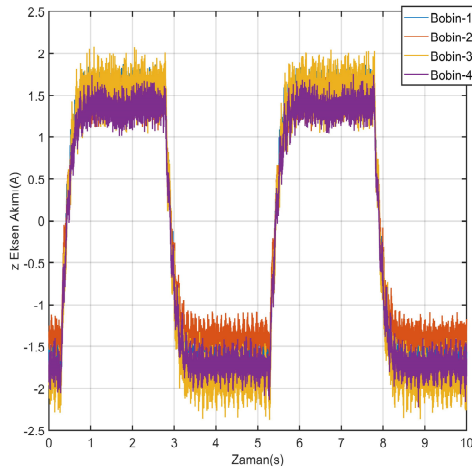
Z ekseninde ± 1 mm basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyarım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.8 saniyede üst aşımız olarak referans takibi yapmaktadır.



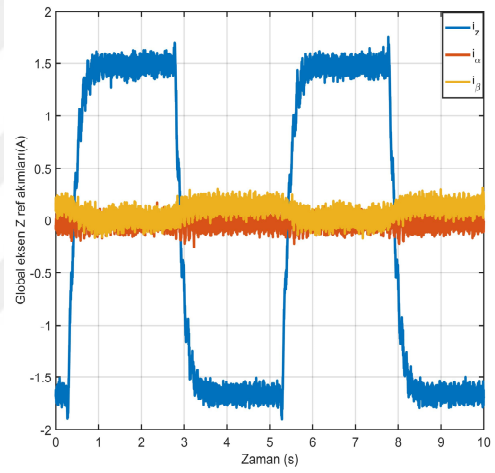
(a)



(b)



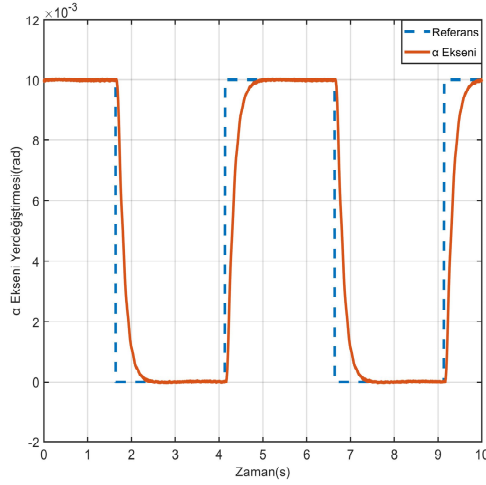
(c)



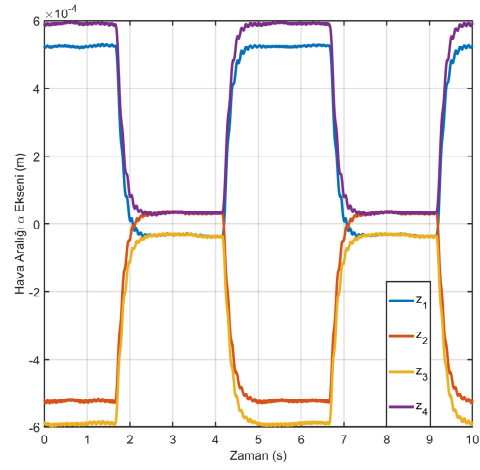
(d)

Şekil 4.8 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

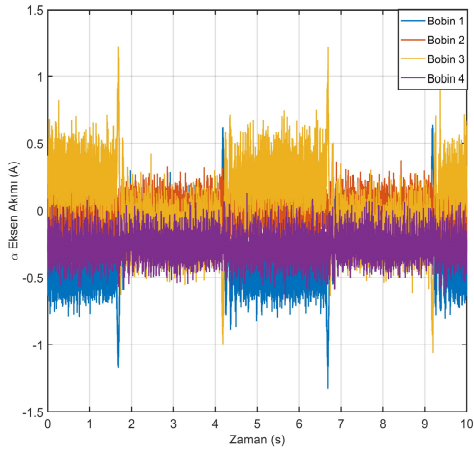
α ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyarım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.85 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



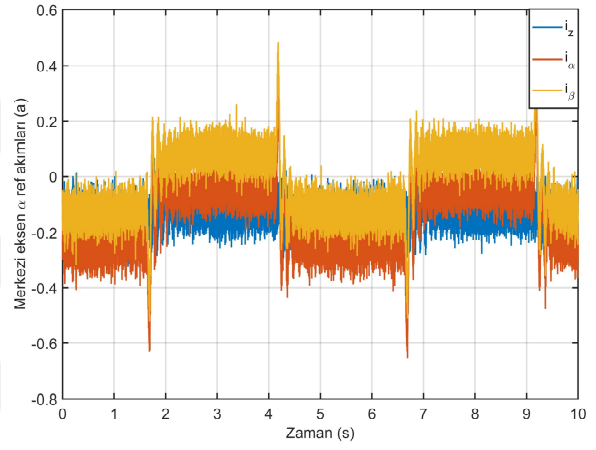
(a)



(b)



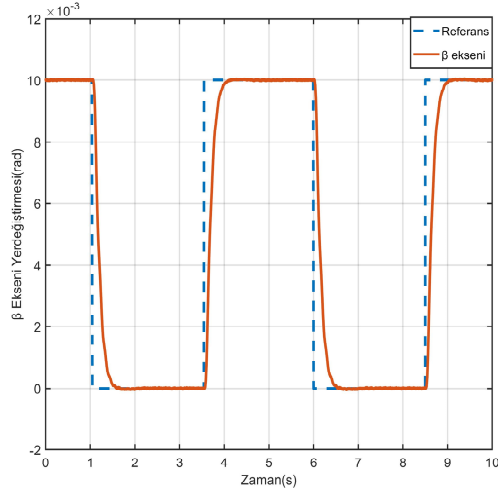
(c)



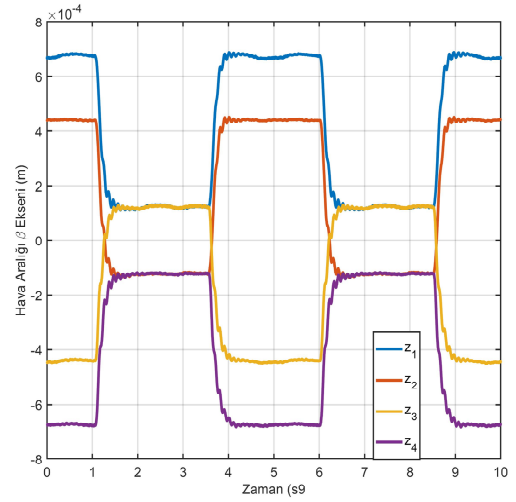
(d)

Şekil 4.9 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

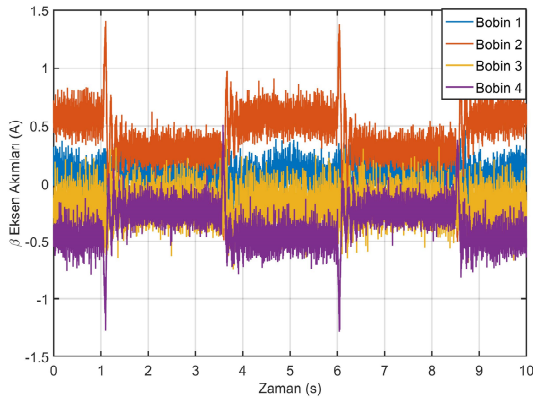
β ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyarım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.85 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



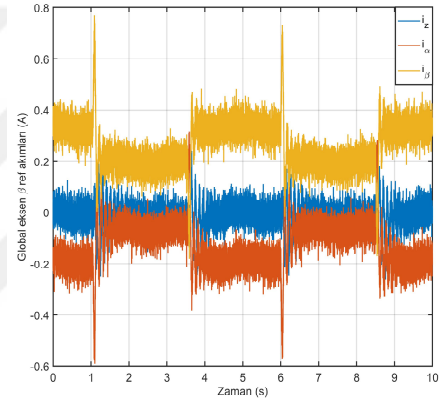
(a)



(b)



(c)

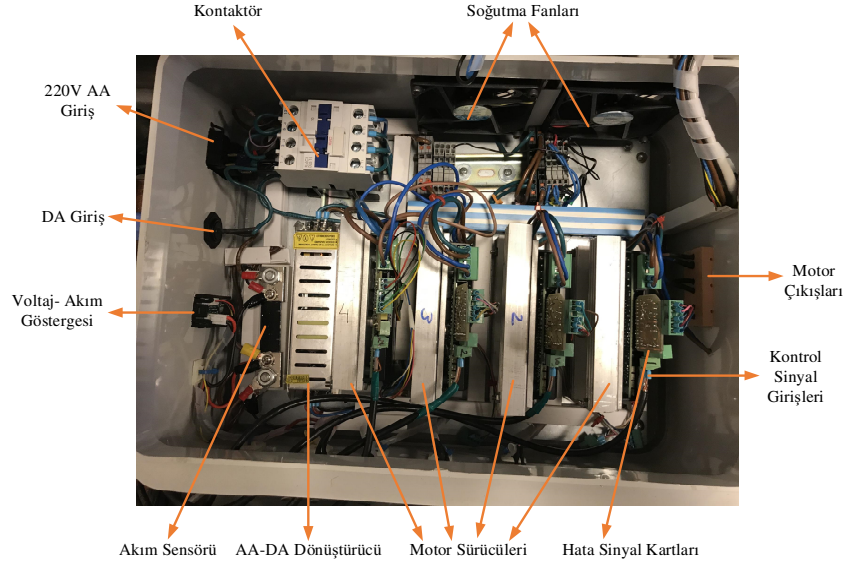


(d)

Şekil 4.10 β Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

4.1.2 Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör

Gerilim uyarımlı I-PD kontrolör için kullanılan sürücü kartları akım çıkışı vermemektedir. Bunun için sürücü kartlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Sürücü kartı olarak Advanced Motion Control firmasının A25A100 sürücülerini kullanılmıştır. Şekil 4.11’de sürücü panosu verilmiştir.

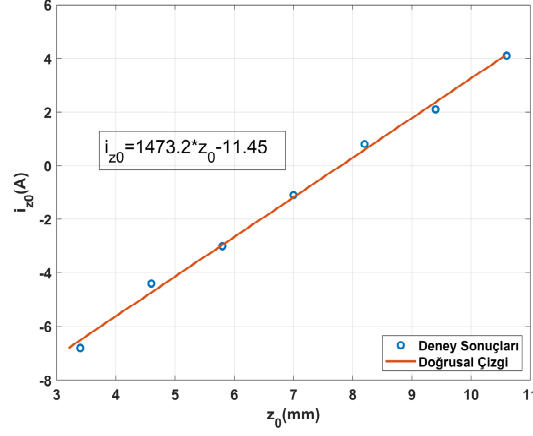


Şekil 4.11 Akım Uyarıtım Sürücü Panosu

Düşürme deneyi yapılarak Tablo 4.4 elde edilmiştir. Tablo verileri, Matlab *polyfit* O fonksiyonu kullanılarak 1. dereceden eğri uydurma ile $k = 3.39 \cdot 10^{-5}$ ve $I_{pm} = 18.13$ değerleri elde edilmiştir. i_z akımının 0 olduğu değere karşılık gelen z_0 noktası bulunmuş ve değerler denklem 4.2 kullanılarak K_A ve K_B değerleri bulunmuştur.

Tablo 4.4 Çekme Kuvveti Deneysel Sonuçları

Parametre	Değer (1)	Değer (2)	Değer (3)	Değer (4)	Değer (5)	Değer (6)	Değer (7)
z_0 (mm)	3.40	4.60	5.80	7.00	8.20	9.40	10.60
i_{z_0} (A)	-6.80	-4.40	-3.00	-1.1	0.80	2.10	4.10



Şekil 4.12 Düşürme Deneyi Grafiği

Doğrusallaştırılmış modele ilişkin parametreler;

$$K_A = \left. \frac{\partial f_z}{\partial z} \right|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{2kI_{pm}^2}{(z_0 + l_{pm})^3} = 12481 (N / m) \quad (4.6)$$

$$K_B = \left. \frac{\partial f_z}{\partial i_z} \right|_{(z_0, i_{z_0})} = \frac{2kI_{pm}}{(z_0 + l_{pm})^2} = 7.95 (N / A)$$

şeklinde bulunmuştur. Açısal yerdeğiştirmelere ilişkin moment parametrelerinin doğrudan ölçümü oldukça zordur. Bu değerler 3B sonlu elemanlar analiz sonuçlarından bulunmuştur.

$$K_C = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\partial T_\alpha(\theta, 0)}{\partial \theta} \cong 40 (Nm / rad) \quad (4.7)$$

$$K_D = \lim_{i_\alpha \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial i_\alpha} \left\{ \lim_{\theta \rightarrow 0} T_\alpha(\theta, i_\alpha) \right\} \cong 0.5 (Nm / A)$$

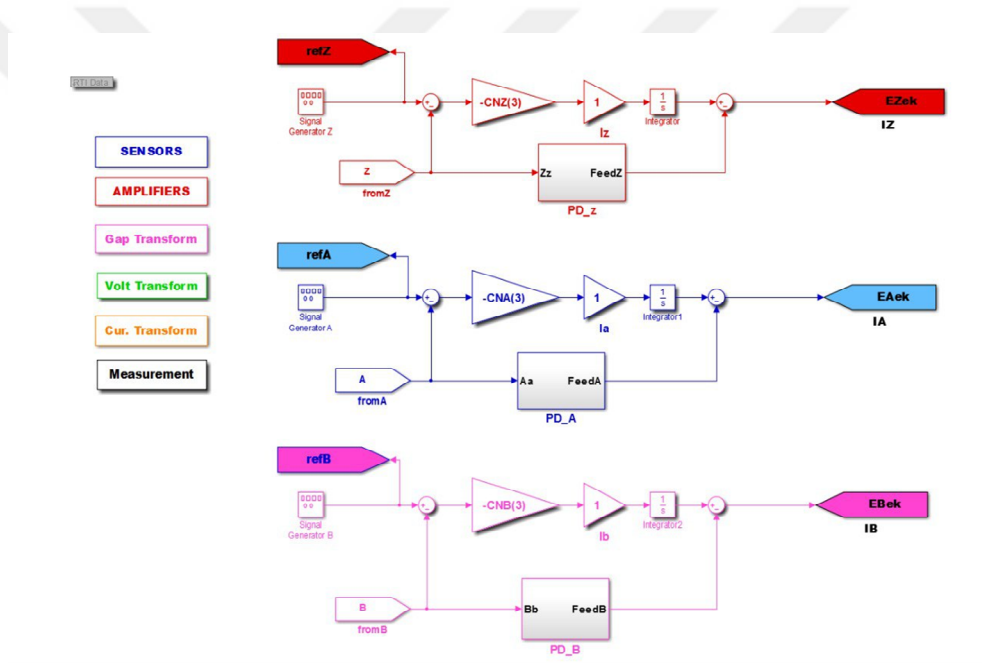
Tablo 4.5 Artı Kutuplu Elektromıknatısın Parametreleri

Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer	Büyüklik/Birim	Değer
m [kg]	10.00	z ₀ [mm]	7.8	α ₀ , β ₀ [rad]	0.00
Jα, β [kg.m ²]	0.30	i _{z0} [A]	0.00	i _{α0} , i _{β0} [A]	0.00
S [A ²]	12*10 ⁻⁴	K _A [N/m]	12481	K _C [Nm/rd]	40
β [AT/N]	18.13	K _B [N/A]	7.95	K _D [Nm/A]	0.5
Rz, α, β [Ω]	1.00	L _{z, α, β} [H]	0.016	E _{pm} [AT]	3626

Yeni hesaplanan K_A ve K_B parametrelerine göre kontrolör parametreleri yeniden hesaplanmış ve yapılan ihmaller ve sistemin daha kararlı (robust) olması için küçük kalibrasyonlar yapılarak nihai parametreler bulunmuştur. Tablo 4.6' da I-PD parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.6 I-PD Kontrolör Katsayıları

K_{p_z}	K_{d_z}	K_{i_z}	K_{p_α}	K_{d_α}	K_{i_α}	K_{p_β}	K_{d_β}	K_{i_β}
6287	94	94340	1080	20	20000	1080	20	20000

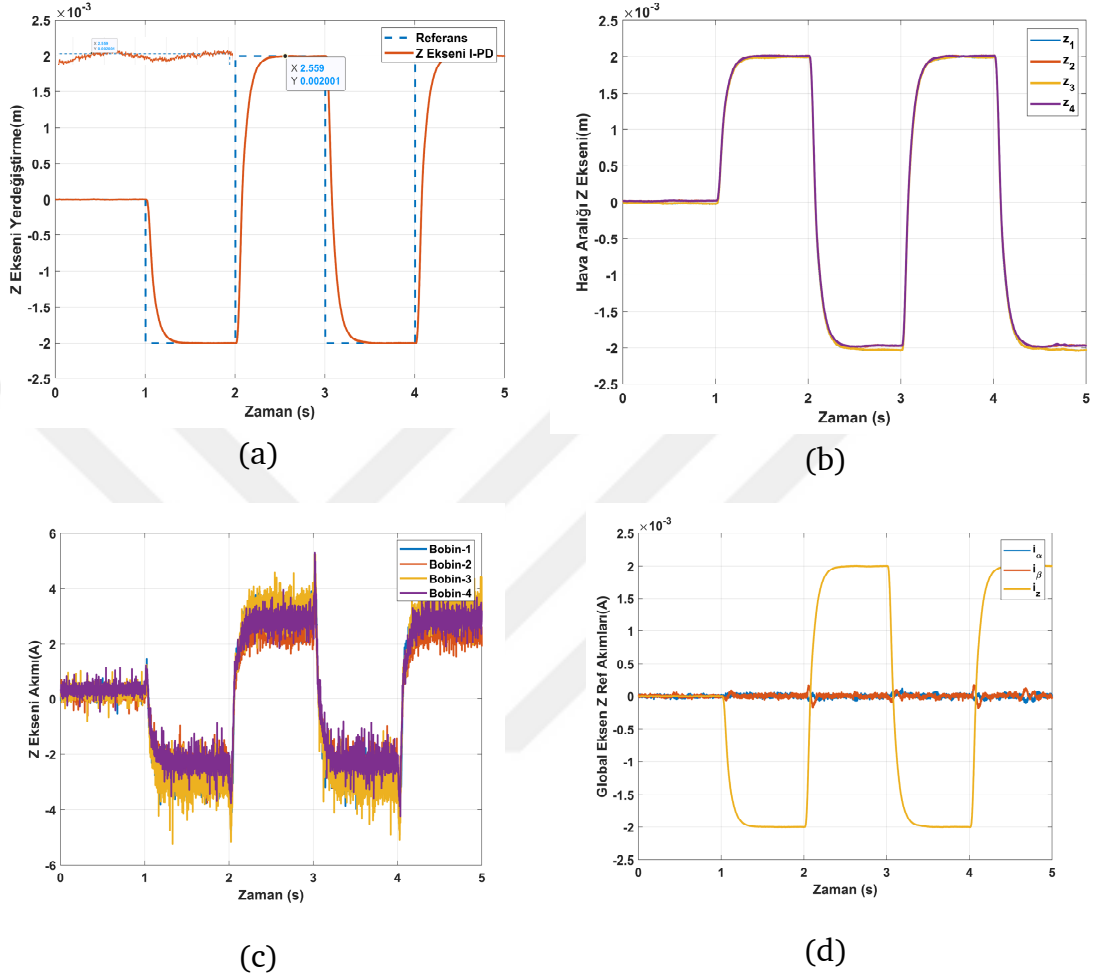


Şekil 4.13 Akım Uyarımlı I-PD Kontrolör Ana Ekranı

Şekil 4.13'te manyetik havada askılama sisteminin simulink ana ekranı verilmiştir. 3 ekseninde kontrolünün yapılması için z α β eksenlerinde akım çıkışlı I-PD kontrolörleri tasarlanmıştır. Gerilim uyarımlı I-PD (4.1.1) bölümünde diğer alt bloklar anlatıldığı için tekrar anlatılmamıştır.

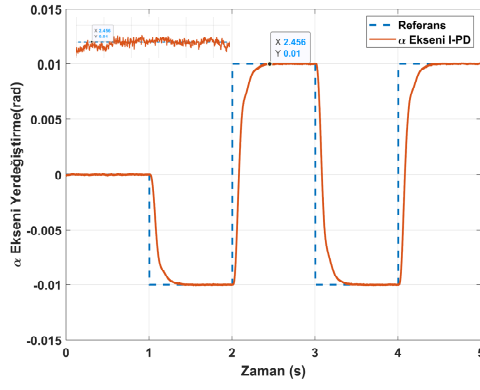
Z ekseninde ± 2 mm basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyarım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına

dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.14'de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.559 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.

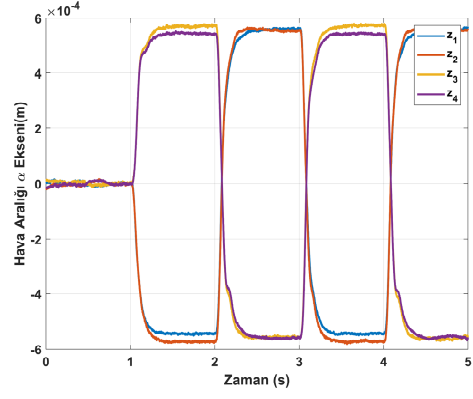


Şekil 4.14 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

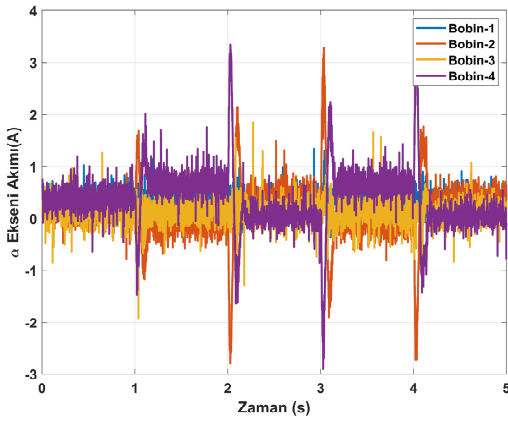
α ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksenî referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.15'de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.456 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



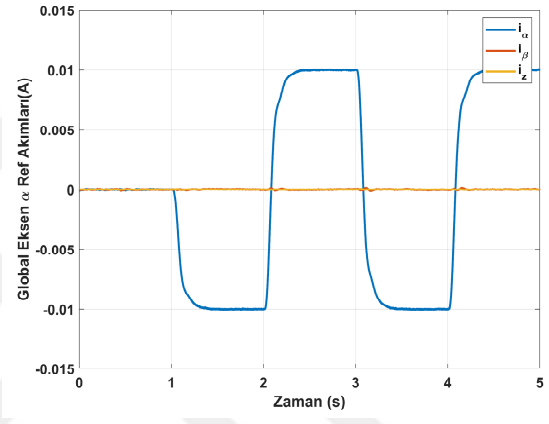
(a)



(b)



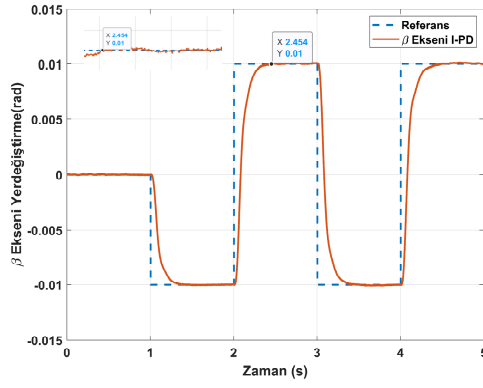
(c)



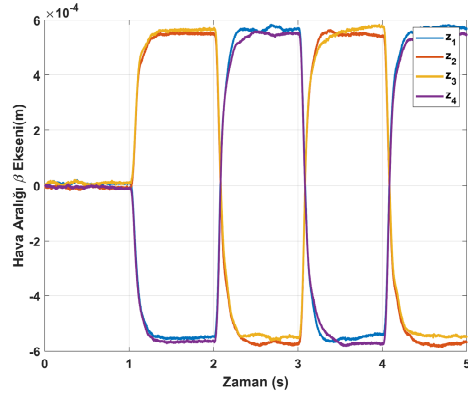
(d)

Şekil 4.15 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

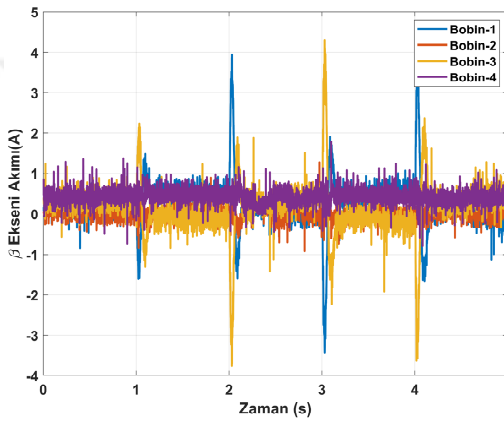
β ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyarım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.454 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



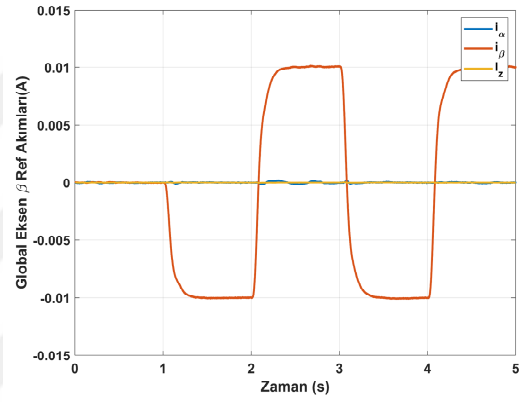
(a)



(b)



(c)

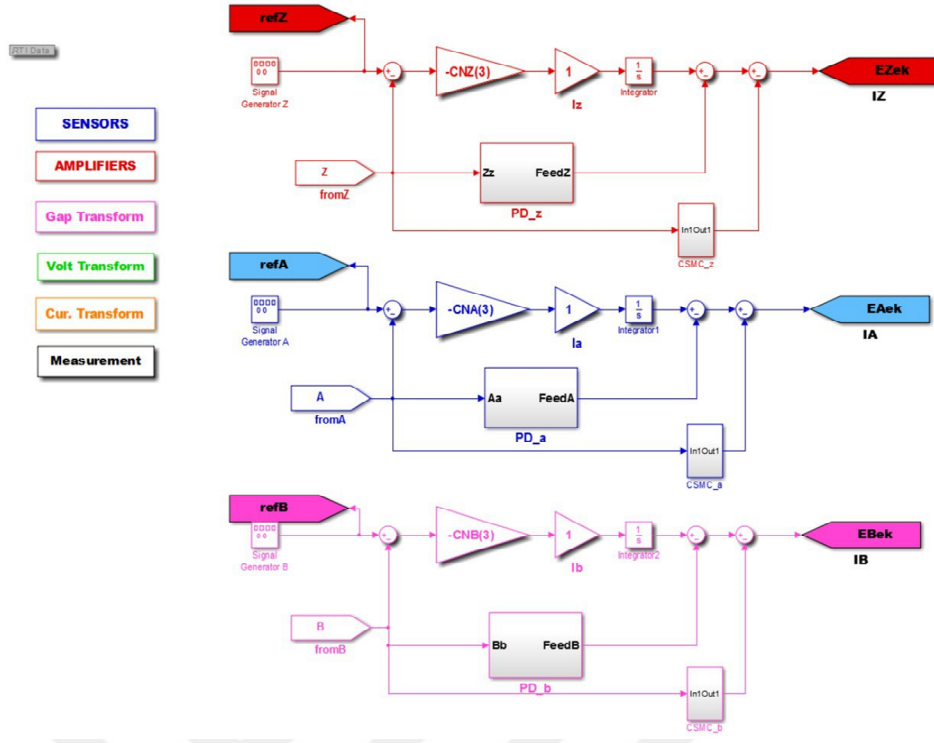


(d)

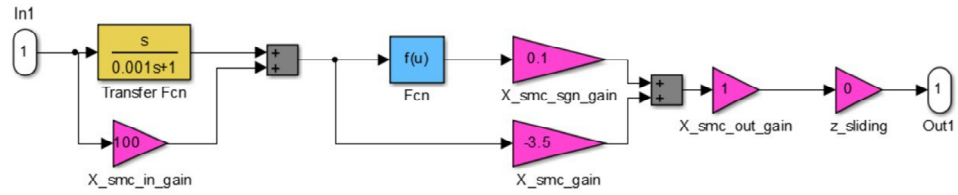
Şekil 4.16 β Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

4.1.3 Akım Uyarımlı Klasik Kayan Kipli Kontrolör (CSMC)

Artı tipli hibrit manyetik havada askılama sisteminin akım uyarımlı I-PD kontrolörle birlikte tasarlanan klasik kayan kipli kontrolörün Simulink ekranı ve kontrolörün iç yapısı Şekil 4.17’de ve kontrolör parametreleri Tablo 4.7’de verilmiştir.



(a)



(b)

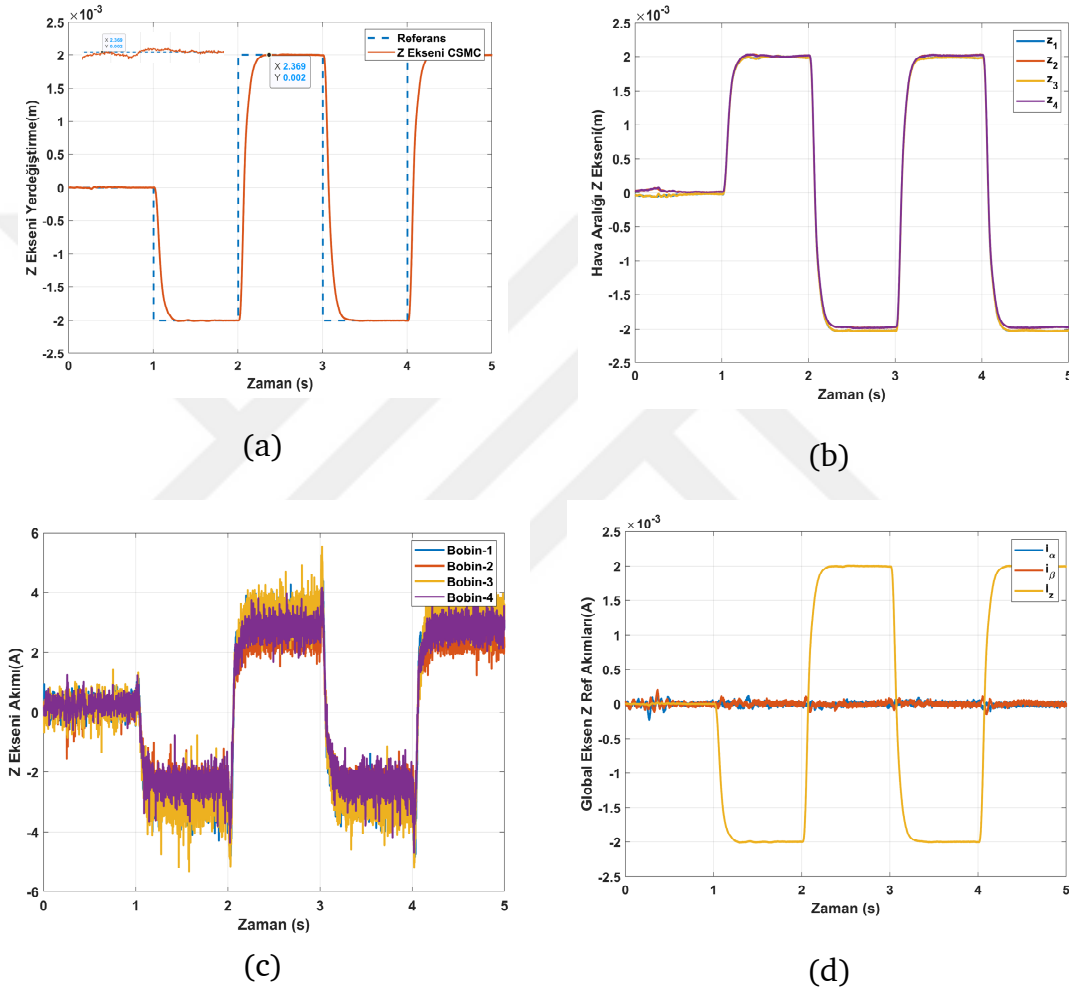
Şekil 4.17 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), CSMC_z Bloğunun İçyapısı (b)

z_sliding çarpanı dSPACE arayüzünden çıkışların kontrolü için kullanılmıştır. α ve β eksenlerinde kontrol yapısı aynı olduğu için tekrar verilmemiştir.

Tablo 4.7 Klasik Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

λ_c	k_1	k_2	$\mathcal{E}$
100	-3.5	0.1	0.005

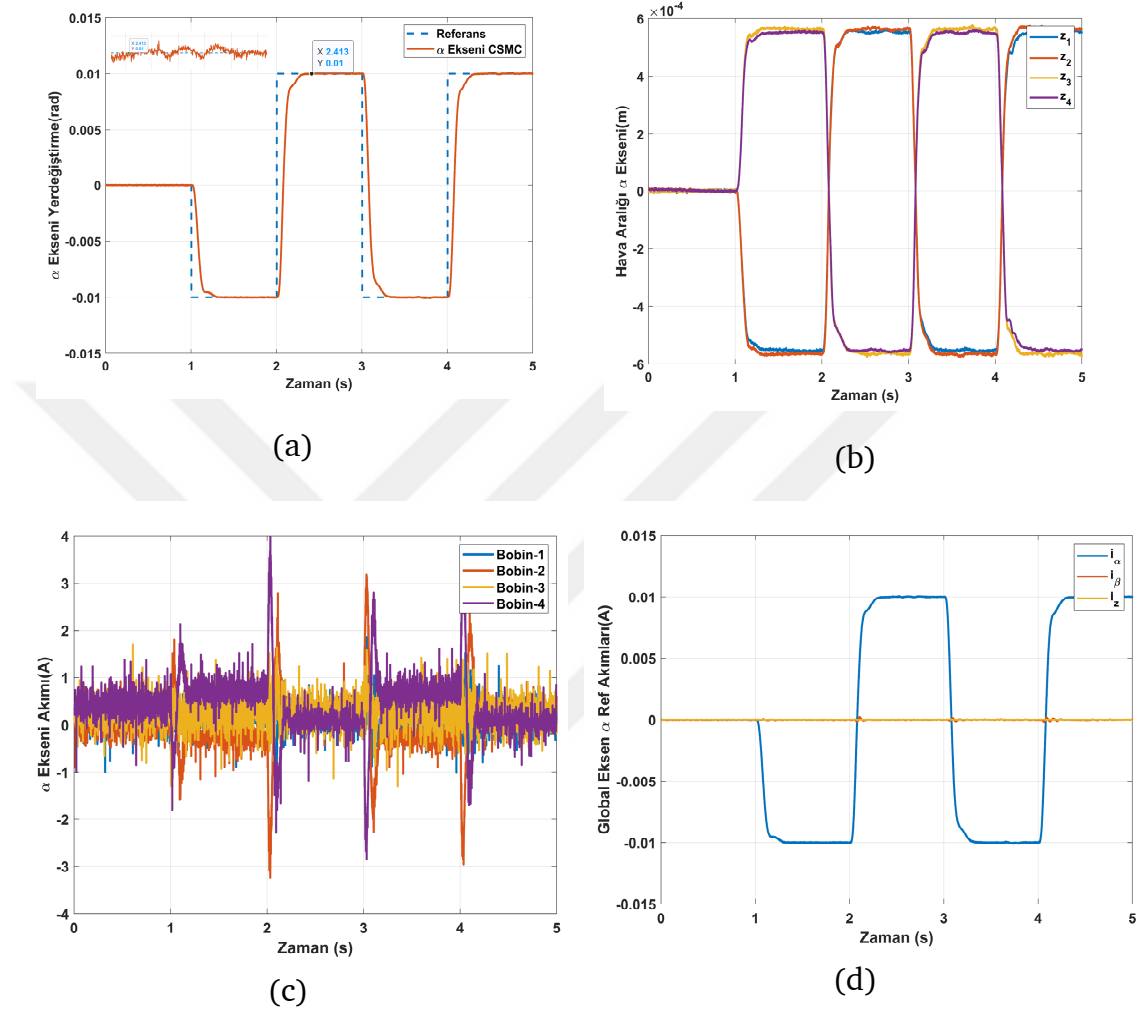
Z ekseninde ± 2 mm basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.369 saniyede üst aşımız olarak referans takibi yapmaktadır.



Şekil 4.18 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

α ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına

dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.19'da verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.413 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.

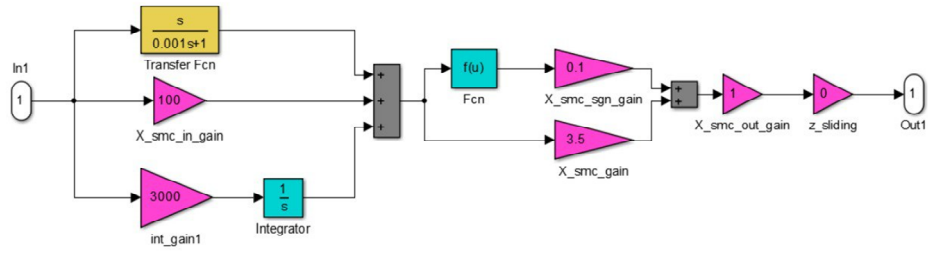
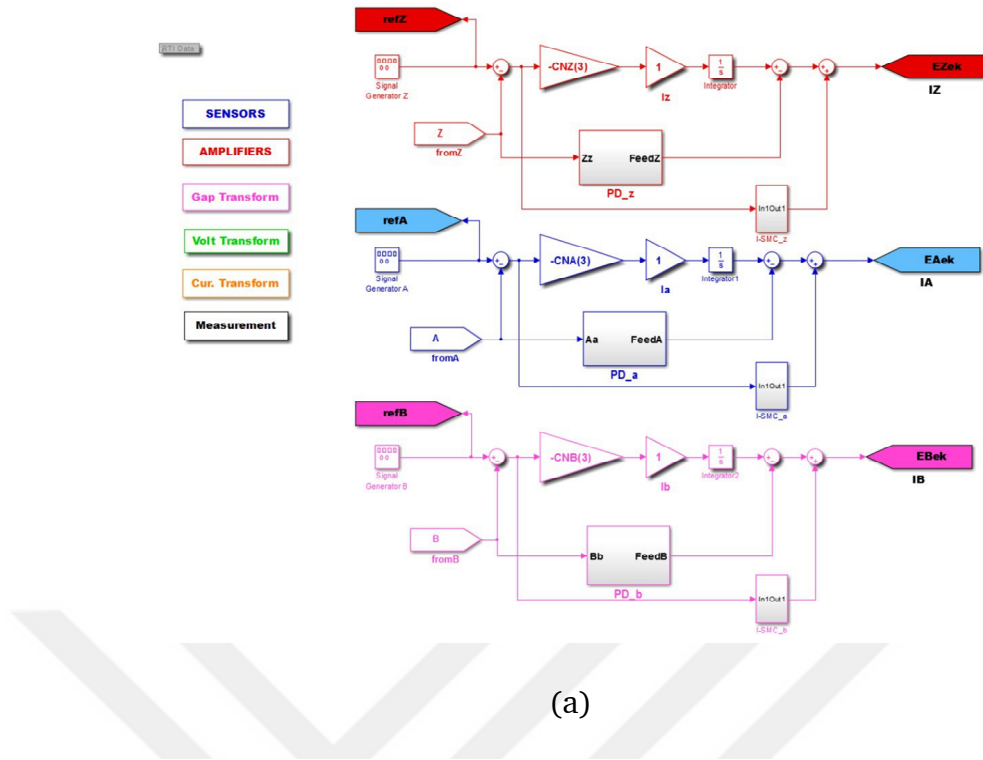


Şekil 4.19 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

Akım uyarımlı I-PD kontrolöründe olduğu gibi β eksen α ekseninin simetriyidir. O yüzden sonuçları verilmemiştir.

4.1.4 Akım Uyarımlı İntegral Kayan Kipli Kontrolör (I-SMC)

Artı tipli hibrit manyetik havada askılama sisteminin akım uyarımlı I-PD kontrolörle birlikte tasarlanan integral kayan kipli kontrolörün Simulink ekranı ve kontrolörün içyapısı Şekil 4.20'de ve kontrolör parametreleri Tablo 4.8'de verilmiştir.



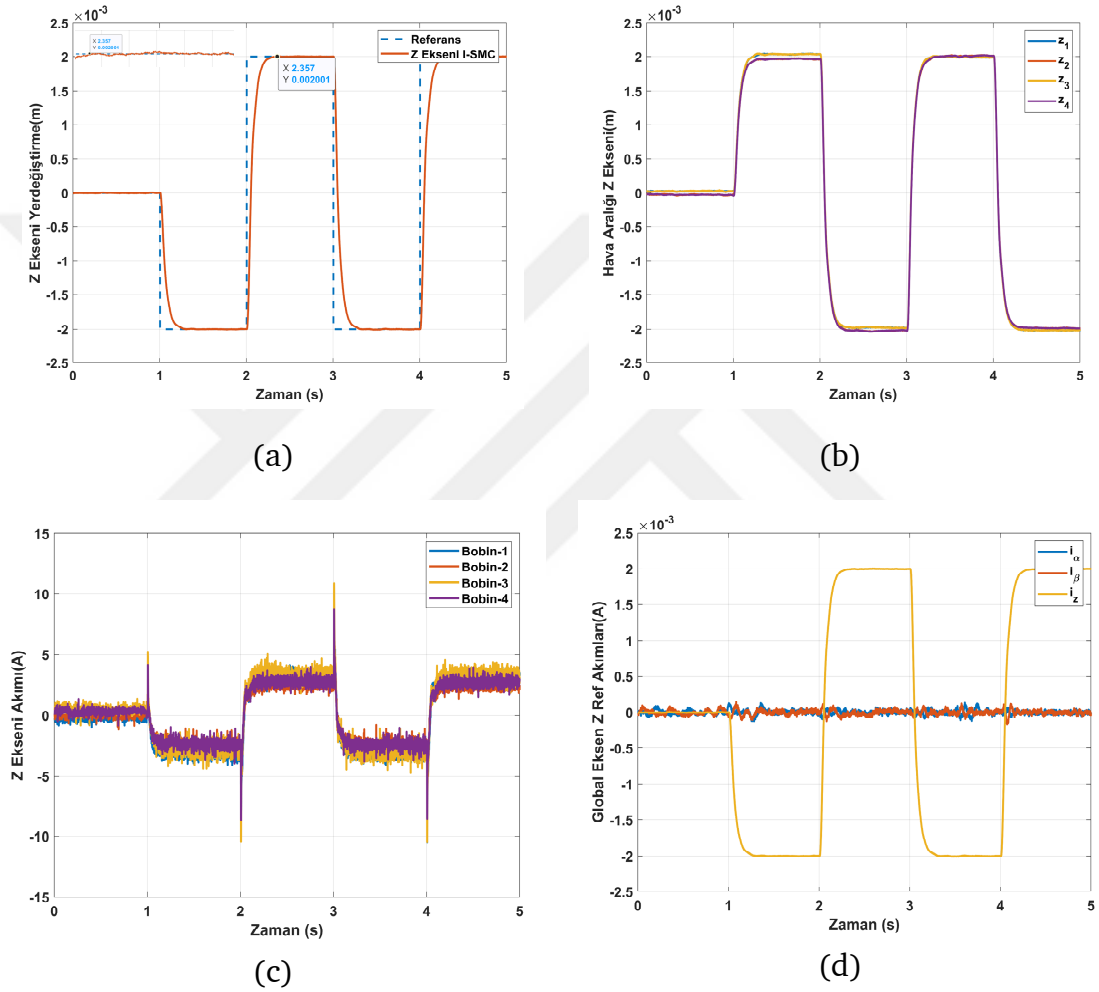
Şekil 4.20 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), Kontrolör İçyapısı (b)

α ve β eksenlerinin de kontrol yapısı z eksenıyla aynı olduğu için blok içyapıları tekrar verilmemiştir.

Tablo 4.8 İntegral Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

λ_c	k_1	k_2	k_3	$\mathcal{E}$
100	3.5	0.1	3000	0.005

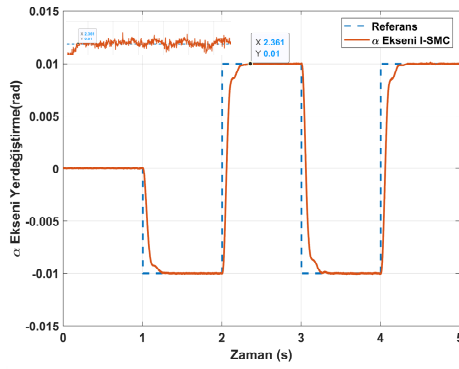
Z ekseninde ± 2 mm basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.21’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.357 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



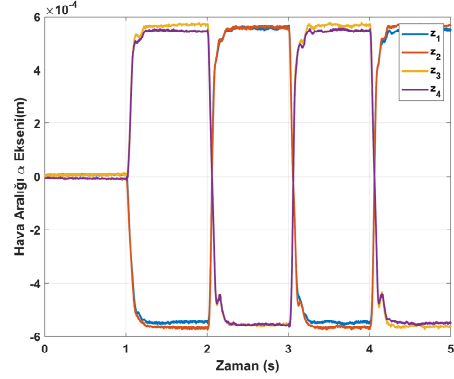
Şekil 4.21 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

α ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına

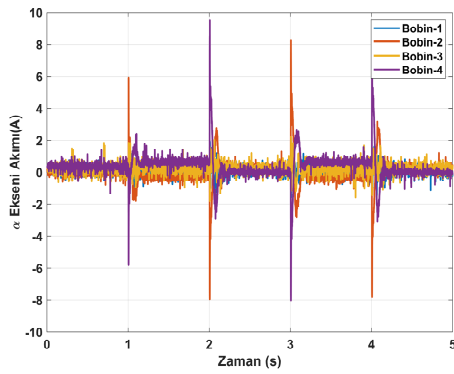
dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.361 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



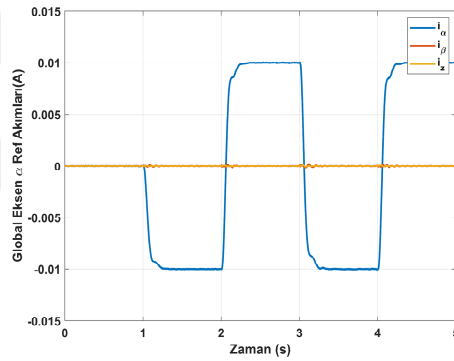
(a)



(b)



(c)



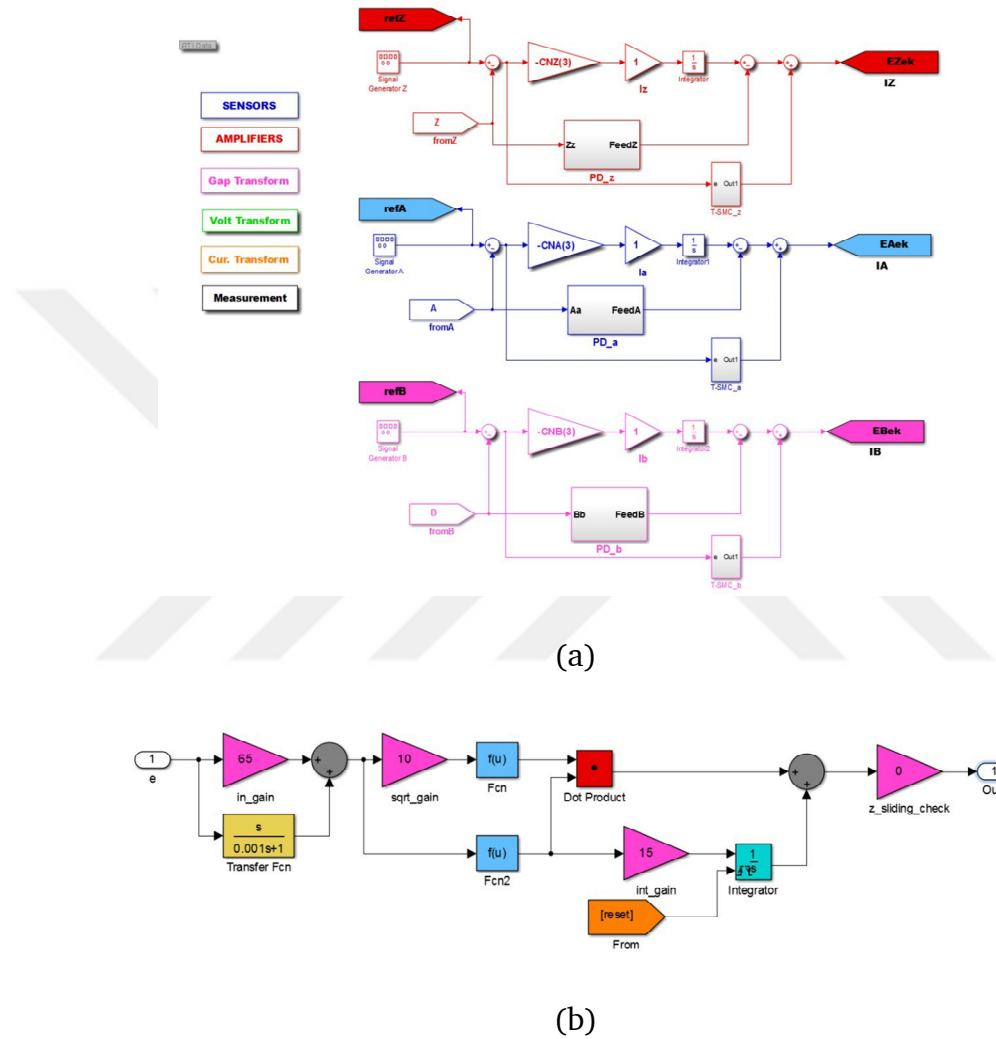
(d)

Şekil 4.22 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

Akım uyarımlı I-PD kontrolöründe olduğu gibi β eksen ve α eksen simetrikler. O yüzden sonuçları verilmemiştir.

4.1.5 Akım Uyarımlı Burulma Kayan Kipli Kontrolör (T-SMC)

Artı tipli hibrit manyetik havada askılama sisteminin akım uyarımlı I-PD kontrolörle birlikte tasarlanan burulma kayan kipli kontrolörün Simulink ekranı ve kontrolör içyapısı Şekil 4.23'te ve kontrolör parametreleri Tablo 4.9'da verilmiştir.

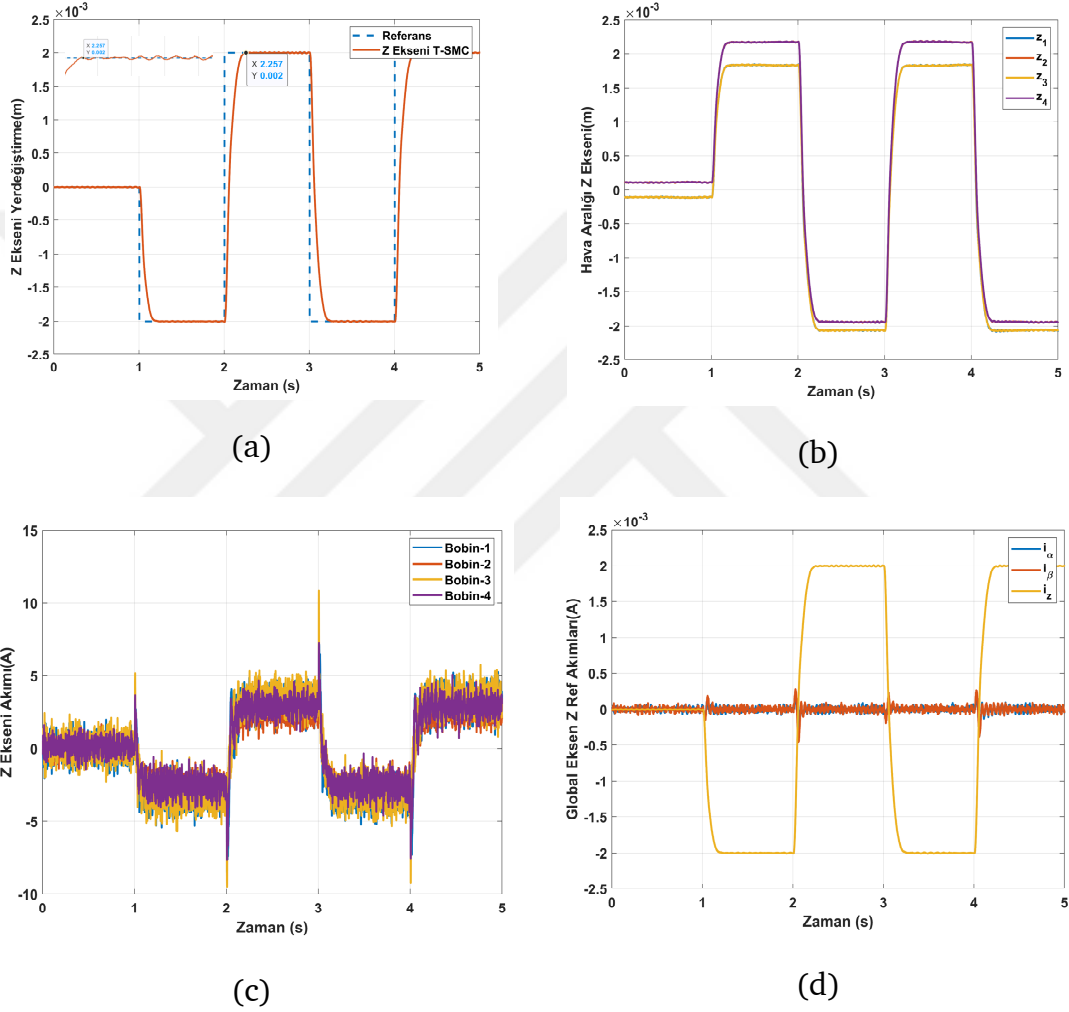


Şekil 4.23 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Simulink Ekranı (a), Kontrolör İçyapısı (b)

Tablo 4.9 Burulma Kayan Kipli Kontrolör Parametreleri

λ_c	k_1	k_2	$\mathcal{E}$
65	10	15	0.005

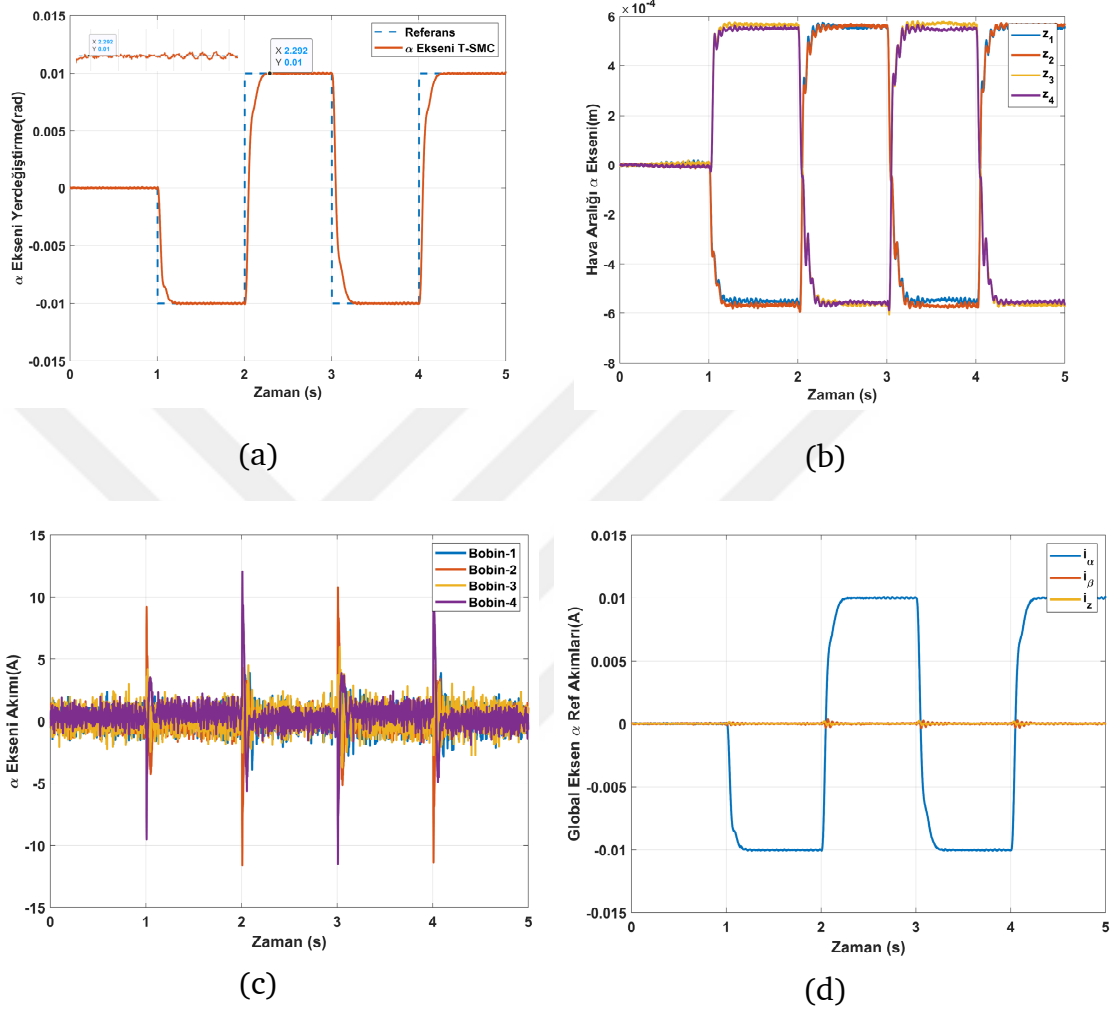
Z ekseninde ± 2 mm basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.24’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.257 saniyede üst aşımızsız olarak referans takibi yapmaktadır.



Şekil 4.24 Z Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

α ekseninde 0.01 rad basamak referans verildiğinde sistemin referans takibi ve her bir kutup başının ölçülen hava aralığı değerleri, Z eksen referans takibi süresince bobin uyartım akımları ölçüm değerleri ve bu akımların merkezi eksen akımlarına

dönüştürüldüğünde elde edilen akım değerleri Şekil 4.25’de verilmiştir. Sistem yaklaşık olarak 0.292 saniyede üst aşısız olarak referans takibi yapmaktadır.



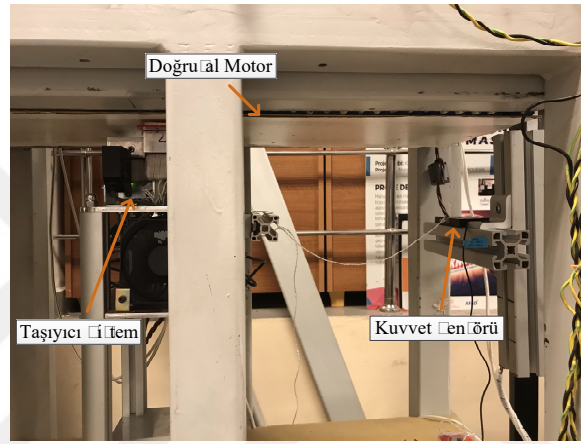
Şekil 4.25 α Referans Takibi (a), Hava Aralığı Ölçümleri (b), Bobin Akım Ölçümleri (c), Merkezi Eksen Akımları (d)

Akım uyarımlı I-PD kontrolöründe olduğu gibi β eksen α ekseninin simetriyidir. O yüzden sonuçları verilmemiştir.

4.2. Artı Tipli Karma Elektromıknatisin Doğrusal Motor ile Birlikte Çalışmaları

4.2.1 Doğrusal Motor Kuvvet Kazancı Deney Düzeneği

Doğrusal motorun kontrolü için ilk olarak motor kuvvet kazancının bulunması gerekmektedir. Kuvvet ölçümleri için deney düzeği oluşturulmuştur. Şekil 4.26’ da taşıyıcı sistem ip yardımı ile kuvvet sensörüne bağlanmıştır. Taşıyıcı sistem havada askılanmış ve farklı i_q akımları vererek kuvvet ölçümleri yapılmış ve Tablo 4.10’da sonuçlar verilmiştir.

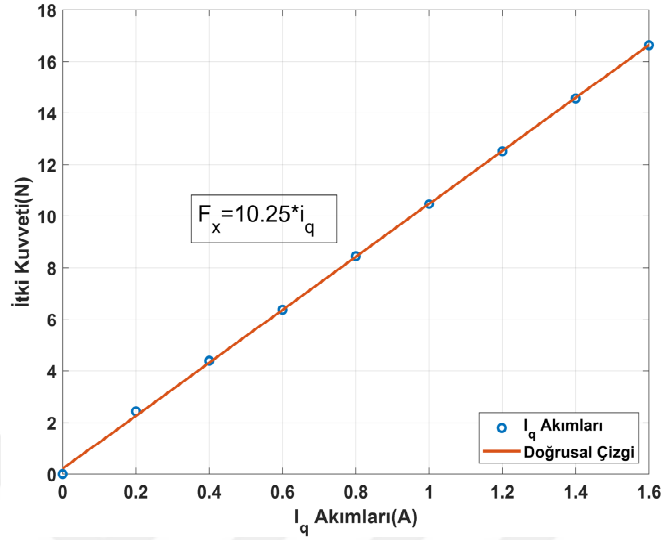


Şekil 4.26 Doğrusal Motor Kuvvet Kazancı Ölçümü Deney Düzeneği

Tablo 4.10 Kuvvet Akım İlişkisi

Akım(i_q)	Kuvvet(N)
0	0
0.2	2.44
0.4	4.39
0.6	6.38
0.8	8.45
1	10.47
1.2	12.52
1.4	14.56
1.6	16.64

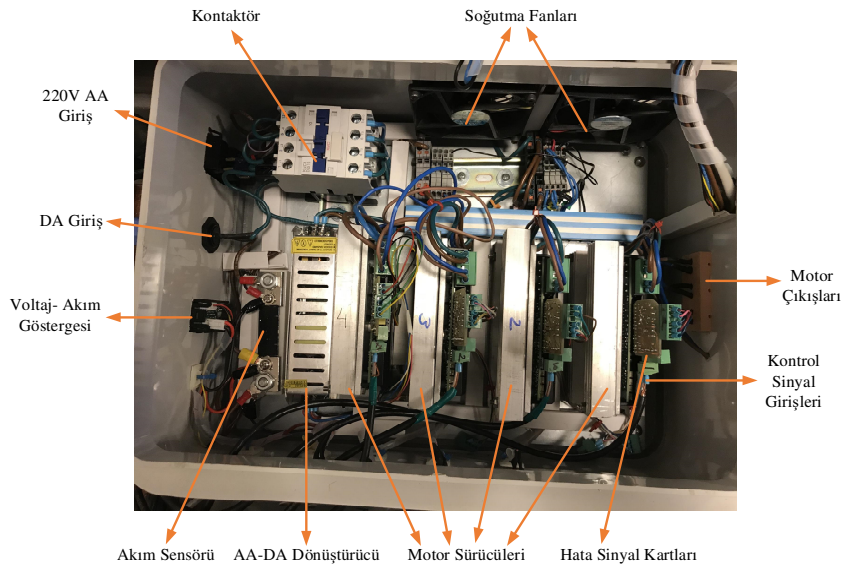
Oluşturulan doğrusal motorun itki kuvvet kazancı (K) doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Doğrusal eğri denklemi MATLAB *polyfit()* fonksiyonu kullanarak kuvvet kazancı bulunmuştur. Şekil 4.27' de sonuçlar verilmiştir.



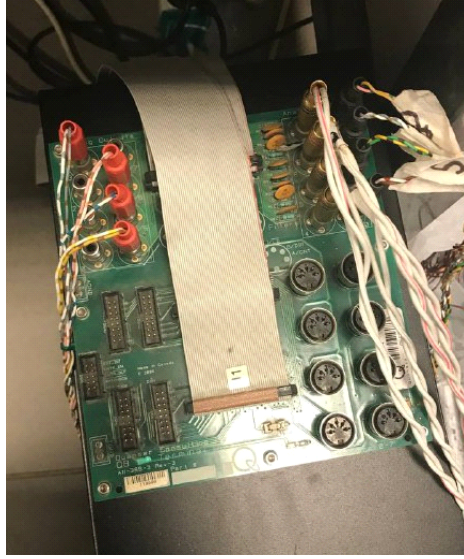
Şekil 4.27 Yatay Eksende Hareketine İlişkin Kuvvet Akım Grafiği

4.2.2 Doğrusal Motor Görüntü İşleme ile Konum Kontrolü

Doğrusal motorun konum bilgisinin alınması için Omron E4C-DS100 ultrasonik mesafe sensörü, uyarım akımları için Advanced Motion Control A25A100 motor sürücüler, kontrol kartı olarak Quanser Q8 DAC kontrol kartı kullanılmıştır.

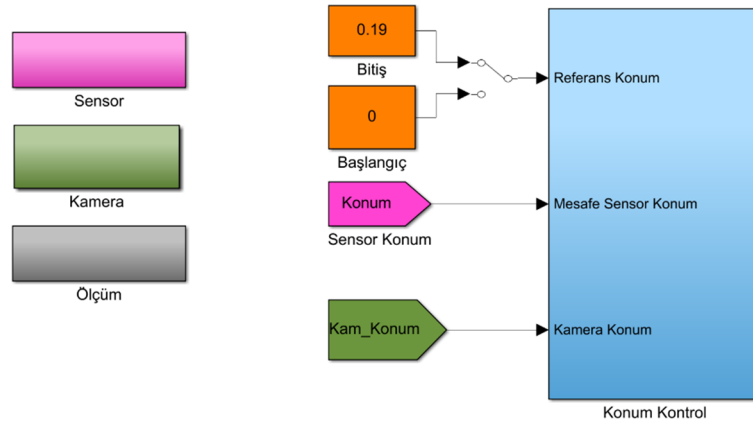


Şekil 4.28 Motor Sürücü Panosu



Şekil 4.29 Quanser Q8 Kontrol Kartı

Quanser Q8 kontrol kartı Matlab üzerinden programlanarak, deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ana çalışmanın Simulink modeli Şekil 4.30’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 Matlab Simulink Ana Çalışma Ekranı

Ana çalışma ekranında mesafe sensörü için sensor alt bloğu, kameradan görüntü işleme ile konum bulmak için kamera alt bloğu, kontrolörlerin ve motor çıkışlarının olduğu konum kontrol bloğu ve ölçümlerin kayıt edilebilmesi için gerekli olan ölçüm bloğu yer almaktadır.

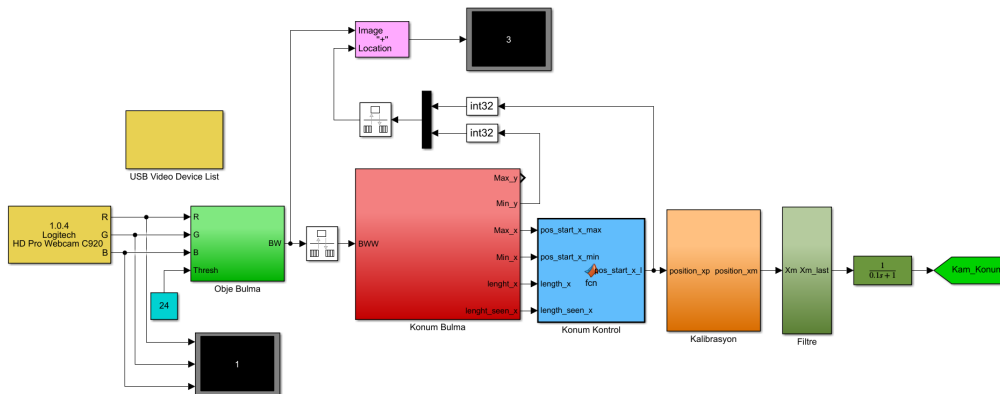
Mesafe sensör bloğu içerisinde alınan elektriksel sinyalin mesafeye dönüştürülmesi için gerekli olan kalibrasyon işlemleri ve gürültülerin engellenmesi için alçak geçiren filtre yer almaktadır. Kalibrasyon için alınan

gerçek değerler ve bunlara denk gelen voltaj değerleri Tablo 4.11’ de verilmiştir. Tablo verileri kullanılarak MATLAB *polyfit()* fonksiyonu ile çarpan 18.7 ve başlangıç noktasının $i_d=0$ noktası olması için -30 değeri eklenerek kalibrasyon yapılmıştır.

Tablo 4.11 Mesafe Sensörü Kalibrasyonu

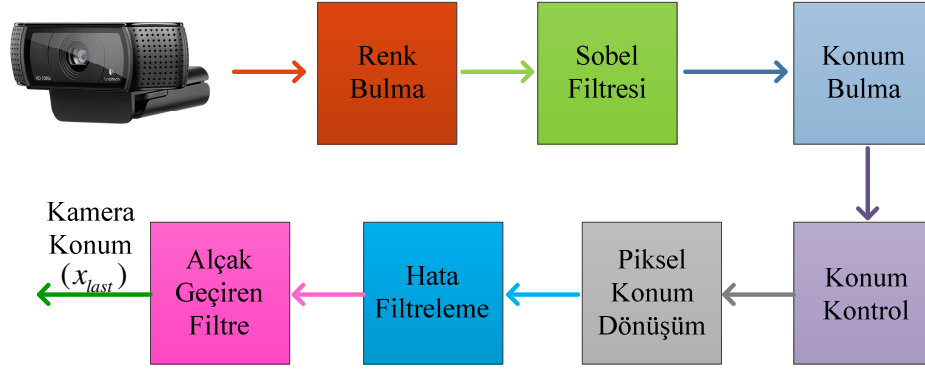
Gerçek Mesafe (cm)	Voltaj Değeri (V)
-5	1.37
0	1.62
10	2.18
20	2.59
25	2.71
30	3.28

Kamera bloğu içerisinde usb kamera bloğu, belirlenen renkteki objeyi bulma bloğu, bulunan objenin kamerada hangi piksellere denk geldiğini bulmak için konum bulma bloğu, ölü bölgeler için düzeltme kontrol bloğu, kontrol bloğu ile bulunan piksel konumun mesafe konuma (x_m) dönüştürülmesi için kalibrasyon bloğu ve ani okuma hatalarını azaltmak için filtreleme bloğu yer almaktadır, Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31 Kamera Bloğu İç Yapısı

Görüntü işleme için yapılan adımlar Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32 Görüntü İşleme Aşamasında Uygulanan Adımlar

Kamera olarak Logitech HD Pro Webcam C920 kullanılmıştır. Alınan kamera görüntüsü 320x240 piksel ve 30 fpsdir. MATLAB Simulink ortamında alınan video renklerine ayrılarak kırmızı, yeşil ve mavi olarak 3 ayrı renk alınmış ve video 1 oynatıcısına gönderilmiştir. Aynı zamanda bu 3 veri obje bulma bloğuna giriş olarak verilmiş ve bu blokta istenilen renk beyaz, geri kalan yerler siyah olması için denklem 4.8 kullanılarak filtreleme yapılmıştır.

$$G - \frac{R}{2} - \frac{B}{2} \geq 24 \quad (4.8)$$

Filtrelenen görüntüde Sobel filtresi uygulanarak kenar bulma işlemi yapılmıştır. Konum bulma bloğuna sobel filtresi uygulanmış görüntü giriş olarak tanımlanmış ve Matlab *find()* fonksiyonuyla sıfır olmayan bölgelerin indekslerini ve konumlarını bulmuştur. Bulunan bu değerlerde x ve y konumları için maksimum ve minimum değerleri belirlenmiştir. Taşıyıcı sistemin başlangıç noktasına olan konumu için x eksenini için maksimum, y eksenini için minimum olduğu nokta referans alınarak devam edilmiştir.

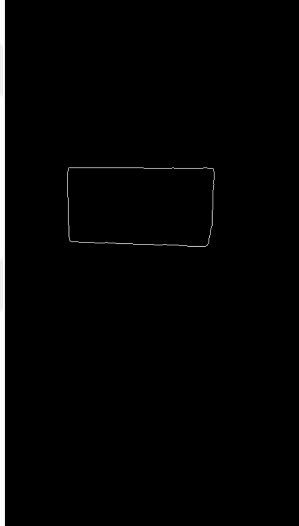
Orjinal görüntü, filtrelenmiş görüntüsü, sobel görüntüsü ve belirlenmiş olan köşe noktasının görüntüleri Şekil 4.33’de verilmiştir.



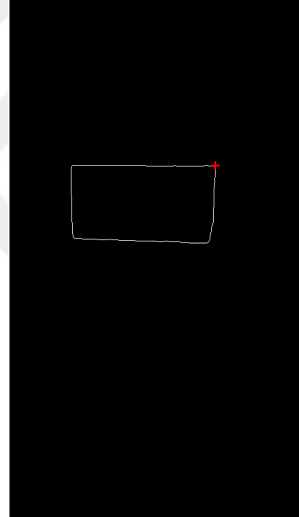
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.33 Orijinal Görüntü (a), Filtrelenmiş Görüntü (b), Sobel Kenar Bulma Görüntüsü (c), Bulunan Kenarda Referans Alınacak Noktanın Belirlenmiş Hali (d)

Taşıyıcı sistem yanal eksenlerden kılavuzlanmadığı için y ekseninde oynamalar yapabilmektedir. Bu oynamalar neticesinde belirlenmiş olan yanal uzunluk değişiklik göstermektedir. Bunun için y ekseninde taşıyıcı platform hareket ettirilerek kameranın gördüğü minimum ve maksimum y uzunluğuna bağlı olması gereken x uzunluğu elde edilen denklem çıkarılmıştır.

$$\begin{aligned}
lenght_y &= \max_y - \min_y \\
lenght_x &= 2.4 * lenght_y - 28.8 \\
lenght_{seenx} &= \max_x - \min_x
\end{aligned}
\tag{4.9}$$

Burada max_y kameranın y eksenindeki maksimum değeri, min_y kameranın y eksenindeki minimum değerini, $lenght_y$ y ekseninin uzunluğu, $lenght_x$ x olması gereken x uzunluğunu ve $lenght_{seenx}$ ise o anki gördüğü x eksenin uzunluğunu göstermektedir. Bunlara ek olarak anlık olarak gürültülerden etkilenmemesi ve taşıyıcının kapladığı alanın dışında bir beyaz nokta gördüğünde kontrolün bozulmaması için bir önceki gördüğü değer sürekli olarak hafızada tutularak kontrol sağlanmaktadır. Sobel görüntüsü ve bulunan konumlar işaretlenerek video 3 göstericisinde gösterilmiştir.

Şekil 4.33'te kameranın görüşünü engelleyen ölü bir alan olduğu görülmektedir. Bu ölü alanda kontrolün bozulmaması için konum kontrol bloğu tasarlanmıştır. Kamera işlemlerini sürekli olarak (min_y, max_x) noktasını bularak kontrol sağlanmaktadır. Taşıyıcı sistem ölü alana geldiğinde max_x noktası değişmektedir. Bu alanda min_x değerine $lenght_x$ değeri eklenerek olması gereken max_x noktası doğrulanmıştır ve ölü alandayken bu nokta ile işlem yapılmıştır. Bulunan bu nokta taşıyıcı sistemin konumunu piksel olarak vermektedir.

Kalibrasyon bloğu bulunmuş olan piksel değerini metreye çevirerek taşıyıcı sistemin x eksenindeki konumunu başlangıç noktasına göre vermektedir. Bunun için her bir pikselin gerçekte ne kadar uzunluğa denk geldiğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu ölçümü yapmak için başlangıç noktasındaki konumundan başlayarak belirli mesafelerdeki konumları alınıp Tablo 4.12' elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler MATLAB *polyfit()* fonksiyonu kullanarak 2. dereceden denklem edilmiştir.

Tablo 4.12 Kamera Kalibrasyon Değerleri

Gerçek Konum (x_m)	Kamera Piksel (x_{piksel})
-5	263
0	241
10	190
20	146
25	125
30	105

$$x_m = \frac{0.0002 * x_{piksel}^2 - 0.3051 * x_{piksel} + 61.365}{100} \quad (4.10)$$

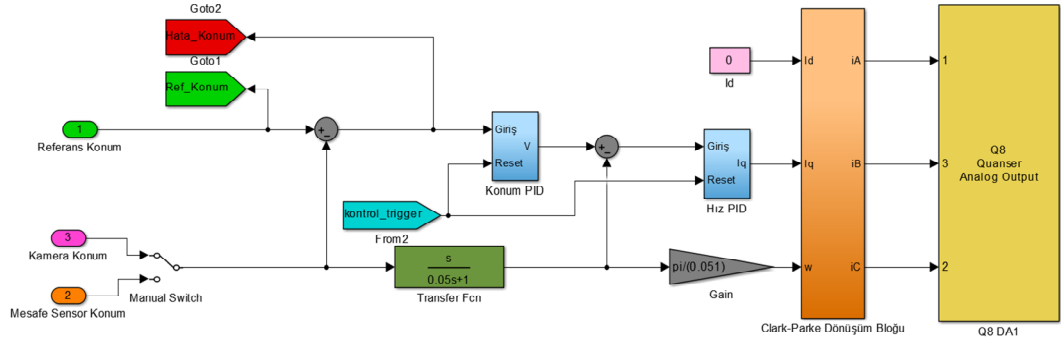
x eksenindeki konumu (x_m) ani okuma hatalarını azaltmak için son 3 değer toplamının ortalaması alınarak çıkışa yansıtılmıştır. Böylelikle ani değişimler sönümlenerek daha kararlı bir yapı elde edilmiştir. Filtreleme bloğu;

$$x_{last} = \frac{x_m + x_{prevm} + x_{doubleprevm}}{3} \quad (4.11)$$

ile ifade edilir. Nihai x konumu x_{last} , o anki x konumu x_m , bir önceki konumu x_{prevm} , iki önceki değer $x_{doubleprevm}$ ile adlandırılmıştır. x_{last} değeri kam_konum olarak konum kontrol bloğuna giriş olarak tanımlanmıştır.

Ölçüm bloğu kayıt altına alınmak istenilen değerler için oluşturulmuş bloktur.

Konum kontrol bloğu içerisine referans değerleri mesafe sensörünün konum verisi ve kameradan gelen konum verileri giriş olarak verilmiştir. Konum bloğunun içerisinde konum ve hız PID kontrolörleri ve Clark-Parke dönüşüm alt bloğu yer almaktadır, Şekil 4.34' de verilmiştir.



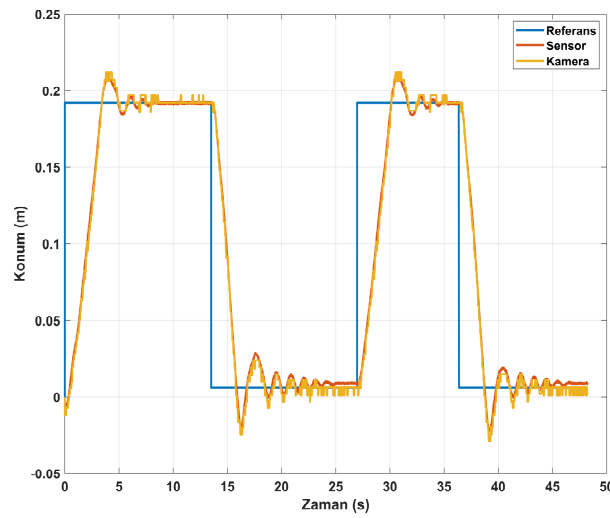
Şekil 4.34 Konum Kontrol Bloğu İç Yapısı

Konum ve hız kontrolörlerin PID kat sayıları Tablo 4.13'te verilmiştir. Konum PID çıkışı ± 0.5 ve hız PID çıkışı ± 1 olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Kamera verisinde çözünürlük sebebiyle ölü bölgeden dolayı 2 mm hatanın altında akım çıkışları sıfırlanmış ve sistemin kutup başlarına oturması sağlanmıştır.

Tablo 4.13 PID_x ve PID_v Kontrolör Parametreleri

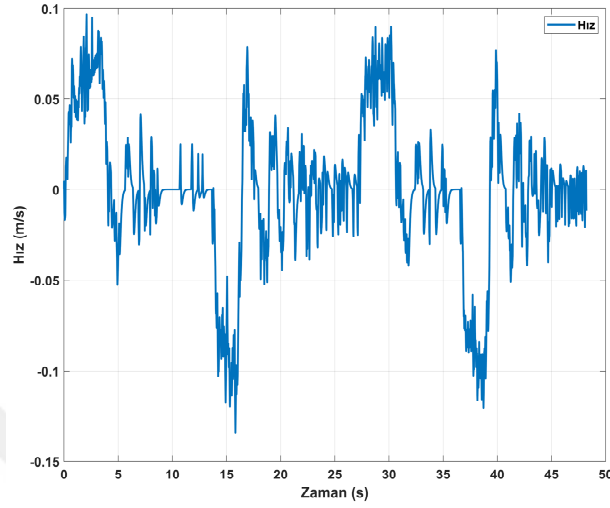
Kp_x	Ki_x	Kd_x	Kp_v	Ki_v	Kd_v
8.2	0.25	0.11	1.4	0.4	0.1

Basamak referansı olarak 0.19 m verilen ve tekrar başlangıç noktasına gelen taşıyıcının deneysel sonuçları Şekil 4.35'te verilmiştir.



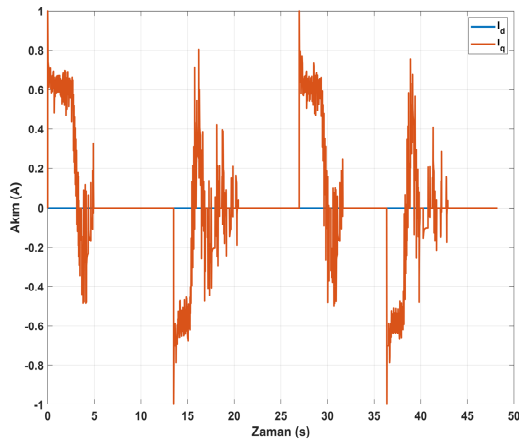
Şekil 4.35 Basamak Referans Girişi Konum Cevabı

Şekil 4.36'da kamera kontrolü ile basamak referansına karşı sistemin konum çıktıları verilmiştir. Kameradan alınan konum ile mesafe sensöründen alınan konum verisinin bire bir örtüştüğü ve sistemin 0.02 m üst aşım yapıp 9 sn de oturduğu görülmüştür.

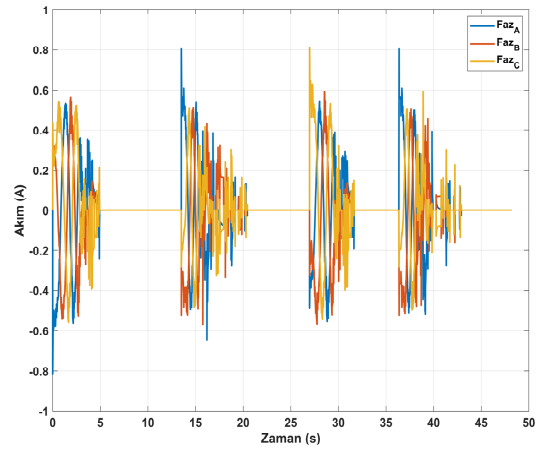


Şekil 4.36 Basamak Referans Girişi Hız Cevabı

Şekil 4.37'de taşıyıcı sistemin basamak referansına karşı hız çıkışı verilmiştir. Maksimum 0.13 m/sn hıza ulaşmıştır. Şekil 4.37'de sisteme uygulanan akım uyarımları verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.37 2 Faz i_d ve i_q Akım Çıktıları (a) 3 Faz Akım Çıktıları (b)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde yeni bir tip olarak artı tip 4 kutuplu karma elektromıknatıslara sahip maglev taşıyıcı ve yatay tahrik sistemi (doğrusal kalıcı mıknatıslı senkron motor) içeren taşıyıcı sistem ile temiz oda, kimyasal alanlar, fabrika içi taşımacılığı ve uzay uygulamaları gibi özel alanlarda kullanımı öngörülen prototip taşıma sistemi oluşturulmuştur.

Artı tip 4 kutuplu karma elektromıknatısın sonlu elemanlar metodu ile manyetik havada askılama kuvvetlerinin üç ekseninde 3 boyutlu analizleri yapılmış ve manyetik eş devresi çıkartılarak çekme kuvvetinin analitik modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar metodu ile analitik hesaplarının başarılı bir şekilde örtüştüğü ve hata miktarlarının çok az olduğu görülmüştür. Hatalarının oluşmasının nedeni ise ihmal edilen parametrelerden olduğu saptanmıştır. Hata miktarlarının sistemin çalışmasında kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğu belirlenmiş ve modelin doğruluğu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Maglev taşıyıcı sistemlerin temel sorunu doğrusal olmayan karakteristikleri ve açık çevrimde kararsız olmalarıdır. Bu sorunun çözümü için ilk olarak analitik model doğrusallaştırılmıştır ve doğrusallaştırılmış modelde kanonik yapı kullanılacak farklı kontrolörler tasarlanarak hava aralığı kontrolü yapılmıştır. Gerilim uyartımlı PID ve I-PD kontrolörler ve akım uyartımlı PID, I-PD, Klasik Kayan Kipli, İntegral Kayan Kipli ve Burulma Kayan Kipli kontrolörleri tasarlanarak benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. PID kontrolörlerin üst aşım yaptığı görülmüş ve bu üst aşımın sistemi (mekanik kısıtlar ve doğrusal olmayan karakteristik) kararsızlığa götürmesine neden olabileceği ön görülmüştür. I-PD kontrolör kullanılarak bu problem çözülmüştür. Tasarlanan kontrolörlerin performans karşılaştırmaları yapılmış ve en iyi performansı Burulma Kayan Kipli Kontrolörün olduğu görülmüştür.

Yatay tahrik sistemi için sonlu elemanlar yöntemi ile itki ve çekme kuvveti analizleri yapılmış ve manyetik havada askılama sistemine olan etkileri incelenmiştir. Doğrusal motorun modeli çıkartılmış ve analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model ile analiz sonuçları arasında küçük farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu hata değerlerinin az olduğu ve sistemin çalışmasında kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğu belirlenmiştir. Doğrusal motorun analitik modeli için kanonik yapı kullanılarak hız ve konum PID kontrolörleri tasarlanmış, benzetim çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmaları için düşük maliyetli kamera kullanılarak taşıyıcı sistemin hızı ve konumu belirlenmiştir. Ultrasonik mesafe sensörü ile kamera verisi karşılaştırılmış, kullanılan kamera ve algoritmanın performansı teyit edilmiştir. Mesafe sensörü ile kameradan alınan konumun birebir örtüştüğü ve istenilen basamak referansına karşı sistemin küçük bir üst aşım yaparak oturduğu görülmüştür. Üst aşımın önlenmesi için farklı ileri seviye kontrolcüler tasarlanması gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

Tez kapsamında yapılmış olan çalışmada, özel ortamlar için kullanılabilecek esnek taşıma sisteminin teknik bilgi birikimi elde edilmiştir.

- [1] Atherton, D., “Maglev Using Permanent Magnet,” IEEE Transactions on Magnetism, Vol.16, No: 1, Sf. 146–148. 1980.
- [2] Morishita, M., Azukizawa, Teruo; Kanda, S.; Tamura, N.; Yokoyama, T. “A new Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 38, No: 4, Sf. 230 – 236. 1989.
- [3] Onuki, T. ve Toda, Y., “Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets,” IEEE Transactions on Magnetism, (Vol. 29, No. 2, Sf. 1783 – 1786. 1993.
- [4] Tzeng, Y. ve Wang, T. C., Optimal Design of the Electromagnetic Levitation with Permanent and Electro Magnets. IEEE Transactions on Magnetism, (Vol. 30, No. 6, Sf. 4731 – 4733. 1994.
- [5] Tzeng, Y. ve Wang, T. C., “Dynamic Analysis of the Maglev System Using Controlled-PM Electromagnets and Robust Zero-Power-Cont.,” IEEE Transactions on Magnetism, (Vol. 31, No: 6, Sf. 4211 – 4213. 1995.
- [6] Hurley, W. G. ve Werner, H. W., “Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System,” IEEE Transactions on Education, Vol.40 (No.2), 124–130. 1997.
- [7] Davey, K. R. “Electrodynamic Maglev coil design and analysis,” IEEE Transactions on Magnetism, (Vol. 33, No. 5), Sf. 4227 – 4229. 1997.
- [8] Kim, C., Lee, J., Han, H. ve Kim, B., “Levitation and Thrust Control of a Maglev LCD Glass Conveyor,” IECON 2011- 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Sf. 610 – 615 2011.
- [9] Choi, J. S. ve Baek, Y. S., “Magnetically-Levitated Steel-Plate Conveyance System Using Electromagnets and a Linear Induction Motor,” IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 44, No. 11, Sf. 4171–4174. 2008.
- [10] Kim C. H., Lim J, Ahn C, Park J, Park Park D. Y., “Control Design of Passive Magnetic Levitation Tray”, International Conference on Electrical Machines and Systems, (Vol 1), sf. 1978 – 1980. 2013.
- [11] Güney, Ö.F., “Manyetik Yastıklama Temelli Mekanik Temassız Çelik Sac Taşıma Sistemi Tasarımı ve Aktif Kontrolü” (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul. 2016.
- [12] Makino, Y., Kovudhikulrungsri, L. ve Koseki, T. “6 Degrees of Freedom Control through Three Electromagnets and Three Linear Induction Motors,”

- [13] Ertuğrul, H. F., Okur, B., Erkan, K., ve Üvet, H. “An Evaluation of Zero Power Controlled Maglev Systems for Flexible Conveyance,” International Advanced Technologies Symposium (IATS), 2013.
- [14] Bozkurt, A.F., “The Zero Control of Linear Induction Motor Driven Magnetic Levitated Suspension” (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2016.
- [15] Bucak M., Bozkurt A. F., Erkan K. and Üvet H., “A New Design Concept of Magnetically Levitated 4 Pole Hybrid Mover Driven by Linear Motor”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Singapore, May 29 - June 3, 2017.
- [16] Ertuğrul, H. F., “4 Kutuplu 3 Serbestlik Dereceli Karma Elektromıknatısın Modellenmesi ve Kontrolü” (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2014.
- [17] Kim, Y.-J., Dohmeki, H., ve D. Ebihara. “Optimal driving method of stationary discontinuous primary PM-LSM by open-loop control”. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol.153, No. 4, Sf. 585–591. 94.
- [18] Suzuki, K., Kim, Y.-J., ve H. Dohmeki. “Proposal of the Longistance Transportation System in the Factory Using PM-LSM,” The 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2009), (Sf. 1–6.) 2009.
- [19] Kuś Z., Radziszewska J., Nawrat A. “Weighted Pattern Vector for Object Tracking with the Use of Thermal Images”. Nawrat A., Bereska D., Jędrasiak K. (eds) Advanced Technologies in Practical Applications for National Security. Studies in Systems, Decision and Control, vol 106. Springer, Cham 2018.
- [20] Chen, Mengyuan, “The design and research of the smart path tracing car based on the image recognition” Boletín Tecnico/Technical Bulletin 55(18), pp. 684-690, 2017.
- [21] Dursun, F. “İnsan bilgisayar etkileşimi uygulamaları için göz merkezinin belirlenmesi ve kafa pozunu tahmini” (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa. 2020.
- [22] J. Zhao, J. Zhao, H. Wang, J. Song and F. Dong, “Precision Position Measurement of Linear Motors Mover Based on Temporal Image Correlation,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 9, pp. 3268-3277, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2875645.
- [23] J. Zhao, X. Jiang, W. Cheng, J. Zhao, H. Wang and K. Gong, "Precise Position Detection of Linear Motor Movers Based on Extended Joint Transformation Correlation," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 2, pp. 814-822, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2924476.

- [24] T. Koseki, G. Patterson and T. Suzuki, "Visual state feedback digital control of a linear synchronous motor using generic video-camera signal," 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1095-1100, 2008.
- [25] M. Atlihan, M. Bucak and K. Erkan, "Horizontal I-PD position control of a levitated hybrid electromagnet driven by 3 phase ac long stator L-PMSM," 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), pp. 545-551, doi: 10.1109/OPTIM.2015.7427055, 2015.
- [26] Mochizuki, S., ve Ichihara, H., "Generalized Kalman-Yakubovich-Popov Lemma Based I-PD Controller Design for Ball and Plate System," Journal of Applied Mathematics, (Vol. 201, Sf. 1-9.) 2013.
- [27] Koseki, T., Yakushi, K., ve Kohno, K., "Levitation Control of Completely Passive 4-Pole Core Excited Solely by Armature Currents of a Linear Synchronous Motor. The 3rd International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA2001), 2001.
- [28] S. Manabe. "Coefficient Diagram Method," 14th IFAC Symp.on Automatic Control in Aerospace, Seoul,1998.
- [29] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L. and Levant, A., "Sliding Mode Control and Observation" New York, NY: Springer New York, 2014.
- [30] Guoqiang, Z., Gaolin, W., Ronggang, N. and Dianguo, X. "Active flux based full-order discrete-time sliding mode observer for position sensorless IPMSM drives," 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 3569-3572., 2014.
- [31] Utkin, V., Poznyak A., Orlov, Y., Polyakov, A., "Conventional and high order sliding mode control." Joyrnal of Franklin Institute, 357,15, 10244-10261, 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Göker E. M. & Erkan, K. (2022). Yeni Artı (+) Tip 4 Kutuplu Temassız Taşıyıcı Sistemin Tasarımı ve Manyetik Kuvvet Analizleri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (35), 373-379. DOI: 10.31590/ejosat.1032443
2. Göker E. M., Bozkurt A.F., Baykal B., Erkan, K. (2022). Air Gap Control of the Novel Cross (+) Type 4-Pole MAGLEV Carrier System. arXiv:2206.08603 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.08603>

Ödüller

1. ISIF 2021 Gümüş Madalyası, Bir Karma Elektromıknatıs Düzeneği ve Bu Düzeneğin Kullanıldığı Bir Temassız Taşıma Sistemi