

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK EKSENLİ MANYETİK SÜSPANSİYON SİSTEMİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Sertaç ÖZTÜRK**

**Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Zafer BİNGÜL**

**KOCAELİ, 2007**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK EKSENLİ MANYETİK SÜSPANSİYON SİSTEMİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Sertaç ÖZTÜRK**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Haziran 2007**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 13 Temmuz 2007**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Zafer**

**BİNGÜL**

**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Erkan**

**ZERGEROĞLU**

**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Metin**

**AYDIN**

**KOCAELİ, 2007**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Teknolojideki gelişmeler hemen her alanda olduğu gibi raylı ulaşım sistemlerinde de etkisini fazlasıyla hissettirmektedir. Yapılan çalışmada, günümüzde kullanım alanları giderek artmakta olan maglev trenlerin temelinde yatan manyetik süspansiyon sisteminin tasarımı ve uygulaması sunulmuştur. Ayrıca, kontrol eğitiminde kullanılabilecek bir deneysel set geliştirilmiştir.

Sistem, doğrusal olmayan kontrol probleminin modellenmesi, dinamiği ve kontrolüne güzel bir örnek teşkil etmektedir. Doğrusal olmayan manyetik süspansiyon sistemi geri-beslemeli doğrusallaştırma yöntemi ile kontrol edilmiştir. Böylece sistem, çalışma noktasına olan bağımlılığından kurtarılmış ve daha geniş hava aralıklarında kontrol yapılması sağlanmıştır. Bu çalışmada, farklı ağırlıklı bilyeler kullanılarak sistemin değişen kütleler karşısındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Sisteme, düşey ve yatay eksenlerde bozucu dış kuvvetler uygulanarak sistemin farklı frekans değerlerinde verdiği cevaplar incelenmiş ve tasarlanan denetleyicinin gürbüzlüğü test edilmiştir. Son olarak, manyetik süspansiyon sisteminin manyetik modeli oluşturulmuş, Maxwell 3D Alan Simülatörü ile sistemin manyetik benzetimi yapılmış ve elde edilen kuvvet değerleri, deneysel olarak elde edilen kuvvet değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu bitirme çalışmasının hazırlanmasında başından sonuna yardımcı olan yol gösteren hocam Doç. Dr. Zafer BİNGÜL ve her aşamasında yanımda olan ve proje üzerinde büyük emeği olan arkadaşım Arş. Gör. Selçuk KİZİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süreci dahil hayatımın her anında yanımda olan ve sürekli destek olan aileme ve sevdiğime sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR .....	ix
ÖZET .....	x
İNGİLİZCE ÖZET .....	xi
1 ÖNSÖZ .....	1
1.1 Giriş .....	1
1.2 Manyetik Süspansiyon Sisteminin Çalışma Prensipleri .....	2
1.3 Tezin İçeriği .....	3
2 ALGILAYICI DEVRE TASARIMI .....	4
2.1 Giriş .....	4
2.2 Doğrusal Yükselteç .....	6
2.3 Konum Algılayıcısı .....	10
2.3.1 Işık Kaynağı .....	10
2.3.2 Işık Algılayıcısı .....	12
2.4 Işık Algılayıcısının Eksiklikleri .....	15
2.5 Yük Hücresi ve Mikrometre .....	16
3 KUVVET ÖLÇÜMÜ .....	20
3.1 Giriş .....	20
3.2 Manyetizma .....	20
3.3 Elektromıknatıs Kuvvet .....	25
3.4 Elektromıknatıs Kuvvetinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi .....	26
3.5 Deneysel Sonuçlarının İrdelenmesi .....	28
4 DOĞRUSAL OLMAYAN (NONLINEAR) KONTROL TEORİSİ .....	34
4.1 Doğrusallaştırma .....	34
4.2 Geri Beslemeli Doğrusallaştırma .....	39
4.3 Faz İlerlemeli Denetleyici Tasarımı .....	42
5 DENEYSEL SONUÇLAR .....	51
5.1 Sistemin Kapalı Çevrimi .....	51
5.2 Geri Besleme Yoluna Yerleştirilen Denetleyici .....	53
5.3 Manyetik Süspansiyon Sisteminin Fiziksel Yapısı .....	57
5.4 Band Genişliği Değerlendirmesi .....	59
5.5 Değişik Hava Aralıklarında Sistemin Davranışının İrdelenmesi .....	62
5.6 Birim Basamak Giriş Yanıtları .....	67
5.7 Bozucu Dış Etkiler Uygulandığında Sistemin Davranışının İncelenmesi .....	72
5.7.1 Yatay Bozucu Etkilere Karşı Sistem Davranışı .....	73
5.7.2 Düşey Bozucu Etkilere Karşı Sistem Davranışı .....	81
5.8 Farklı Ağırlıktaki Bilyelerin Kullanılması Halinde Sistemin Davranışının İrdelenmesi .....	89
5.9 Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Bobinin Modellenmesi .....	93
6 SONUÇLAR .....	97

6.1 Özet .....	97
6.2 Öneriler .....	98
KAYNAKLAR .....	100
EKLER.....	103
ÖZGEÇMİŞ .....	106

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Maglev Trenlere Bir Örnek “Shanghai Transrapid”.....	2
Şekil 2.1 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Şematik Gösterimi.....	5
Şekil 2.2 : Manyetik Süspansiyon Sistemi.....	5
Şekil 2.3 : Konum Algılayıcısı ve Doğrusal Yükselteç Devre Şeması (Doğrusal Yükselteç Kesikli Çizgiler İle Belirtilmiştir).....	7
Şekil 2.4 : Doğrusal Yükseltecin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı.....	9
Şekil 2.5 : Kızılötesi LED’lerden Oluşturulan Işık Kaynağı Resmi.....	11
Şekil 2.6 : Kızılötesi LED’lerden Oluşturulan Işık Kaynağı Devre Şeması.....	11
Şekil 2.7 : Üzeri Kapak İle Kapatılmış Işık Algılayıcısı.....	12
Şekil 2.8 : Direnç Geçişli Yükselteç Devre Şeması.....	13
Şekil 2.9 : Konum İle Gerilim Arasındaki İlişkiyi Gösteren Eğri.....	14
Şekil 2.10 : Silindirik Yapıda Bir Cismin Salınması.....	15
Şekil 2.11 : Mikrometre ve Yük Hücrelerinden Oluşan Sistemin Şematik Gösterimi.....	16
Şekil 2.12 : Mikrometre ve Yük Hücrelerinden Oluşan Sistemin Resmi.....	17
Şekil 2.13 : Bir Yük Hücresi (Load Cell) Yapısı.....	18
Şekil 2.14 : Wheatstone Köprüsü Devre Şeması.....	18
Şekil 2.15 : Wheatstone Köprüsü Kullanılarak Üretilmiş Bir Yük Hücresi.....	19
Şekil 3.1 : Bobin Çekirdeği İçin B – H Eğrisi.....	23
Şekil 3.2 : Bir Manyetik Materyal İçin B - H Eğrisindeki Histerezis.....	24
Şekil 3.3 : Ortalamalar Alınarak Oluşturulan Kuvvet – Akım Eğrisi.....	25
Şekil 3.4 : Kuvvet Ölçümü Düzeneği Şeması.....	27
Şekil 3.5 : Kuvvet Ölçümü Düzeneğinin Resmi.....	28
Şekil 3.6 : Farklı Kuvvet Değerleri İçin Tahmini Akım – Konum Eğrisi.....	29
Şekil 3.7 : Farklı Kuvvet Değerleri İçin Deneysel Akım – Konum Eğrisi.....	29
Şekil 3.8 : Farklı Kuvvet Değerleri İçin C – x İlişkisi.....	30
Şekil 3.9 : Kuvvet – Akım Eğrisi Genel Yapısı.....	31
Şekil 3.10 : x = 2 mm İçin Kuvvet – Akım İlişkisi.....	32
Şekil 3.11 : x = 5 mm İçin Kuvvet – Akım İlişkisi.....	32
Şekil 3.12 : x = 10 mm İçin Kuvvet – Akım İlişkisi.....	33
Şekil 4.1 : Bilyeye Etki Eden Kuvvetleri Gösteren Serbest Cisim Diyagramı.....	35
Şekil 4.2 : Sistemin Kutuplarının Yer Eğrisi.....	38
Şekil 4.3 : s Düzleminde Kararlı Ve Kararsız Bölgeler.....	39
Şekil 4.4 : Geri-beslemeli Doğrusallaştırma Kontrolü.....	40
Şekil 4.5 : Doğrusal Olmayan Sistemin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı.....	41
Şekil 4.6 : Tasarlanan Faz İlerlemeli Denetleyicinin Kutup – Sıfır Yerleşimi.....	43
Şekil 4.7 : Tasarlanan Faz İlerlemeli Denetleyicinin, K = 80, $\alpha = 10$ , $\tau = 0.005s$ Değerleri İçin Çizdirilen Bode Diyagramı.....	45
Şekil 4.8 : Doğrusallaştırılmış Sistemin Bode Diyagramı.....	46
Şekil 4.9 : Faz İlerlemeli Denetleyicinin Genlik - Faz Eğrisi.....	47
Şekil 4.10 : Açık Çevrim Transfer Fonksiyonunun K = 79 , $\alpha = 10$ ve $\tau = 0.005s$ Değerleri İçin Çizdirilen Bode Diyagramı.....	48

Şekil 4.11 : $K = 79$ , $\alpha = 10$ , $\tau = 0.005s$ Değerleri İçin Faz İlerlemeli Denetleyicinin İleri Besleme Yolu Üzerine Yerleştirilmesiyle Elde Edilen Kapalı Çevrim Bode Diyagramı.....	49
Şekil 4.12: $K = 79$ , $\alpha = 10$ , $\tau = 0.005s$ Değerleri İçin Faz İlerlemeli Denetleyicinin İleri Besleme Yolu Üzerine Yerleştirilmesiyle Elde Edilen Kapalı Çevrim Birim Basamak Yanıtı .....	49
Şekil 5.1 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı .....	52
Şekil 5.2 : Süspansiyon Sisteminin Kök – Yer Eğrisi (Root Locus) .....	54
Şekil 5.3 : Denetleyicinin İleri Besleme Yolu Üzerinde Olması Halindeki Kutup – Sıfır Eğrisi .....	55
Şekil 5.4 : Denetleyicinin Geri Besleme Yolu Üzerinde Olması Halindeki Kutup – Sıfır Eğrisi .....	56
Şekil 5.5 : Denetleyicinin İleri ve Geri Besleme Yolu Üzerine Yerleştirildiği Durumlarda Elde Edilen Kapalı Çevrim Birim Basamak Cevapları .....	57
Şekil 5.6 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Tüm Elemanlarının Fotoğrafı.....	58
Şekil 5.7 : Gerilim Kaynağı ve Oluşturulan Devreler.....	59
Şekil 5.8 : Frekans Tanım Bölgesi Kriterleri .....	59
Şekil 5.9 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Çalışırken Çekilmiş Resmi.....	60
Şekil 5.10 : 10 Hz, 30 Hz ve 100 Hz Band Genişliği Değerleri İçin Teorik Basamak Cevapları .....	62
Şekil 5.11 : Hava Aralığının 5mm Değerine Ayarlandığı Durumda Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	63
Şekil 5.12 : Hava Aralığının 8mm Değerine Ayarlandığı Durumda Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	63
Şekil 5.13 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	64
Şekil 5.14 : Hava Aralığının 15mm Değerine Ayarlandığı Durumda Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	64
Şekil 5.15 : Hava Aralığının 5mm Değerine Ayarlandığı Durumda Bobinin Çektiği Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	65
Şekil 5.16 : Hava Aralığının 8mm Değerine Ayarlandığı Durumda Bobinin Çektiği Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	66
Şekil 5.17 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Bobinin Çektiği Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	66
Şekil 5.18 : Hava Aralığının 15mm Değerine Ayarlandığı Durumda Bobinin Çektiği Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	67
Şekil 5.19 : Hava Aralığının 5mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm’lik Basamak Girişi İçin Elde Edilen Konumun Zamanla Değişimi	68
Şekil 5.20 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm’lik Basamak Girişi İçin Elde Edilen Konumun Zamanla Değişimi	68
Şekil 5.21 : Hava Aralığının 11mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm’lik Basamak Girişi İçin Elde Edilen Konumun Zamanla Değişimi	69
Şekil 5.22 : Hava Aralığının 13mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm’lik Basamak Girişi İçin Elde Edilen Konumun Zamanla Değişimi	69
Şekil 5.23 : Hava Aralığının 5mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm’lik Basamak Girişi İçin Bobinden Çekilen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	70

Şekil 5.24 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm'lik Basamak Girişi İçin Bobinden Çekilen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	71
Şekil 5.25 : Hava Aralığının 11mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm'lik Basamak Girişi İçin Bobinden Çekilen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	71
Şekil 5.26 : Hava Aralığının 13mm Değerine Ayarlandığı Durumda Sisteme Uygulanan 1mm'lik Basamak Girişi İçin Bobinden Çekilen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	72
Şekil 5.27 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Yatay Eksende Hareket Eden Düzeneğe Monte Edilmesiyle Oluşan Deney Düzeneği .....	73
Şekil 5.28 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 2Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	74
Şekil 5.29 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 2Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	74
Şekil 5.30 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 4Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	75
Şekil 5.31 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 4Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	75
Şekil 5.32 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 6Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	76
Şekil 5.33 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 6Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	76
Şekil 5.34 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 10Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	77
Şekil 5.35 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 10Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	77
Şekil 5.36 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin 25mm ve 16mm Çaplarında İki Bilye İle Birlikte Yatay Eksende Hareket Eden Düzeneğe Monte Edilmesiyle Oluşan Deney Düzeneği .....	79
Şekil 5.37 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 4Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında İki Bilye İçin Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	79
Şekil 5.38 : Yatay Eksende 8mm Hava Aralığı İçin 4Hz 0.2 Genlikli Sinüsoidal Bozucu İşaret Uygulandığında İki Top İçin Elde Edilen Akım Değeri .....	80
Şekil 5.39 : Sistem ve Yaylardan Oluşan Deney Düzeneği .....	81
Şekil 5.40 : Oluşturulan Yeni Konum Algılayıcısının Resmi .....	82
Şekil 5.41 : 5mm Hava Aralığı Değeri İçin Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Ana Sistemin Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	83
Şekil 5.42 : Düşey Eksende 5mm Hava Aralığı İçin Bozucu Kuvvet Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	84
Şekil 5.43 : 8mm Hava Aralığı Değeri İçin Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Ana Sistemin Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	84



Şekil 5.44 : Düşey Eksende 8mm Hava Aralığı İçin Bozucu Kuvvet Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	85
Şekil 5.45 : 9mm Hava Aralığı Değeri İçin Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Ana Sistemin Konum Algılayıcısından Alınan Değerlerin Zamanla Değişimi .....	85
Şekil 5.46 : Düşey Eksende 9mm Hava Aralığı İçin Bozucu Kuvvet Uygulandığında Elde Edilen Akım Değeri .....	86
Şekil 5.47 : 5mm Hava Aralığında Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Fiziksel Yapının Yer Değiştirmesi .....	87
Şekil 5.48 : 8mm Hava Aralığında Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Fiziksel Yapının Yer Değiştirmesi .....	87
Şekil 5.49 : 10mm Hava Aralığında Düşey Eksende Bozucu Bir Kuvvet Uygulandığında Fiziksel Yapının Yer Değiştirmesi .....	88
Şekil 5.50 : Manyetik Süspansiyon Sisteminde 25mm ve 16mm Çaplarında İki Bilyenin Birlikte Salınması .....	89
Şekil 5.51 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Birbirine Yapışık İki Bilye İçin Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	90
Şekil 5.52 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda Birbirine Yapışık İki Bilye İçin Bobinden Geçen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	90
Şekil 5.53 : Manyetik Süspansiyon Sisteminde 38mm Çaplı Büyük Bilyenin Salınması .....	91
Şekil 5.54 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda 38mm Çaplı Büyük Bilye İçin Konum Algılayıcısından Elde Edilen Konum Değerinin Zamanla Değişimi .....	91
Şekil 5.55 : Hava Aralığının 10mm Değerine Ayarlandığı Durumda 38mm Çaplı Büyük Bilye İçin Bobinden Geçen Akım Değerinin Zamanla Değişimi .....	92
Şekil 5.56 : Manyetik Süspansiyon Sisteminin Maxwell Programı İle Oluşturulan Manyetik Modeli .....	94
Şekil 5.57 : Sistemde Oluşan Manyetik Akının İzlediği Yol .....	96

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 5.1 : Farklı Band Genişliği İçin Tasarlanan Denetleyici Parametreleri.....	61
Tablo 5.2 : 8mm Hava Aralığı İçin 25mm çaplı Bilye Kullanılarak Yatay Eksende Bozucu Kuvvet Uygulandığında Elde Edilen Konum ve Akım Değerlerindeki Standart Sapmalar .....	78
Tablo 5.3 : 8mm Hava Aralığı İçin 25mm ve 16mm çaplı İki Bilye Kullanılarak Yatay Eksende Bozucu Kuvvet Uygulandığında Elde Edilen Konum ve Akım Değerlerindeki Standart Sapmalar .....	80
Tablo 5.4 : Farklı Hava Aralıklarında 25mm çaplı Bilye Kullanılarak Elde Edilen Konum ve Akım Değerlerindeki Standart Sapmalar .....	86
Tablo 5.5 : 2mm Hava Aralığında Farklı Akım Değerleri İçin Bilyeye Etki Eden Manyetik Kuvvetler .....	95
Tablo 5.6 : 5mm Hava Aralığında Farklı Akım Değerleri İçin Bilyeye Etki Eden Manyetik Kuvvetler .....	95
Tablo 5.7 : 10mm Hava Aralığında Farklı Akım Değerleri İçin Bilyeye Etki Eden Manyetik Kuvvetler .....	95

## SİMGELER DİZİNİ

F	:	Kuvvet
B	:	Manyetik Alan Yoğunluğu
C	:	Kondansatör
$f$	:	Frekans
g	:	Yerçekimi İvmesi
H	:	Manyetik Alan Şiddeti
i	:	Akım
K	:	Kazanç
L	:	Self
m	:	Kütle
M	:	Mıknatıslanma Vektörü
$M_r$	:	Rezonans Tepesi
R	:	Direnç
V	:	Gerilim
$\omega$	:	Açısal Frekans
x	:	Hava Aralığı
$\mu$	:	Manyetik Geçirenlik Katsayısı
$\lambda$	:	Işığın Dalga Boyu
$\phi_m$	:	Maksimum Faz

## KISALTMALAR

KP	:	Kazanç Payı
FP	:	Faz Payı
BG	:	Bandgenişliği
LED	:	Işık Yayan Diyot
FET	:	Alan Etkili Transistör
IR	:	Kızıl Ötesi
LT	:	Açık Çevrim Transfer Fonksiyonu

## TEK EKSENLİ MANYETİK SÜSPANSİYON SİSTEMİ

Sertaç ÖZTÜRK

**Anahtar Kelimeler :** Manyetik Süspansiyon Sistemi, Doğrusal Olmayan Kontrol, Geri-beslemeli Doğrusallaştırma, Faz İlerlemeli Denetleyici.

### ÖZET :

Gerçek fiziksel sistemlerde bulunan pek çok eleman doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu sistemlerin doğrusal kontrolünün yapılabilmesi için, sistemlerin geniş bir çalışma bölgesinde doğrusal olarak modellenmesi gerekir. Yüksek dereceli doğrusal olmayan diferansiyel denklemler ile ifade edilen sistemlerin çözümleri oldukça uzun ve karmaşıktır. Bu karmaşık ve uzun çözümler daha kısa ve basit modellerle ifade edilebilirse kontrolü çok daha rahat gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada, tek eksenli bir manyetik süspansiyon sistemi tasarımı ve kontrolü yapılmıştır. Bu sistem kontrol öğrencileri için, matematiksel modelleme, dinamik ve kontrol alanlarında giriş niteliğinde bir eğitim seti olarak kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Manyetik süspansiyon sistemi ana hatlarıyla, konum algılayıcısı, bobin, denetleyici ve demir bilyeden oluşmaktadır. Bilye, bobin çekirdeğinden belli bir mesafede asılı durmaktadır. Konum algılayıcısı, bilyenin düşey eksenindeki konumunu algılar ve denetleyiciye iletir. Denetleyici, konum algılayıcısından aldığı bilgi ile girilen referans değerini karşılaştırarak bobin akımını ayarlar. Bobin, içinden geçen bu akıma bağlı olarak bir elektromanyetik kuvvet üretir. Üretilen kuvvet ile bilyenin konumunun düşey ekseninde kontrolü gerçekleştirilir.

İlk olarak, kullanılan elemanların yapıları sunulmuş ve sistemin matematiksel modeli, deneysel ve teorik bilgilere dayandırılarak, elde edilmiştir. Sistemde elde edilen kuvvet, akım ve hava aralığı arasında doğrusal olmayan bir ilişki mevcuttur. Doğrusal olmayan bu ilişki kullanılarak, geri-beslemeli doğrusallaştırma tekniği ile sistemin doğrusal kontrolü dSPACE kartı kullanılarak gerçek zamanlı yapılmıştır. Klasik doğrusallaştırma teknikleri ile karşılaştırıldığında geri-beslemeli doğrusallaştırma tekniği ile yapılan kontrolde sistemin daha geniş çalışma aralıklarında kontrolünün yapılabilirdiği görülmüştür. Son olarak, tasarlanan denetleyicinin gürbüzlüğünü test etmek amacıyla, sisteme düşey ve yatay eksenlerde bozucu dış kuvvetler uygulanmış ve manyetik süspansiyon sisteminin bu şartlar altında kontrolü gerçekleştirilmiş, farklı ağırlıklı bilyeler kullanılarak sistemin değişen kütleler karşısındaki dinamik davranışı incelenmiş ve Maxwell 3D programı kullanılarak sistemin manyetik modelinin benzetimi yapılmış ve farklı akım ve hava aralıkları değerleri için sistemde oluşan elektromanyetik kuvvet belirlenerek deneysel olarak elde edilen kuvvetler ile karşılaştırılmıştır.

# SINGLE AXIS MAGNETIC SUSPENSION SYSTEM

Sertaç ÖZTÜRK

**Keywords :** Magnetic Suspension System, Nonlinear System Control, Feedback Linearization, [Phase Forward Controller](#).

## ABSTRACT :

Most components of real physical systems exhibit nonlinear behaviours. In control of these types of systems, they should be modelled as a partial linear system. The nonlinear systems with high degree of partial differential equations are not easy to solve and thus their solutions are very complicated. If they can be developed as a short and simple model, the control of these systems become more easy.

In this work, control of a single-axis magnetic suspension system was developed. The intention is to build this system as a classroom demo for an introductory course on modeling, dynamics, and control. Magnetic suspension system has four main components as position sensor, coil, controller and ball. Position sensor senses the position of ball and send it to the controller. Controller sets the current on the coil depend on this data. Coil produces electromagnetic force according to this current. With this electromagnetic force we control the position of the ball at vertical axis.

At first part of this work, structures of the system's parts are given and the mathematical model of system is obtained by using a model based on both theory and experimentally determined behaviours. There is a nonlinear relationship between force, current and air gap. By using this nonlinear relationship, system controlled by feedback linearization technique. If they compared, feedback linearization technique with clasical linearization, there is wider range of air gap variations. Different types of balls that have different weights are used to see the system's dynamics at different weights. At the last part, disturbance forces applied on vertical and horizontal axes to test the robustness of the magnetic suspension system and control it under these circumstances and The Maxwell 3D Field Simulator is used to analyze magnetic forces on the system for different air gaps and currents and compared to the experimentally obtained forces. This paper details the theory, modeling, and implementation, concluding with performance analysis under normal and disturbance conditions.

## **BÖLÜM.1 ÖNSÖZ**

### **1.1 Giriş**

Bu çalışmada, tek-eksenli bir manyetik süspansiyon sistemi tasarlanmıştır. Sistem ilk bakışta basit gibi görünse de aslında birçok karmaşık kavramdan oluşmaktadır. Çalışan bir sistemin gerçekleştirilmesi farklı kontrol tekniklerinin bir arada uygulanmasını gerektirmektedir [32]. Bu çalışmada konu alınan manyetik süspansiyon sistemleri üzerinde de birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin Prof. David Trumper doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol tekniklerinin performans kıyaslamasını manyetik süspansiyon sistemleri üzerinde çalışarak gerçekleştirmiştir [31]. Ortaya koyulan teknikler kullanım alanlarını giderek genişleterek robotlu uygulamalarda, uçak sistemlerinde, asansör sistemlerinde ve daha birçok alanda görülmüştür. Manyetik trenler (maglev) ve manyetik taşımacılık sistemleri bu alanların başlıca örneklerindedir.

Maglev, manyetik kuvvet ile bir aracın havaya kaldırılıp yönlendirildiği ve hareket ettirildiği teknolojiler için kullanılan genel bir terimdir. Maglev sisteminde yol boyunca birbiri ardına sıralanmış bulunan bobinlere, aracın mıknatıslarının kenetlendiği bir manyetik dalga yaratmak üzere alternatif akım verilir. Böylece aracın mıknatısları ile yol boyu sıralanmış bobinler, aracın doğrusal hareketini sağlayan, tek bir senkron motor oluşturur. Araç hızı, sıralanmış halde bulunan bobinlere uygulanan akımın frekansının değiştirilmesiyle kontrol edilir. Sistem, treni belli bir miktar havaya kaldırır ve hiç bir yüzeye değmeden yatay ekseninde hareket ettirir. Geleneksel trenlerle kıyaslanacak olursa, manyetik trenler hiç bir yüzeye değmeden hareket ettiği için hem çok sessizdir hem de saatte 581 km hıza erişebilmektedir. 2003 senesinde ulaşılan bu hız aynı zamanda dünya en hızlı treni olma rekorunu elinde bulundurmaktadır. Bunlara bir örnek olan Çin'in Şangay havaalanı ile şehir merkezini bağlayan hatta kullanılan maglev tren şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Maglev trenlere bir örnek “Shanghai Transrapid”

Ticari amaçlı kullanılan manyetik trenler son yıllarda hızla hizmete girmeye başlamışlardır. Almanya, Amerika gibi ülkelerde araştırmaları devam eden bu teknoloji ilk olarak 2000 yılında Alman teknolojisiyle Çin'in Şangay kentinde uygulanmıştır. Daha sonra 2005'in mart ayında Japonya'da devreye alınmıştır. En son 2006 Şubatında Çin ikinci manyetik tren hattını devreye almıştır.

## 1.2 Manyetik Süspansiyon Sisteminin Çalışma Prensibi

Manyetik süspansiyon sistemi temelde dört ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar, konum algılayıcısı, bobin (eyleyici), denetleyici ve demir bilyedir.

Bobin yerçekimi kuvvetine ters yönde bir kuvvet üretir. Bu manyetik alan kuvveti bobin içinden akan akıma bağlı olarak değişir. Yani, manyetik alan kuvveti bobin akımının ayarlanmasıyla kontrol edilir. Bobinin dikey ekseninde bilyeyi çekip serbest bırakmasıyla bilyenin konumunun kontrolü yapılmaktadır. Manyetik süspansiyon sistemi ayrıca, bilyenin konumunu algılayabilmek için bir mekanizmaya ihtiyaç duyar. Burada, optik yaklaşımdan yararlanılarak konum algılayıcısını oluşturmada bir ışık kaynağı ve bir de ışık algılayıcısı kullanılmıştır. Bilye aşağı - yukarı hareket ederken algılanan yani algılayıcı üzerine düşen ışık miktarı bilyenin hareketine bağlı olarak değişir. Denetleyici de bilyenin konumuna bakar, onu bir referans giriş

konumuyla karşılaştırır ve bobin tarafından üretilen kuvveti ihtiyaç duyulan seviyeye ayarlar.

Kuvvet, akım ve bobin çekirdeği ile bilye arasındaki hava boşluğu arasında doğrusal olmayan bir ilişki mevcuttur. Bu ilişkinin belirlenmesinde bir mikrometre ve üzerine sabitlenmiş bir yük hücresinden oluşan mikrometre birleşimi kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde eşitlikler bir çalışma noktasında geleneksel olarak doğrusallaştırılmaktadır, fakat bu sistemin gerçekleştirilmesinde diğer bir yöntem olan geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede, çalışma noktasına olan bağımlılık ortadan kaldırılarak süspansiyon sisteminin geniş bir aralıkta çalışabilmesine olanak sağlanmıştır. Oluşturulan yapıda; konum algılayıcısı, bobin, denetleyici ve ilgili elektronik ara yüz elemanlarının tasarımı ve uygulanması sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.

### **1.3 Tezin İçeriği**

İkinci bölümde; İkinci bölümde; sistem modellemesi için bir yöntem oluşturulmuştur. İlk olarak sistem için kuvvet - akım - hava boşluğu ilişkisi ölçülmüştür. Bu model teoriye dayandırılmış ve daha sonra deneysel olarak elde edilen verilere göre ayar yapılmıştır. Üçüncü bölümde; doğrusal yükselteç, ışık kaynağı ve direnç – geçişli yükselteç olmak üzere kullanılan devreler özetlenmiştir. Dördüncü bölümde; doğrusal olmayan sistemin kontrolünde tasarlanan denetleyici ve tasarımda kullanılan yöntem detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde; deneysel sonuçlar özetlenmiş, sistemin normal ve bozucu dış etkenler uygulandığı hallerdeki performans ölçümleri ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Maxwell 3D Simülatörü yardımıyla sistemin manyetik benzetimi yapılmış ve farklı hava aralıkları ve akımlar için elde edilen manyetik kuvvetler deneysel olarak elde edilen kuvvetler ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, altıncı bölümde ise; sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

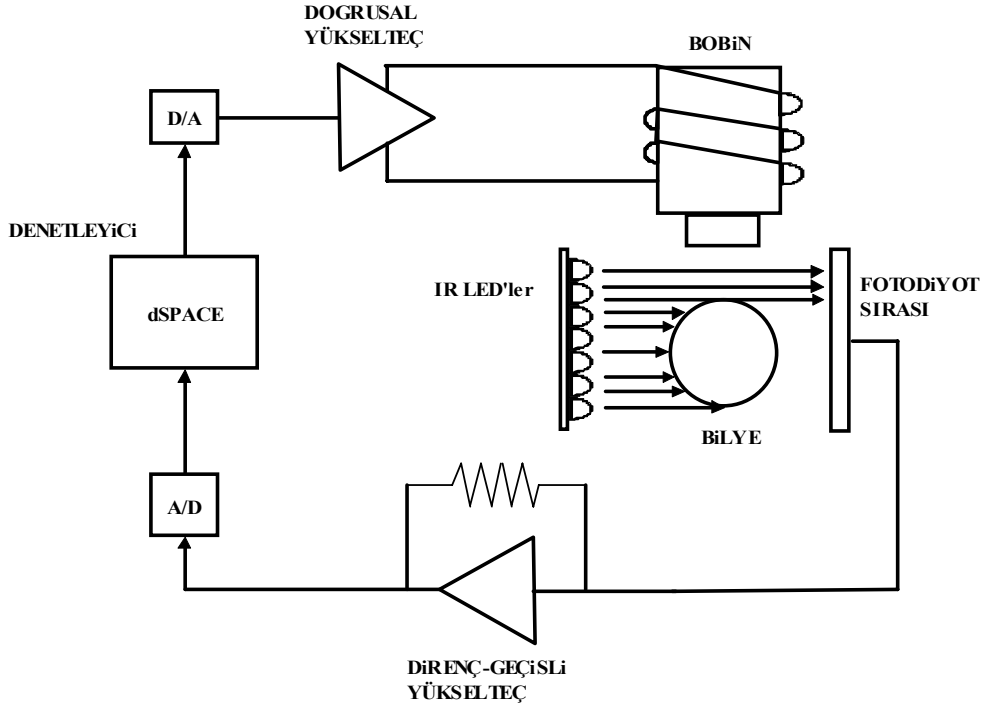


## **BÖLÜM 2 ALGILAYICI DEVRE TASARIMI**

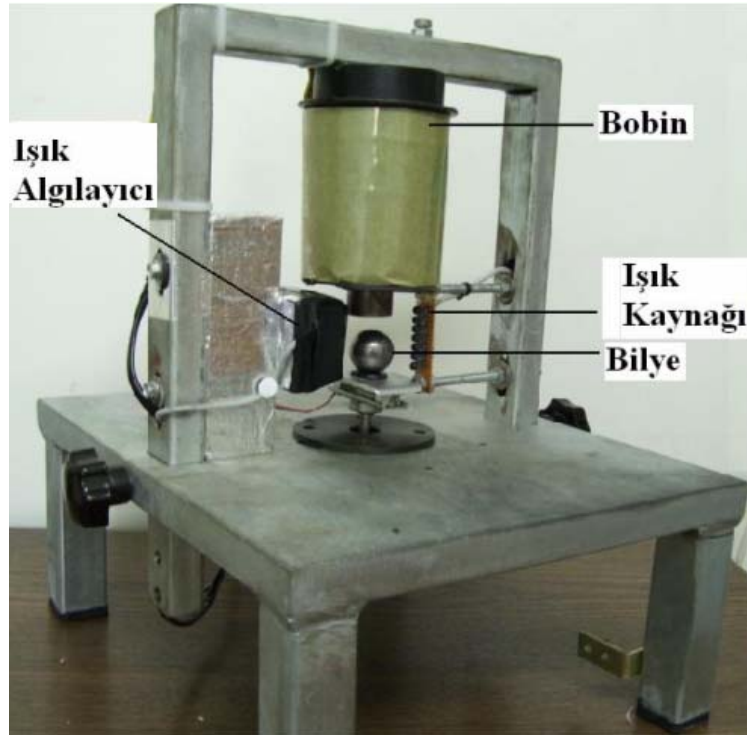
### **2.1 Giriş**

Oluşturulan manyetik süspansiyon sistemi şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Sistemin resmi ise şekil 2.2’de verilmiştir. Yalnız bu resimde denetleyici gösterilmemiştir. Sistemde; konum algılayıcısı, doğrusal yükselteç, bilgisayar ve dSPACE artından oluşan denetleyici, bobin ve 25mm çaplı demir bir bilye mevcuttur.

Konum algılayıcısı ışık kaynağı ve bunun karşısında bulunan bir ışık algılayıcısından oluşmaktadır. Işık kaynağı olarak kızıl ötesi (IR) LED (ışık yayan diyot) ve ışık algılayıcısı olarak da bir fotodiyot sırası kullanılmıştır. Demir bilye bobinin ürettiği kuvvetin etkisiyle ışık kaynağı ve algılayıcı arasında asılı tutulacaktır. Bu esnada fotodiyot sırası, bilyenin durumuna göre üzerine düşen ışık miktarıyla doğru orantılı olarak bir akım üretir. Direç-geçişli (transresistance) yükselteç, fotodiyot sırasının ürettiği akımı, bilgisayarın işleyeceği ve bilyenin durumunu temsil eden gerilim değerine dönüştürür. Çevrimin devamında ise, doğrusal yükselteç bilgisayardan kontrol sinyali gerilimini alır ve bu gerilime karşılık olarak bobini sürmek üzere 0-2A aralığında değişen ve gerilimle doğru orantılı bir akım üretir. Bobin, 25mm çapında demir bir çekirdeğe sarılmış ve dışı izole edilmiş 2.200 sarımdan oluşmaktadır. Bilgisayar birleşimi; bir masa üstü bilgisayar, dSPACE kartı ve ilgili programlardan oluşmaktadır. Konum algılayıcısından elde edilen değerler ile denetleyici arasında bir ilişki kurabilmek için mikrometre ve üzerine yerleştirilmiş bir yük hücresinden oluşturulmuş bir yapı kullanılmıştır.



Şekil 2.1 : Manyetik süspansiyon sisteminin şematik gösterimi



Şekil 2.2 : Manyetik süspansiyon sistemi

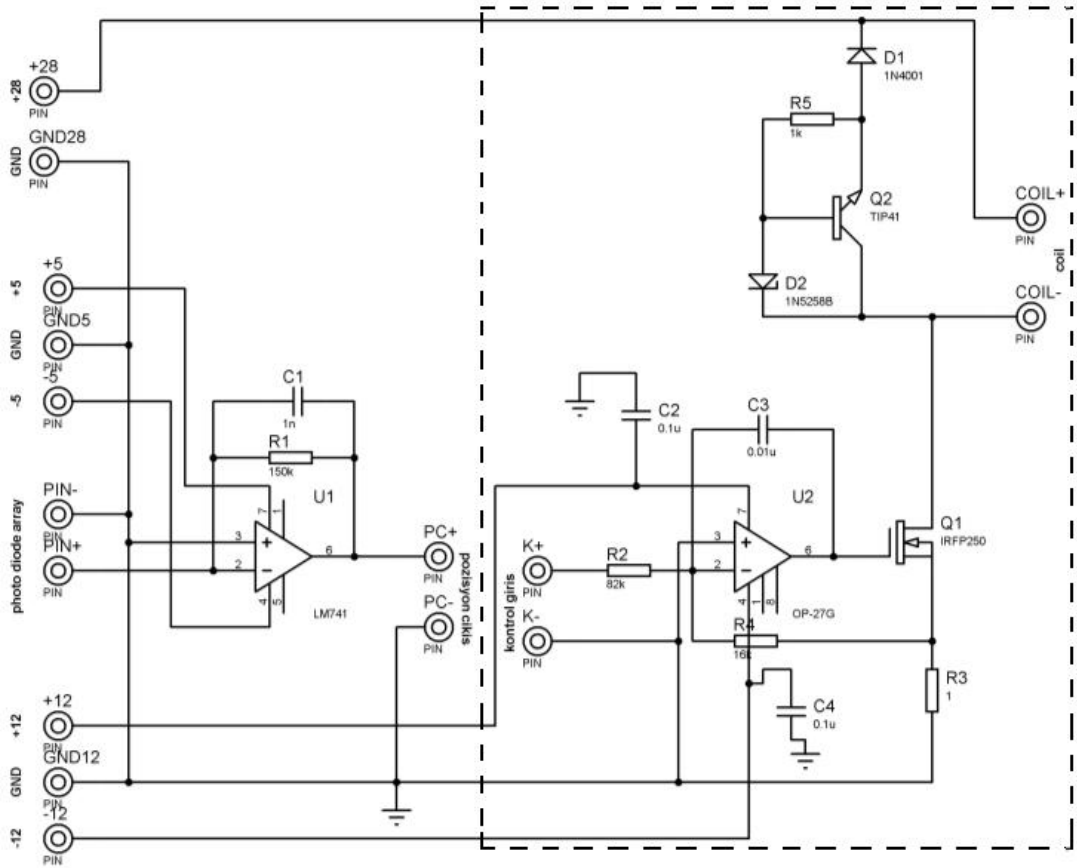
Sistemin blok diyagramları Matlab'in Simulink programıyla oluşturulmuş (Ek-A) ve daha sonra dSPACE kartına yüklenerek kontrolü yapılmıştır. Bu yaklaşım uygulama açısından büyük kolaylıklar sağlar. Kontrolde yapılmak istenen bütün değişiklikler direkt olarak blok diyagramı parametrelerini değiştirerek gerçekleştirilebilir. Bu yöntem, program üzerinde düzeltmeler yapıp uygulamaktan çok daha kolay ve uygulanabilir bir yöntemdir.

## 2.2 Doğrusal Yükselteç

Doğrusal yükselteç (linear amplifier) adından da anlaşılacağı üzere girişine uygulanan sinyalin şeklini ve frekansını bozmadan fakat genliğini arttırarak çıkışına aktaran yükselteçlerdir. Orijinal tasarımıda [32] gecikmeli tip anahtarlama yükselteç kullanılmıştır. Bu anahtarlama yükselteçler güç kayıplarının az olması nedeniyle tercih edilmektedirler fakat sistemde, anahtarlama yükselteçler aradaki güç kaybı farkının önemli değerde olmaması, devreyi daha karmaşık hale getirdikleri ve çıkış akımında istenmeyen dalgalanmalara neden olmaları sebebiyle kullanılmamıştır.

Geri gelme hızı yani 'slew rate' analog çıkış geriliminin bir seviyeden diğerine değişiminin maksimum hızı olarak tanımlanmaktadır. Başarılı bir kontrol için sistemde geri gelme hızının yüksek olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için bobine çift kutuplu bir gerilim uygulamalıdır. Sistem, bilye bobin çekirdeğine yaklaştığında en yüksek geri gelme hızına sahip olmalıdır. Çünkü, çok küçük bir akıma ihtiyaç duyulduğu çekirdek yakınlarında akımın çok hızlı bir şekilde artıp azalması gerekmektedir. Aksi takdirde bilye aniden bobine doğru çekilir ve bobin çekirdeğine yapışır. İyi bir geniş sinyal kararlılığı için akım tek kutuplu olsa da gerilim kontrolünün çift kutuplu yapılması gerekmektedir.

Sistemde, bu şartları sağlayabilecek bir yükselteç olan, Prof. David Trumper tarafından tasarlanan bir doğrusal yükselteç tasarımı örnek alınmıştır [31]. Konum algılayıcısı ve doğrusal yükselteçten oluşan devre şeması şekil 2.3'deki gibidir. Doğrusal yükseltecin devre şeması ise şekil içinde kareli çizgilerle belirtilmiştir.



Şekil 2.3 : Konum algılayıcısı ve doğrusal yükselteç devre şeması (doğrusal yükselteç kesikli çizgiler ile belirtilmiştir)

Yükselteç gerilim kontrollüdür ve bu gerilim ile bobin akımı istenen seviyeye getirilmektedir. Şekildeki 1  $\Omega$ 'luk R<sub>3</sub> direnci gerilim algılayıcı olarak görev yapar yani üzerinden geçen akım kadar gerilim meydana gelir ve bu gerilim opampın (işlemsel kuvvetlendirici) negatif ucuna girilir. İşlemsel yükselteç (op-amp), istenilen akım değerine ulaşıncaya kadar çıkış gerilimini ayarlar.

Oluşturulan haliyle, diğer parçalarla birlikte yükselteç, bobine +28V ve -36V gerilim uygulayabilir duruma gelmiştir. Zener diyotlu düzenleyicide (regülatörde), zener diyotun belirli bir ters gerilimden sonra iletme geçme özelliğinden yararlanılmıştır. Zener diyot, yük direncine ters yönde paralel olarak bağlanmakta ve yüke gelen gerilim belirli bir değeri geçtiğinde iletme geçerek devreden geçen akımı arttırmaktadır. Bu akım, devreye konan 1 k $\Omega$ 'luk seri R<sub>5</sub> direnci üzerindeki gerilim düşümünü arttırdığından yüke gelen gerilim sabit kalmaktadır. Böylece yeterli geri gelme hızı, zener diyotun devrilme gerilimi ile ayarlanmak suretiyle elde edilmiştir.

En temel düzeyde bir bobinin akım – gerilim ilişkisi ;

$$\frac{di_{bobin}}{dt} = \frac{V}{L} \quad (2.1)$$

şeklindedir.

Azami geri gelme hızı, bobine uygulanan akımdaki en hızlı değişme oranıdır. Bu durum (2.2) eşitliği ile aşağıda ifade edilmiştir. Sabit bir endüktans ile geri gelme hızı bobinden geçen azami negatif gerilim ile ayar edilmiştir. Bu da, zener diyotun devrilme gerilimi olan 36V'dur.

$$\frac{-di_{max}}{dt} = \frac{V_{zener}}{L} \quad (2.2)$$

Elektronik malzemenin zarar görmemesi için yükselteç kapatıldığında ortaya çıkacak yüksek değerlerdeki geri dönüş akımlarına karşı korunması gerekmektedir. Yükseltecin aniden kapatılması durumunda FET'in akış gerilimi yüksek değerlere çıkabilir. Bu da FET'in zarar görmesine neden olur. Bu olaya engel olmak için zener diyot gerilimi tutar ve akım, transistör ve direnç devresi üzerinde akar. Eşitlik (2.1)'den de görüleceği üzere akımın artmaya başlaması için akış gerilimi 28V'luk gerilim değerinin üzerine çıkmalıdır.

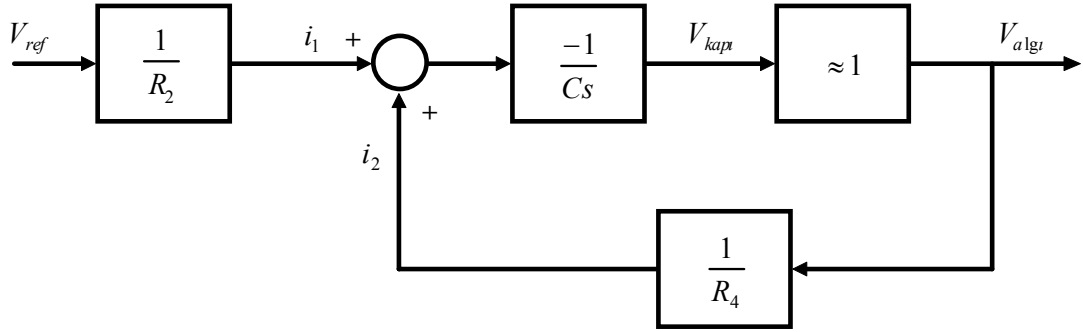
Yazılan iki eşitlik (2.1) ve (2.2)'de bobin direnci hesaba katılmamıştır. Bobin direnci deneysel olarak yaklaşık  $30\Omega$  olarak ölçülmüştür. Bobin endüktansına verilen azami pozitif gerilim değeri aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir. Eşitliğe göre, bobine uygulanan gerilimin bir kısmı bobin endüktansına bir kısmı da bobin direnci üzerine düşmektedir.

$$V_L = V_{kaynak} - iR_L \quad (2.3)$$

Kullanılan işlemsel yükseltecin düşük frekans kazancı  $10^6$  mertebesinde (1.8 milyon) ve bant genişliği ise 10MHz'dir. Bu bant genişliği sistem için gerekenden çok büyüktür. Bant genişliği bir alçak geçiren filtre tasarlanarak 1kHz'e çekilmiş ve böylece sistem gürültüsü en az seviyeye indirilirken kapalı çevrim kararlılığı da

arttırılmıştır. Doğrusal yükseltece ait kapalı çevrim blok diyagramı şekil 2.4’de gösterildiği biçimde modellenmiştir. Bu modelde kapı – kaynak kazancı yaklaşık 1’dir. 1kHz’de açık çevrim transfer fonksiyonunun büyüklüğünün de 1 olması gerekmektedir. Açık çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki (2.4) eşitliğinde verilmiştir.

$$LT = \frac{-1}{R_4Cs} \quad (2.4)$$



Şekil 2.4 : Doğrusal yükseltecin kapalı çevrim blok diyagramı

Filtre için 0.01µF’lık C<sub>3</sub> kapasitesi seçilmiş ve buna bağlı olarak R<sub>4</sub>=16kΩ kullanılmıştır. dSPACE kartının çıkışı normalde ± 10V’dir. Fakat daha basit olması amacıyla 0 – 10 V aralığı kullanılmıştır. Sistemde ihtiyaç olan azami akım değeri 2A’dır. Yani 0 – 10V ile 0 – 2A elde edilir. Buradan;

$$\frac{V_{algı}}{V_{ref}} = \frac{1}{5} \quad (2.5)$$

elde edilir.

Şekil 2.4’deki sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu (2.6) eşitliği ile ifade edilir;

$$\frac{V_{algı}}{V_{ref}} = \frac{R_4}{R_2(R_4Cs + 1)} \quad (2.6)$$

Bu transfer fonksiyonunda s=0 yazıldığında DC kazanç ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{V_{algı}}{V_{ref}} = \frac{R_4}{R_2} \quad (2.7)$$

Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi kazanç  $R_4$ 'ün  $R_2$ 'ye oranına eşittir. (2.5) eşitliği göz önüne alınıp (2.7) eşitliği düzenlendiğinde kullanılan  $R_4=16k\Omega$  için  $R_2=80k\Omega$  olması gerekir. Devrede  $80k\Omega$  yerine  $82k\Omega$ 'luk direnç kullanılmıştır. Sistemde yeterli kararlılığı sağlaması açısından 1/5 kazançlı bir doğrusal yükselteç kullanılmıştır.

### 2.3 Konum Algılayıcısı

Tasarlanan konum algılayıcısı tarafından algılanan ışık miktarı, asılı halde duran demir bilye ve manyetik çekirdek arasındaki boşluk ile doğru orantılıdır. Yani, boşluk ne kadar fazla ise algılanan ışık miktarı o kadar fazladır. Bilye, salınması sırasında ışık kaynağından gelen ışığın bir miktarının algılayıcı tarafına geçmesine engel olurken bir miktar ışık da algılayıcı tarafına geçmektedir. İdeal olarak, boşluk miktarı sıfırken bilye önünü tam olarak kestiğinden algılayıcı tarafına ışık geçmemeli yani çıkışında değer okunmamalıdır. Arada bilyenin olmadığı durum için ise çıkış değeri maksimuma ulaşır. Konum algılayıcısı, ışık kaynağı ve ışık algılayıcısından oluşmaktadır.

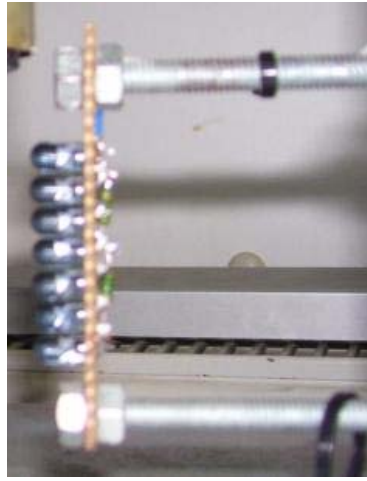
#### 2.3.1 Işık kaynağı

Diğer ışık kaynaklarına nazaran daha etkili olduklarından sistemde ışık yayan diyotlar yani LED'ler kullanılmıştır. Işık kaynağı şekil 2.5'de de gösterildiği gibi 7 adet kızıl ötesi (IR) LED'in birbirlerine seri olarak bağlanmasıyla oluşturulan dikey bir sıradan oluşmaktadır. Kızılötesi LED'lerde ışın şiddeti, akımın bir fonksiyonudur ve burada ışık şiddetinin birimi watt'dır. LED'lerin dalga boyu  $\lambda = 628nm$  ve çıkış yoğunluğu  $20mA$ 'de  $8000mcd$  (milicandela)'dir. Bu da  $1000mcd$  yaklaşık  $2W$ 'a denk geldiği düşünüldüğünde yaklaşık  $16W$ 'lık standart bir ampulden yayılan ışık şiddetinde bir ışığın yayıldığı anlamına gelir.

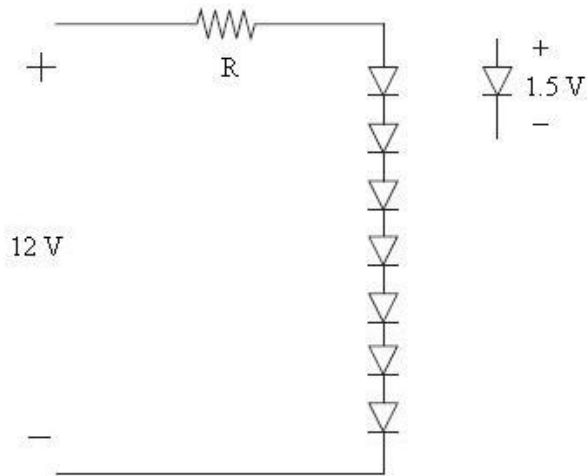
Işık kaynağının devre şeması şekil 2.6’da gösterilmiştir. Bir LED’e düşen gerilim 1.5V ve uygulanabilecek en büyük sürekli akım 20mA ‘dir. Burada uygulanacak akım LED’in karakteristik akım değeri olan 15mA olarak belirlenmiş ve bu akımı ayarlayabilmek için bir direnç kullanılmıştır. LED başına düşen gerilim 1.5V kabul edilerek Kirchoff’un gerilim yasasına göre aşağıdaki eşitlik kullanılır;

$$12V = iR + 7(1.5V) \quad (2.8)$$

yukarıdaki eşitlik çözümlendiğinde ortaya çıkan direnç değeri  $R = 100\Omega$ ’dur.



Şekil 2.5: Kızılötesi LED’lerden oluşturulan ışık kaynağı resmi



Şekil 2.6: Kızılötesi LED’lerden oluşturulan ışık kaynağı devre şeması

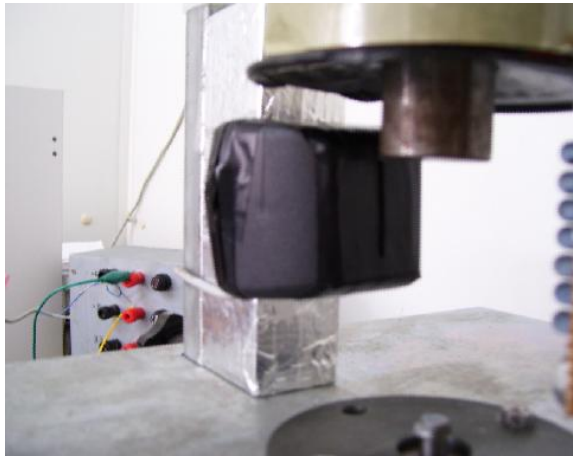


### 2.3.2 Işıık algılayıcısı

Sistemde, 13 adet fotodiyotun paralel bağlanmasıyla oluşturulan fotodiyot sırası demir bilye üzerinden geçen ışığı algılamaktadır. Fotodiyotlar, üzerine düşen ışığı elektrik akımına dönüştüren elemanlardır. Çalışma prensibi, yarı iletken malzemeler üzerindeki ışık etkisinin bir sonucudur. Gerilim uygulanmış bir yarı iletken üzerine uygun dalga boyunda bir ışık düşürüldüğünde pozitif ve negatif yüklü tanecikler oluşur ve devre üzerinden akarlar. Bu akma miktarı, uygulanan ışık miktarına bağlıdır. Bu şekilde ışık miktarı ile orantılı bir elektrik akımı doğmuş olur.

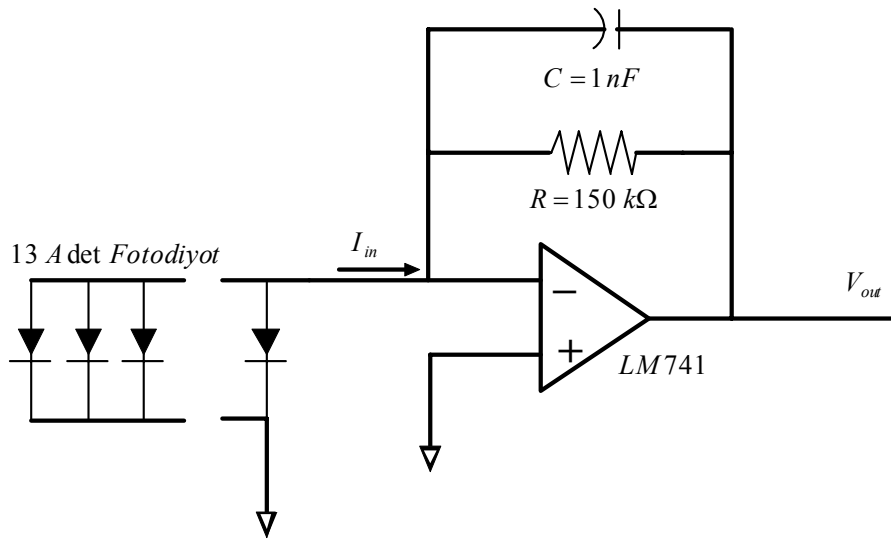
Sistemde, dış ortamdan gelecek ışığın bozucu etkilerini önlemek amacıyla üzerlerine bir kapak yerleştirilip kapakta oyuk açılmıştır. Bu sayede diğer kaynaklardan gelen ışığın bastırılmasıyla konum algılayıcısının kararlılığı artırılmıştır. Oyuk boyu bilyenin çapından büyük olmamalıdır. Aksi takdirde konum okumalarında hataların oluşması kaçınılmazdır. Dolayısı ile oyuk boyu 25mm olarak açılmıştır. Bu haliyle karşıya geçen ışığın tamamının sadece bilyenin üzerinden geçeceği ve dış ortamdan ışığın gelmeyeceği kabul edilmiştir.

En ideal durumda yani bilye ile çekirdek arasındaki boşluk sıfır olduğunda, fotodiyot sırası hiçbir akım üretmemelidir. Oluşturulan ışık algılayıcısı şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Üzeri kapak ile kapatılmış ışık algılayıcısı

Fotodiyotlar tarafından üretilen akımın gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Çünkü, bilgisayar işlem yapabilmek için akım değil gerilim girdisine ihtiyaç duyar. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için bir direnç - geçişli yükselteç kullanılmıştır. Şekil 2.8’de oluşturulan direnç – geçişli yükseltecin devre şeması gösterilmiştir. Devre şemasında da görüleceği gibi fotodiyotlardan elde edilen akımın toplamı LM741 entegresinin eksi bacağına bağlanmıştır. Yine bu uç ile işlemsel yükseltecin çıkışı arasına bağlanan direnç dönüştürücü (transducer) gibi davranarak Ohm yasasına göre üzerine düşen akımı gerilime çevirir ( $V = IR$ ).



Şekil 2.8 : Direnç-geçişli yükselteç devre şeması

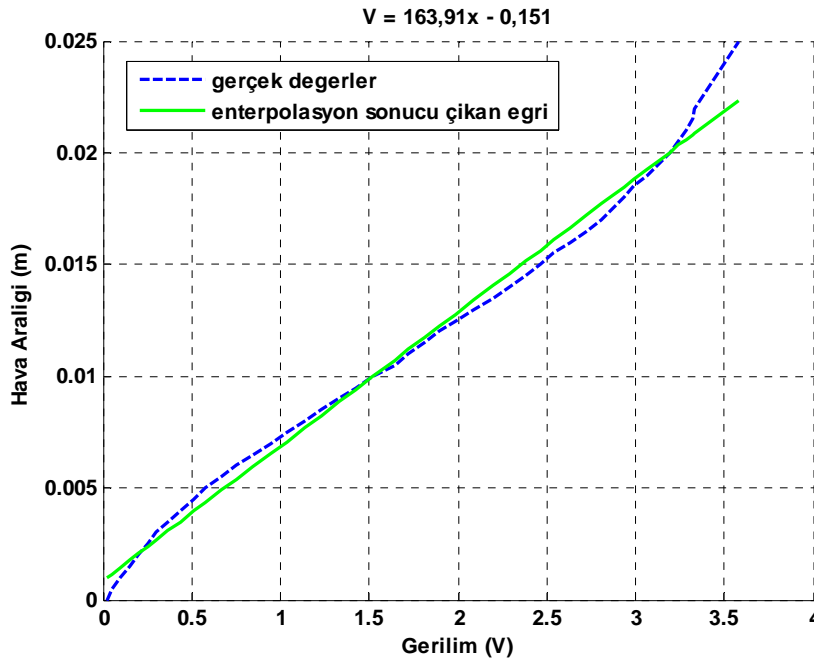
dSPACE dönüştürücü (analogdan dijitale) giriş gerilimini  $\pm 10V$  aralığında sınırlar. Işık algılayıcısından elde edilen gerilim değerini bu değerler arasında tutmak gerekmektedir. Oluşturulan sistemde konum algılayıcısından alınan çıkış  $4V$  civarındadır. Fotodiyotlardan alınan maksimum akım değeri deneysel olarak elde edilmiştir. Bilyenin asılı olmadığı durumdaki bu akım değeri  $I_{max} = 2.4 \times 10^{-5} A$  olarak ölçülmüştür. Ohm yasasına göre  $4V$ 'lik salınım için gerekli direnç  $R_1 = 166k\Omega$ 'dur. Güvenlik açısından direnç  $R_1 = 150k\Omega$  olarak seçilmiştir. Alçak geçiren filtre ile bant genişliğini  $1kHz$ 'e ayarlamak için  $1nF$ 'lik bir kapasite de ayrıca kullanılmıştır.

Konum algılayıcısı,  $10\mu m$  hassasiyetli bir mikrometre ile ayar edilmiştir. Farklı boşluk değerleri için bunlara karşılık gelen ve direnç-geçişli yükselteçten alınan

gerilim değerleri kaydedilmiş ve Matlab programı yardımıyla çizdirilmiştir. Elde edilen bilgilerden çıkarılan grafik şekil 2.9'da gösterilmiştir. Grafiği oluşturmak için yazılan matlab komut dosyası Ek-A'da verilmiştir. Grafikteki kesikli çizgi hava aralıklarında okunan gerilimlerin deneysel verilerini, düz çizgi ise enterpolasyon sonucu oluşturulan fonksiyonu temsil etmektedir. Bu fonksiyon (2.9) eşitliği ile ifade edilmektedir. Elde edilen verilerin ara değerlemesi (enterpolasyonu) sonucu çıkarılan birinci dereceden kalibrasyon eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$V = 163,91x - 0,151 \quad (2.9)$$

Gerilim birimi V (volt) ve hava aralığı x'in birimi de m (metre)'dir. Yukarıdaki fonksiyonda, bilyenin bulunduğu her konum bir gerilim değerine karşılık gelmektedir.



şekil 2.9 : Konum ile gerilim arasındaki ilişkiyi gösteren eğri

Deneysel veriler sonucu oluşturulan eğri ile bu verilerin enterpolasyonu yapılarak oluşturulan eğrinin, küçük sapmalar dışında, hemen hemen aynı olduğu görölmektedir. Bu nedenle grafiğe bakarak, konum algılayıcısının istenen çalışma aralığında yaklaşık doğrusal olduğu söylenebilir.

## 2.4 Işık Algılayıcısının Eksiklikleri

Çalışmada, bilyenin salınması sırasında ışık kaynağından kaynaklı istenmeyen davranışların ortaya çıktığı görülmüştür. Bilyenin biçimi küresel olduğundan, düşey ekseninde fotodiyot sırasının ışığı aynı miktarda algılayabileceği tek bir nokta vardır. Bilyenin yapısı gereği, bilyenin etrafından da fotodiyot tarafına bir miktar ışık geçer. Eğer salınan cisim silindirik yapıda olsaydı uçları düz olduğundan, cismin yanlarından fotodiyot tarafına gelecek ışık çok aza inecek ve daha iyi bir sonuç elde edilecektir. Böylece, fotodiyot sırası tarafından algılanan ışık konumla daha uyumlu hale gelecektir.

Silindirik şeklinde bir cismin daha kararlı bir yapı oluşturacağı düşünülerek cisim salınmaya bırakılmıştır. Şekil 2.10'da sistemin bu haliyle çekilmiş fotoğrafı gösterilmiştir.



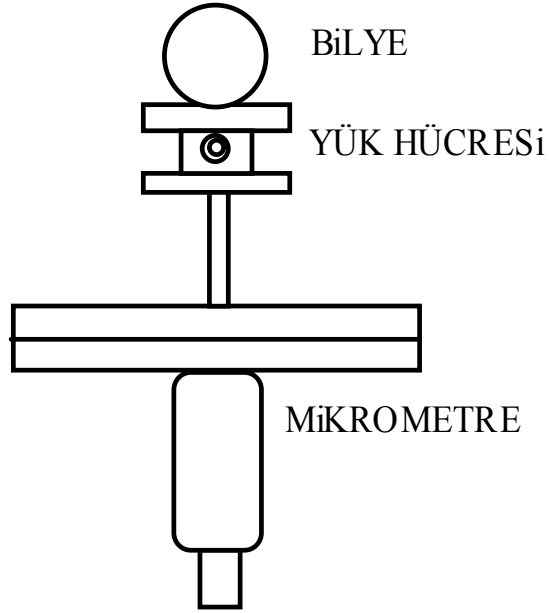
Şekil 2.10 : Silindirik yapıda bir cismin salınması

Sonuç olarak, algılanan ışığın yoğunluğu ile algılayıcı çıkışından ölçülen konum bilgisi birinci dereceden ilişkilidirler. Konum algılayıcısı sabit bir ışık yoğunluğuna göre ayar edilmiştir. Algılanan ışığın yoğunluğunun fotodiyot sırası boyunca aynı olması ve değişmemesi istenir. Elde edilen değerler ışık yoğunluğundaki ufak sapmalar için sorun oluşturmaz fakat ışık yoğunluğundaki büyük sapmalar için geçerli değildir. Işık kaynağındaki yoğunluk farklılıkları gerilim kaynağından alınan gerilim değerindeki muhtemel değişimlerden kaynaklanır. Işık kaynağı devresini

tekrar hatırlatmak gerekirse; LED'lerden akan akımın düzenli olması direkt olarak gerilim kaynağından alınan gerilim değerinin düzenli olmasına bağlıdır. Bu nedenle, gerilim kaynağındaki toleranslar konum ölçümünde oldukça önemlidir.

## 2.5 Yük Hücresi ve Mikrometre

Yük hücresi ve mikrometrenin birleştirilmesi ile oluşturulan yapı konum algılayıcısının kalibrasyonu ve kuvvet – akım – hava aralığı ilişkisinin ortaya çıkarılması amacıyla oluşturulmuştur. Kullanılan yük hücresi 0.1g hassasiyete sahip bir hassas teraziden sökülmüş ve 10 $\mu$ m hassasiyetli mikrometre üzerine monte edilmiştir. Bu yapının şematik gösterimi şekil 2.11'de, resmi ise şekil 2.12'de gösterilmiştir.



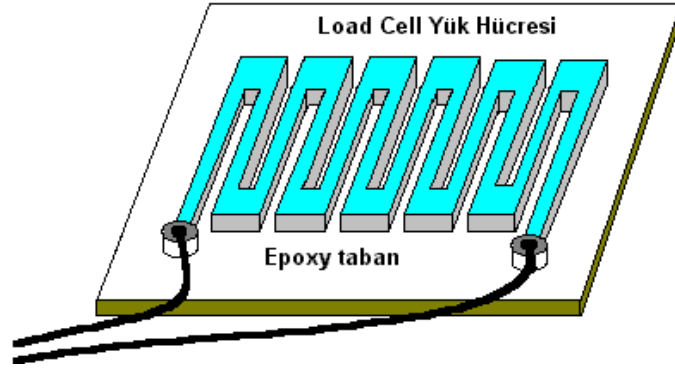
Şekil 2.11 : Mikrometre ve yük hücresinden oluşan sistemin şematik gösterimi



Şekil 2.12 : Mikrometre ve yük hücresinden oluşan sistemin resmi

İdeal olarak bir yük hücresi, yalnızca dış etkiyle meydana gelen zorlama sonucu hücredeki şekil değişikliğini elektriksel dirence çevirir. Bununla beraber uygulamalarda çevre sıcaklığı, malzemenin imalat kusurları, yük hücresinin altındaki yüzeye olan yapışma miktarı ve yük hücresinin yapıştırıldığı metalin esnekliğe karşı fiziksel kararlılığı, elektriksel direncinin değişimini etkileyen faktörlerdir.

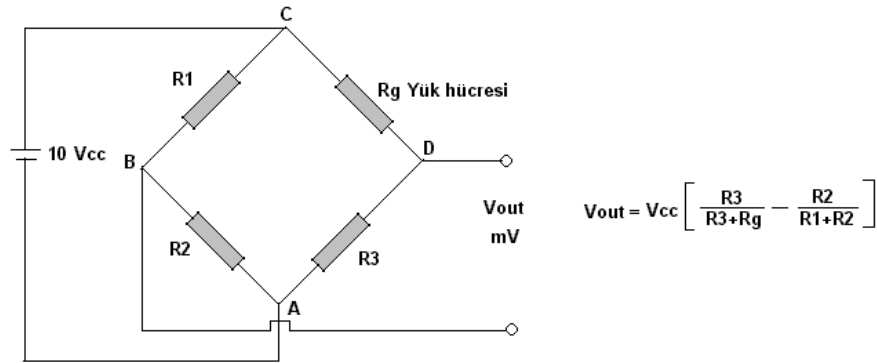
Optik tabanlı, kapasitif , endüktif ve mekanik tip yük hücreleri mevcuttur. Burada kullanılan yük hücresi en yaygın kullanım alanına sahip olan mekanik tip yük hücresidir. Bu tip ölçüm hücreleri 0.025mm çapındaki iletken tellerin bir ızgara gibi sarılarak epoxy reçine kaplı ince bir film tabakası altında gerilmeye maruz kalacak yüzeye yapıştırılmak suretiyle kullanılır. Bir yük hücresi yapısı şekil 2.13'de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.13 : Bir yük hücresi (load cell) yapısı

Bu yüzeye bir kuvvet uygulandığında, yüzeydeki uzunluk değişimi, hücrenin boyunu uzatıp çapını küçültür ve gerilme kuvvetine bağlı olarak şeritli ızgaranın direncini doğrusal olarak değiştirir. Bu ızgara tipli yük hücresi ve metalik bağlama yapışkanı birlikte hareket eder, bu yapışkan aynı zamanda metal yüzeyi ile yük hücresi arasında yalıtkan olarak kullanılmaktadır.

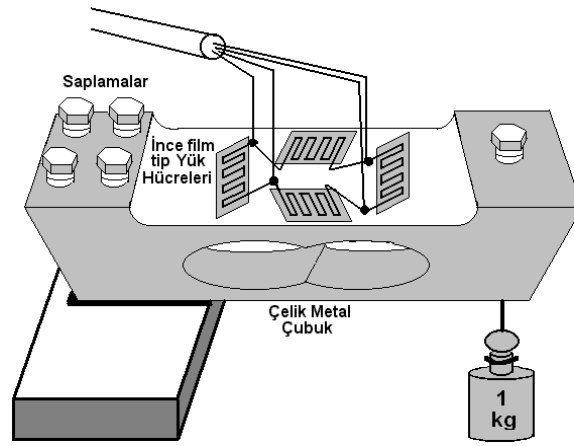
Bir yük hücresinin gerilim etkisiyle ürettiği elektriksel sinyalin kararlı olması ve çevresel şartların (örneğin sıcaklık) ölçmede yarattığı sapmaların etkisinin hesaba katılması gerekir. Bu etkenler sistemde kullanıldığı gibi kısa süreli testlerde engel oluşturmamaktadırlar.



Şekil 2.14: Wheatstone köprüsü devre şeması

Wheatstone köprüsü endüstride pek çok parametrenin ölçümünde bir referans seviyesi esas alınarak, karşılaştırmalı sinyal üretiminde kullanılan bir devredir. Şekil 2.14’de Wheatstone köprüsü yapısı gösterilmiştir. Çalışma prensibi olarak, eğer  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ve  $R_g$  dirençleri birbirine eşitse  $V_{cc}$  beslemesi köprü girişine uygulandığında B ve D çıkışında herhangi bir gerilim okunmaz .Yani çıkı sıfırdır.

Eğer yük hücresinin  $R_g$ 'ye bağlı olduğu bacakta uygulanan yükten dolayı yük hücresinin direnci değişirse çıkış terminalinde gerilim artmaya başlar ve değer okunur. G köprü dizaynı da denilen bu yöntemde yük hücresine uygulanan kuvvetin etkisiyle  $R_g$  direnci değişir ve bir çıkış değeri elde edilir. Yük hücreleri Wheatstone köprüsüne 4 adet hücre bağlanarak oluşturulur. Aşağıda sistemde kullanılan yük hücresinin prensip şeması şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Wheatstone köprüsü kullanılarak üretilmiş bir yük hücresi

Yük hücreleri 4 adet olmak üzere çelik karkas üzerine monte edilmiştir. Dizayn olarak aşağı – yukarı, ileri ve geri bölgelerden gelen tüm hareket ve güçleri ölçebilecek kabiliyettedir. Çünkü bu bölgelerden gelen herhangi bir gerilmeye karşı dört hücreden biri mutlaka cevap verecektir. Ayrıca bu dört hücre Wheatstone köprüsünün her bir bacağına monte edildiğinden çevre sıcaklığındaki bir artış hepsini aynı oranda etkiler ve farklı direnç uyumsuzluğu da ortadan kalkmış olur.



## **BÖLÜM 3 KUVVET ÖLÇÜMÜ**

### **3.1 Giriş**

Geri beslemeli doğrusallaştırmanın başarılı olabilmesi için sistemin gerçekçi bir matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Cebirsel dönüşümler, böyle bir yaklaşımı bütün dinamiklerin modellenmesi ve hataların minimuma indirilmesi noktasında modellemenin çok dikkatli yapılmasını zorunlu kılar. Bu da getireceği zorluklar açısından düşünüldüğünde yöntemin dezavantajlarından biridir. Çünkü modellemenin mümkün olmadığı durumlar mutlaka oluşacaktır. Bu projede, teoriye dayalı hesaplamaların yanında deneysel olarak elde edilmiş bilgilerden de yararlanılmış ve ikisinin de kullanıldığı bir yöntem uygulanmıştır.

### **3.2 Manyetizma**

Genelde herhangi bir akım ilmeği manyetik alana ve buna karşılık gelen manyetik momente sahiptir. Benzer şekilde bir maddedeki manyetik momentler, iç atomik akımlardan kaynaklanırlar. Bu momente manyetik dipol momenti adı verilir. Manyetik dipol momentlerinin aralarındaki karşılıklı etkileşim kuvvetleri ve dış manyetik alan etkileşimleri, manyetik maddeyi anlayabilmek bakımından önemlidir. Bu amaçla, paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik olmak üzere üç madde çeşidi tanımlanır. Paramanyetik ve ferromanyetik sürekli dipol momentli atomlara sahiptir. Diyamanyetik maddelerin atomları ise sürekli dipol momentine sahip değildir. Yani mıknatıslanma özellikleri yoktur.

Daha açık olarak, cisimler az veya çok şiddetli olmak üzere manyetik özellikler gösterirler. Maddeler manyetik alandaki mıknatıslanmalarına göre paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik olmak üzere üç kısma ayrılırlar. Ferromanyetik maddeler özellikle sürekli mıknatısların yapımında kullanılırlar. Sistemde kullanılan

bobin çekirdeği olarak, mıknatıslanma özelliğinin iyi olması sebebiyle ferromanyetik bir malzeme kullanılmıştır.

Maddelerin mıknatıslanması, birim hacimdeki atomlara ait manyetik momentlerin uygulanan dış manyetik alanla aynı doğrultulu hale gelmeleri olarak tanımlanır. Maddenin manyetik halini anlatım amacıyla mıknatıslanma vektörü ( $M$ ) denen bir niceliğin kullanılması kolaylık sağlamaktadır.  $M$  birim hacim başına manyetik momenti gösterir [10].

Bir maddenin toplam manyetik alanı, maddenin mıknatıslanmasına ve ona uygulanan dış alana bağlıdır. İçinden akım geçen içi boş bir toroid sargısının içinde akım tarafından oluşturulan manyetik alan  $B_0$  olsun. Eğer bu sarım içi bölgeye manyetik bir çekirdek madde konursa ve bu çekirdek maddede oluşan manyetik alan da  $B_m$  ise, bu kez oluşturulan toplam manyetik alan değeri;

$$B = B_0 + B_m \quad (3.1)$$

olacaktır.

Burada  $B$  değeri  $B_0$  'dan çok daha büyük değerlerdedir.  $B_m$ , demir içindeki dipol momentlerin aynı doğrultulu hale gelmesinden kaynaklanmaktadır ve buna göre  $B_m$  manyetik alanı  $M$  mıknatıslanma değeriyle orantılıdır.

Diğer taraftan  $B_m$ ,  $M$  mıknatıslanma vektörü cinsinden;

$$B_m = \mu_0 M \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Buna göre maddedeki toplam alan;

$$B = B_0 + \mu_0 M \quad (3.3)$$

dir.

B 'yi veren tüm bağıntılarda boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı  $\mu_0$  , I akım şiddeti ve akımın şekline bağlı geometrik çarpanlar bulunmaktadır. Bu bağıntıların  $\mu_0$  'a bölünmesiyle oluşan bağıntıya manyetik alan şiddeti denir ve bu alan H sembolüyle gösterilir ve;

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir.

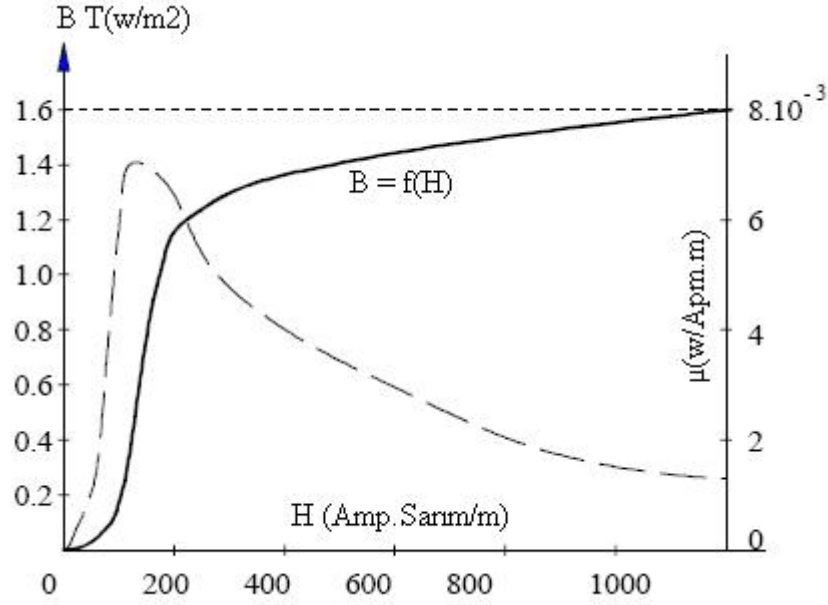
Aynı şekilde maddenin manyetik geçirgenliği de  $\mu$  ile ifade edilir. Ferromanyetik maddelerde  $\mu \square \mu_0$  bağıntısı söz konusudur. Yani, ferromanyetik maddelerin manyetik geçirgenliği boşluğunkinden çok büyük olduğundan  $B_m \square B_0$  'dır.

Ferromanyetik maddelerde mıknatıslanma vektörü M, manyetik alan şiddeti H'nin doğrusal fonksiyonu değildir. Bunun nedeni  $\mu$ 'nün maddenin karakteristik özelliği olmaması ve onun önceki durumuna ve geçirdiği işlemlere bağlı olmasıdır.

Bobin çekirdeği içindeki manyetik alanın çizgilerinin değişmesiyle bu çizgilerin kendi doğrultularına normal yüzey biriminden geçen toplam sayısı yani manyetik alan akısı da ( $\phi = \int BS \cos \theta$ ) değişecek ve onun değişmesi de bir indüksiyon elektromotor kuvveti meydana getirecek ve o da bir indüksiyon akımı oluşturacaktır. Bobinde meydana gelen manyetik alan ile manyetik alan şiddeti arasında;

$$B = \mu H \quad (3.5)$$

bağıntısı vardır. Bu bağıntıya göre B – H arasındaki ilişkiyi gösteren grafik şekil 3.1'de gösterilmiştir.

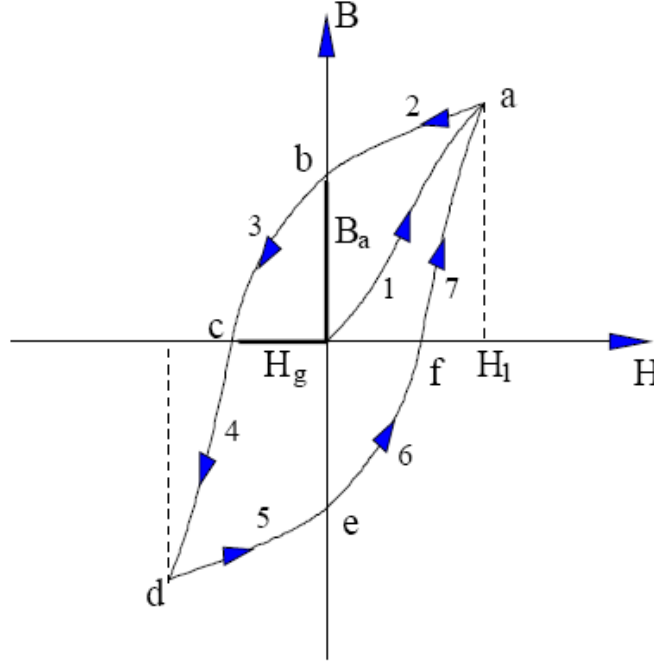


Şekil 3.1 : Bobin çekirdeği için B – H eğrisi

Doyum (saturasyon) olayı, demir çekirdekli bütün elektromıknatıslarda ortaya çıkan bir problemdir. Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi, manyetik alanın şiddeti bobinden geçen akım şiddeti ile doğru orantılı olarak artarken doyma noktasına yaklaştıkça manyetik alanın artması daha yavaş olur. Buna göre mıknatıslığı olmayan madde giderek artan bir şekilde mıknatıslanır (B artar) ve doyma durumundan sonra eğri yatay duruma gelerek manyetik alanın değeri (mıknatıslanma şiddeti) hemen hemen sabit kalır. Yine buradan anlaşılacağı gibi, kullanılan çekirdek için  $\mu$  değeri de sabit olmayıp manyetik alanın şiddetinin fonksiyonu olarak  $\mu = f(H)$  şeklinde değişir ve bu değişim doğrusal değildir.  $\mu$  'nün değeri demir malzemenin manyetik bakımdan geçmişine bağlıdır, bu da histerezis olayını meydana getirir.  $B = f(H)$  değişim eğrisinin her hangi bir noktasına orijinden çizilen çizginin eğimi ele alınan noktadaki  $\mu$  değerini verir.

Ferromanyetik bir malzeme önceden mıknatıslanmamışsa ve manyetik şiddeti (mıknatıslanma) sıfır değerinden itibaren devamlı olarak arttırılırsa  $B = f(H)$  mıknatıslanma eğrisi elde edilir. Bu eğri şekil 3.2'de verilmiştir. Bobin içindeki mıknatıslanmamış ferromanyetik çekirdeğin sargılarındaki mıknatıslayıcı akım sıfırdan başlayarak H manyetik şiddetinin değeri  $H_1$  'e kadar arttırdığında  $B = f(H)$  değişimi şekildeki 1 yolunu takip eder ve 0-a eğrisi elde edilir. Manyetik şiddet

akımın etkisiyle  $H_1$ 'den tekrar sıfıra düşürülürse değişim 2 yolunu takip ederek a-b eğrisini çizer. Burada,  $H = 0$  olmasına karşılık manyetik alanın değeri  $B_b$ 'dir.



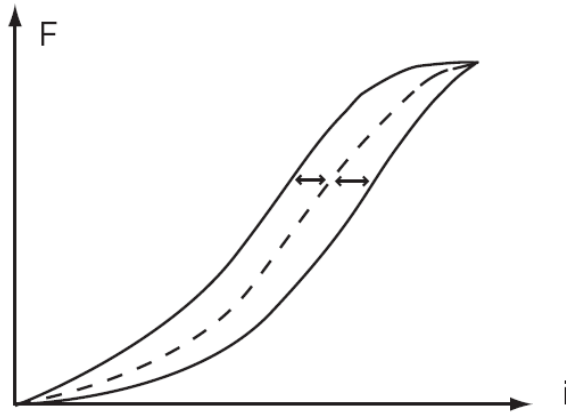
Şekil 3.2 : Bir manyetik materyal için B - H eğrisindeki histerezis

Buna göre bobindeki manyetik alan değerinin, yalnızca manyetik alan şiddetine değil, malzemenin geçmişine de bağlı olduğunu anlaşılır. Daha açık olarak çekirdek sanki manyetik bir hafızaya sahiptir ve mıknatıslayıcı akım kesildikten sonra bile b noktasına kadar mıknatıslanmış olduğunu hatırlar. Bu noktada çekirdek daimi mıknatıs haline gelmiştir. Bu davranışı,  $B = f(H)$  değişiminde azalan H değerlerine ait kısmının artan H değerlerine ait kısmı ile çakışmaması ile meydana çıkar ve buna histerezis denir. Şekil 3.2 aynı zamanda histerezis eğrisi olarak adlandırılır.

Şekil 3.2'deki 0-b veya 0-e manyetik alan değerleri, manyetik şiddetin ( $H = 0$ ) sıfıra indirildiği zamanki değerleridir. Bu değerlere malzemenin artık mıknatıslanması ( $B_a$ ) denir. 0-c ve 0-f manyetik şiddet değerleri ise, malzemenin zıt yönde doymaya vardıktan sonra manyetik alan değerinin sıfıra indirilmesi için gerekli zıt manyetik şiddettir. Bunlara giderici kuvvet ( $H_g$ ) denilmektedir.

Histerezis olayının bir sonucu olarak, histerezis çevrimini her çizisinde, çekirdek içinde ısı oluşacak dolayısıyla enerji kaybı olacaktır. Bu problem, manyetik

süspansiyon sistemi için, histerezis eğrilerinin aritmetik ortalamalarının alınmasıyla kabul edilebilir bir oranda giderilmiştir. Aritmetik ortalama alınırken histerezis eğrileri ikiye ayrılmış ve her nokta için ortalama alınmıştır. Sonuçta kuvvet ile akımı ilişkilendiren tekdüze bir fonksiyon ortaya çıkmıştır. Bu da sistem için yeterli bir çözümdür. Oluşan fonksiyonu şekil 3.3’de gösterilmiştir. Sonuç olarak kuvvet bu şekliyle histerezise rağmen uygulanacak akımla akıcı bir şekilde kontrol edilebilir bir durumdadır. Manyetik açıdan, daha yumuşak bir çekirdek seçimi de bu problemin başka bir çözümü olabilir. Çünkü yumuşak malzemelerde histerezis eğrisi daha dar ve dolayısıyla enerji kayıpları daha az ve manyetiklik daha kolaydır.



Şekil 3.3 : Ortalamalar alınarak oluşturulan kuvvet – akım eğrisi

Faraday- Henry indüksiyon yasasına göre; bir devrede oluşan indüksiyon e.m.k. devreden geçen manyetik akı değişimine eşittir. Manyetik akının değişimi bir devrede emk ve bir akım oluşturabilir. Benzer şekilde manyetik alan içinde hareket eden metal parçaların iç kısmında da girdap akımları denen akımlar oluşur. Isı şeklinde enerji kaybına neden olan girdap akımları genellikle istenmez. Bu nedenle, girdap akımlarını minimum hale getirerek sistemin verimi artırılmalıdır.

### 3.3 Elektromıknatis Kuvvet

Elektromıknatis tarafından üretilen ve bilye üzerine uygulanan kuvvetin ifadesi genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$F = C\left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (3.6)$$

Bu ifadeye  $F$  bilyeye uygulanan elektromanyetik kuvvettir ve birimi N (newton)'dir.  $x$  ise bobin çekirdeği ile bilye arasındaki hava aralığıdır ve birimi m (metre)'dir.  $i$  bobin içinden akan akımdır ve birimi A (amper)'dir. Hava aralığı düşey ekseninde değişir ve bu mesafenin artması bilyenin bobinden uzaklaşması anlamına gelir. (3.6) ifadesinin sistem için basitleştirilmiş bir eşitlik olduğu ve birçok gerçeğin şimdilik ihmal edildiği unutulmamalıdır. İhmal edilen bu etkenler daha sonra deneysel olarak ortaya koyulacaktır.

Manyetik çevrim incelendiğinde; akı yolu kablo, bobin gerilim kaynağı, hava aralığı direnç ve akı da akım gibi düşünülebilir. Tıpkı akım gibi sistemde akının akması için devrenin kendini tamamlaması bir kapalı devre bulunması gerekir. Hava aralığı kapanırken direnç de sifira yaklaşır. Böylece akım sonsuza gider. Dolayısıyla akı da sonsuza gider. Gerçekte, kablonun az da olsa bir direnci vardır. Yani (3.6)'da öngörüldüğü gibi sıfır hava aralığında bilyeye uygulanan kuvvet sonsuz değildir. Bunun için  $x$  ifadesine sabit bir  $x_0$  eklenerek ideal olmama durumu (non-ideality) ortadan kaldırılmış olur. Bu  $x_0$  değeri deneysel veriler ışığında daha sonra hesaplanacaktır.

### 3.4 Elektromıknatıs Kuvvetinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

$C$  ve  $x_0$ 'ın deneysel olarak hesaplanması aşaması :

$$F = C \left( \frac{i}{x + x_0} \right)^2 + ek \text{ terimler} \quad (3.7)$$

$C$  sabiti maddenin karakteristik özelliklerine göre değişiklik gösterir. Bunun yanında maddenin fiziksel yapısı  $C$  değerini belirler.

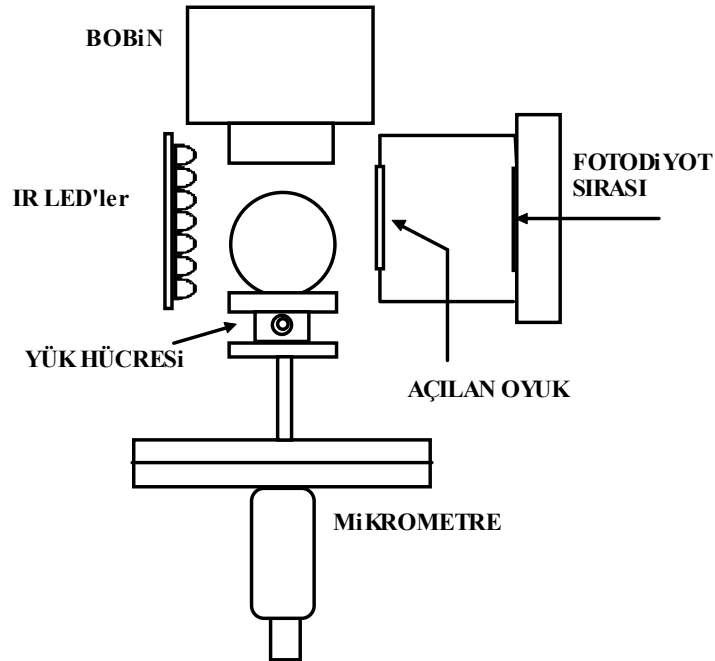
Deneysel bölümde ;

- Yük hücresi + mikrometre
- Doğrusal yükselteç
- dSPACE kartı

kullanılmıştır.

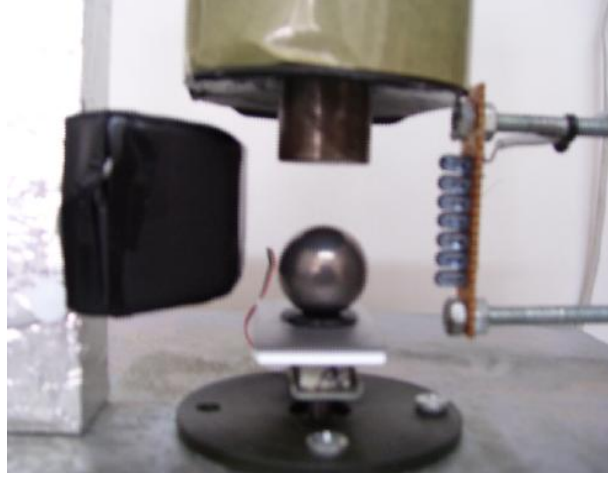
Kullanılan sistemin şeması şekil 3.4’de, fotoğrafı ise şekil 3.5’de gösterilmiştir. Yük hücresi ve mikrometreden oluşturulan birleşim sayesinde hava aralığının çok ufak değişimli değerleri için gerilim bilgileri elde edilmiş ve bu bilgiler daha sonra işlenmek üzere Matlab yardımıyla dSPACE kartına aktarılmıştır.

Doğrusal yükseltecin dinamik karakteristiği bir akım kaynağı görevi görecektir. Gerilim bilgisini alır ve  $1\Omega$ ’luk algılama direnci üzerinden bu bilgiyi akıma dönüştürür. Ortaya çıkan akım da bobine uygulanır. Sonuç olarak, elektromanyetik akım 0 – 2A arasında zamana bağlı olarak sinüsoidal bir biçimde salınır.



Şekil 3.4 : Kuvvet ölçümü düzeneği şeması





Şekil 3.5 : Kuvvet ölçümü düzeneğinin resmi

### 3.5 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

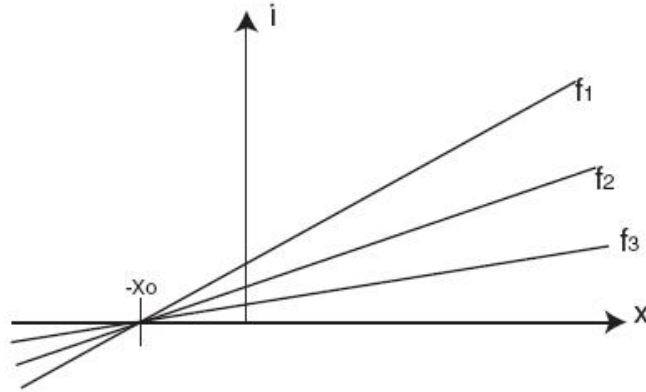
Bir veri toplama kartı kullanılarak farklı hava aralığı değerleri için akım ve kuvvet ölçümleri alınmış ve Matlab ile okunabilir halde aktararak kaydedilmiştir. Burada verilen her hava aralığı değeri için alınan her bir ölçüm ayrı ayrı kuvvet – akım ilişkisi hakkında bilgi vermektedir. Bu verilerden, her biri farklı satır vektörü olan (3.8)’deki gibi bir matris elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} f_1 & i_1 & x_1 \\ f_2 & i_2 & x_2 \\ f_3 & i_3 & x_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

(3.6) eşitliği eğer çekirdeğin manyetik geçirgenliği (permeability) sonsuz yada özdirenci 0 ise geçerli olur. Fakat gerçekte çekirdeğin manyetik geçirgenliği sonsuz değildir. Dolayısıyla, demir çekirdek bir özdirence sahiptir. Sonlu geçirgenlikten dolayı (3.7) eşitliğinde  $x_0$  terimi eklenmiştir. Bu değer, hava boşluğunun bir fonksiyonu olarak akım ile kuvvet eğrilerinin çizdirilmesi ile hesaplanmıştır. Bu eğriler Şekil 3.6’da verilmiştir. İdealde, özdirencin 0 olduğu durumda eğriler  $x = 0$  noktasında kesişmeleri gerekir. Fakat burada  $x = -0.0043$  noktasında kesişmişlerdir. Dolayısıyla  $x_0 = 0.0043$ ’dür. Akım  $x$ ’e bağlı bir fonksiyon olarak düzenlendiğinde

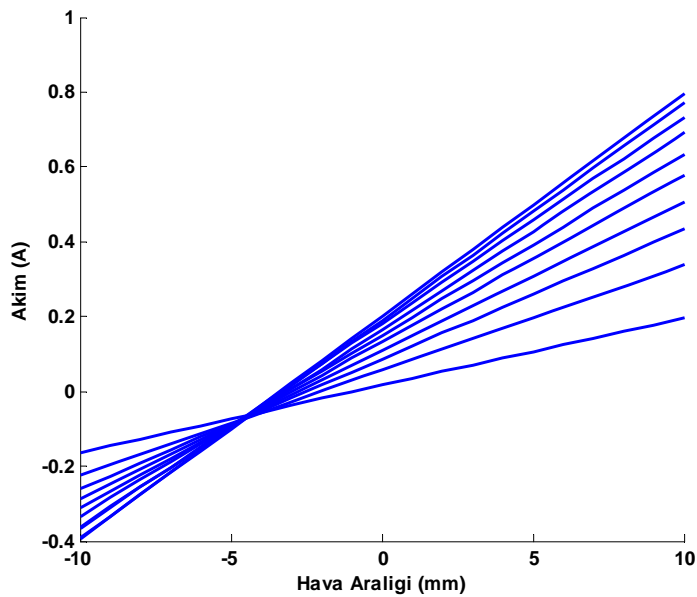
eğrilerin yatay ekseninde  $x = x_0$  noktasında birleştiği görülmüştür. (3.7) ifadesi ek terimler dikkate alınmadan akım çekildiğinde aşağıdaki ifade elde edilir.

$$i = \sqrt{\frac{F}{C}}(x + x_0) \quad (3.9)$$



Şekil 3.6 : Farklı kuvvet değerleri için tahmini akım – konum eğrisi

Kuvvetler değiştiğinde eğrilerin eğimi de değişir ve  $x_0$  ise  $x$ 'in ofset değeridir. Bütün kuvvet değerleri için eğriler  $x_0$ 'da kesişmelidir. Deneysel olarak elde edilen, farklı kuvvetler için oluşturulan akım – konum eğrisi şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu eğrilerin tahmin edilen eğrilere çok yakın çıktığı gözlenmiştir.



Şekil 3.7 : Farklı kuvvet değerleri için deneysel akım – konum eğrisi

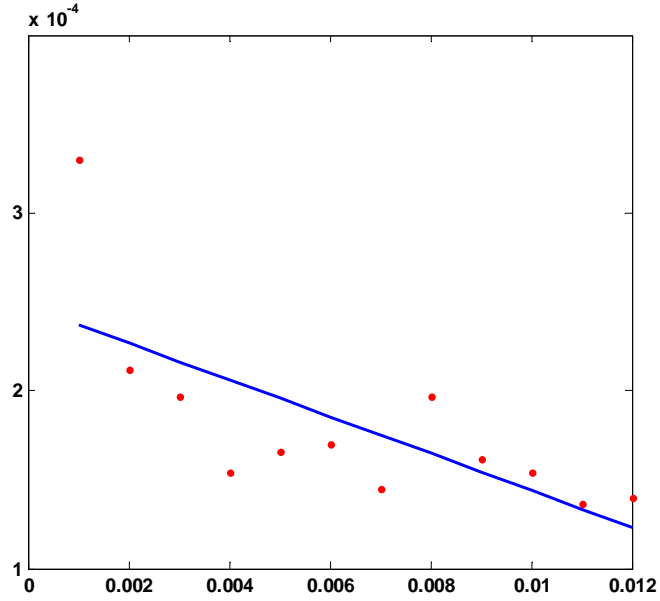
Kuvvet ifadesinde kullanılan  $C$  değerinin birimi  $\text{Nm}^2/\text{A}^2$ 'dir ve kurulan düzenek ile materyalin geometrisine bağlıdır.  $C$  deneysel olarak hesaplanmıştır ve bu değer  $x$ 'e bağlı doğrusal bir fonksiyon olduğu ortaya çıkmıştır. Kuvvet – akım eğrisi çizdirildiğinde, sabit bir kuvvet değeri için farklı boşluk değerlerinde farklı akımlar elde edildiği görülmüştür.  $C$ 'nin hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$C = F \frac{(x + x_0)^2}{i^2} \quad (3.10)$$

Farklı kuvvet değerleri için çizdirilen  $C - x$  grafiği şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu şekildeki veriler kullanılarak;

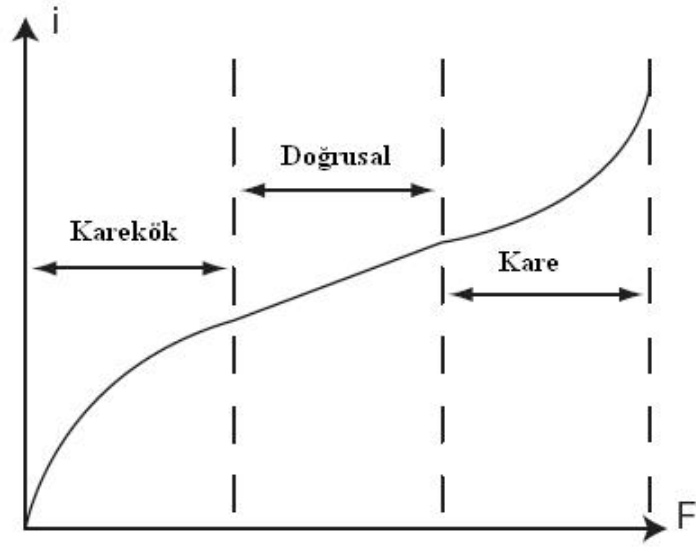
$$C = -0.0114x + 0.0002 \quad (3.11)$$

bulunur.



Şekil 3.8 : Farklı kuvvet değerleri için  $C - x$  ilişkisi

Genel haliyle kuvvet – akım ilişkisi şekil 3.9'daki gibi üç bölümde incelenebilir. Her bölüm ayrı ayrı formüle edilip birleştirildiğinde ortaya çıkan sonuç (3.12) eşitliğinde verilmiştir. Bu eşitlik daha önce bulunan ve deneysel olarak elde edilmiş bir sonuçtur [31].



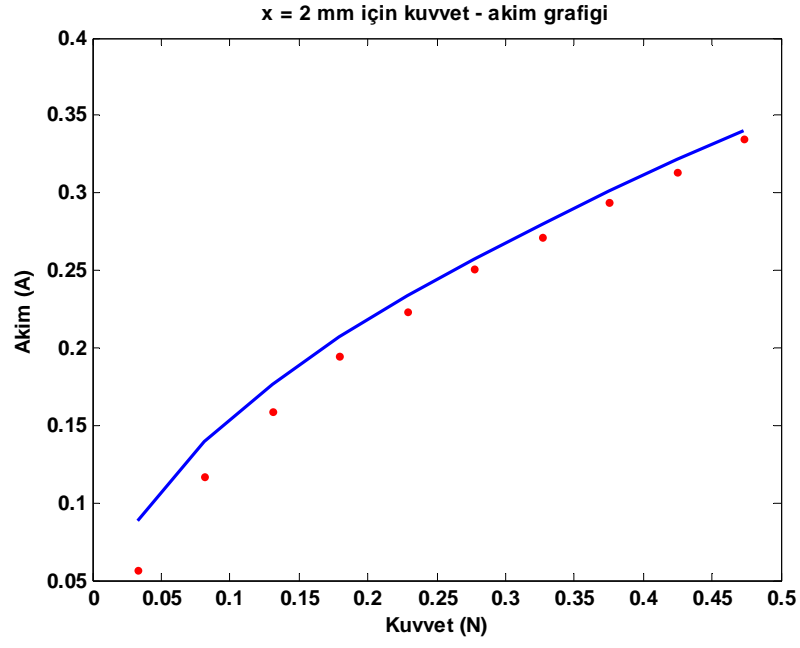
Şekil 3.9 : Kuvvet – akım eğrisi genel yapısı

$$i = (x + 0.0025) \sqrt{\frac{F}{C}} + (0.0195e^{\frac{x-0.002}{0.006}} - 2.5(x - 0.01))F + 400(x - 0.002)^2 F^2 \quad (3.12)$$

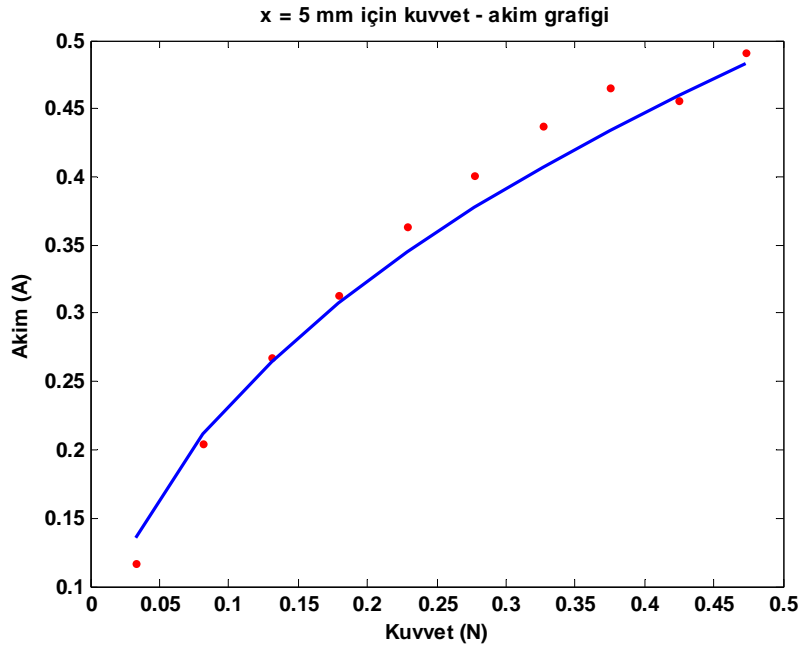
(3.12) denkleminin katsayıları üzerinde deneysel ayarlamalar yapıp kendi sistemimiz için bir akım grafiği elde edilmiştir. Bu akım eşitliği (3.13)'de gösterilmiştir. Şekil 3.10, şekil 3.11 ve şekil 3.12'de farklı boşluk değerleri için kuvvet – akım eğrileri gösterilmiştir. Grafiklerde, noktalar deneysel verileri, eğri ise (3.13) eşitliği kullanılarak üretilen eğriyi temsil eder. Bu grafikleri elde etmek için kullanılan kodlar Ek-B'de verilmiştir.

$$i = (x + x_0) \sqrt{\frac{F}{C}} + (0.0195e^{\frac{x-0.002}{0.006}} - 3.5(x - 0.007))F + 450(x - 0.0014)^2 F^2 \quad (3.13)$$

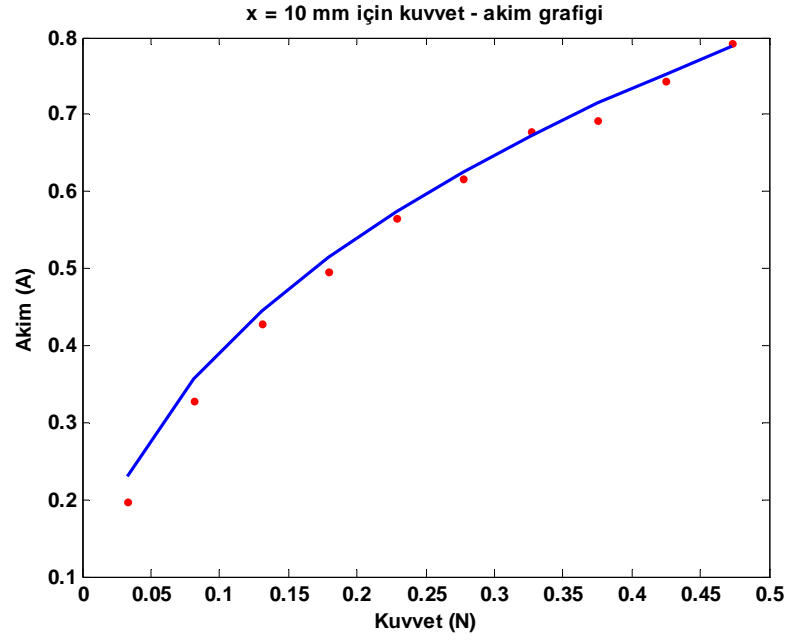
Eşitlikte, kuvvet (F) birimi newton, akım (i) birimi amper, hava aralığı (x) birimi metredir ve  $C = -0.0104x + 0.0002 \text{ Nm}^2/\text{A}^2$ 'dir. (3.13) eşitliği sadece  $x \geq 0.002$  için geçerlidir çünkü 0.002'den küçük değerler için negatif değerler elde edilecektir.



Şekil 3.10 : x = 2 mm için kuvvet – akım ilişkisi



Şekil 3.11 : x = 5 mm için kuvvet – akım ilişkisi



Şekil 3.12 :  $x = 10$  mm için kuvvet – akım ilişkisi

Şekilden de görüldüğü üzere, deneysel olarak elde edilen veriler ile (3.13) eşitliği sayesinde çizdirilen eğriler birbirleriyle hemen hemen bire bir örtüşmektedir. Bu sonuca bakarak elde edilen akım eşitliğinin geçerli bir eşitlik olduğu söylenebilir. Sistemin geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi ile kontrol edilebilmesi için, gerçeğe yakın bir kuvvet – akım – hava aralığı ilişkisi kurmak çok önemlidir. Bu çalışmada teorik bilgiler rehber alınmış ve daha sonra da kuvvet ilişkisinin modellenmemiş bölümleri deneysel yolla belirlenmiştir.

## BÖLÜM 4 DOĞRUSAL OLMAYAN (NONLINEAR) KONTROL TEORİSİ

### 4.1 Doğrusallaştırma

Normal şartlar altında; boşlukta serbest olarak bırakılan bir cisim yerçekimi kuvvetinin etkisi altında düşer. Serbest bırakılan bir cismin havada asılı olarak kalabilmesi için, cisme yerçekimi kuvvetine ters yönde bir kuvvet uygulanarak dengenin sağlanması gerekir. Kurulan sistemde yerçekimi kuvveti bobin tarafından üretilen kuvvet ile dengelenmektedir. Bobin yardımı ile bir bilyenin boşlukta salınması aşağıdaki nedenlerden ötürü hayli zordur.

- Açık çevrim (open loop) bir sistemdir.
- Kararsızdır.
- Kuvvet – akım – hava boşluğu arasında doğrusal olmayan bir ilişki mevcuttur.

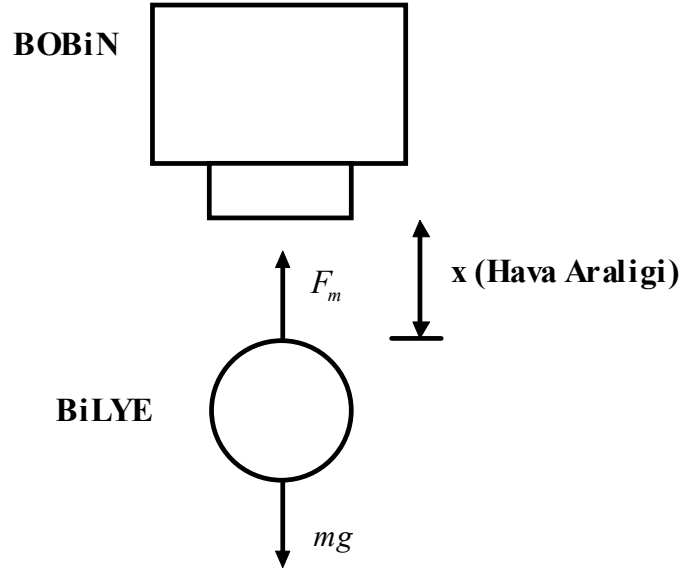
Yukarı yönlü manyetik kuvvet yerçekimi kuvvetini yendiğinde denge sağlanmış olur. Denge noktasındaki ufak bir sapma kararsızlık durumunun ortaya çıkmasına neden olur. Bu da bilyeyi denge noktasının çok uzağına götürebilir. Doğrusal olmayan (nonlinear) bu sistemde, belli bir çalışma noktasında doğrusallaştırma yapıp daha sonra oluşan doğrusal sistem için kontrol teknikleri uygulanmıştır. Amaç, sistem davranışını sınırlanmış değerlerin üzerine taşımaktır. İkinci kısımda bu metoda alternatif olan “geri beslemeli doğrusallaştırma” tekniğine yer verilmiştir. Sistemin geniş bir hava boşluğu aralığında çalışabilmesi için uygulanan denetleyicide geri beslemeli doğrusallaştırma tekniği kullanılmıştır.

Mekanik bir sistemin hareket denklemlerini bulurken Newton'un 2. yasasından yararlanılır. Bu yöntemde, sistemde bulunan kütle ve eylemsizliklerin serbest cisim diyagramları çizilir. Serbest cisim diyagramlarında yer alan kuvvetler bulunurken geometrik sınırlamalar dikkate alınarak bu kuvvetlere sebep olan elemanların eleman

denklemlerinden yararlanılır. Daha sonra, serbest cisim diyagramı çizilen kütle ve eylemsizliklere Newton'un 2. yasası uygulanarak hareket denklemi bulunur. Sistemin şekil 4.1'deki serbest cisim diyagramı göz önüne alınarak Newton'un 2. yasası uygulandığında sistemin hareket denklemi;

$$m\ddot{x} = mg - F_m \quad (4.1)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4.1 : Bilyeye etki eden kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı

Bir mıknatısın herhangi bir cisme uyguladığı çekim kuvveti cisim ile mıknatıs arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Sistemdeki bobin içinden akım geçirilmesi ile elektromıknatıs görevi görmektedir. Elektromıknatısın demir bilyeye uyguladığı kuvvet (4.2) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$F_m = C \left( \frac{i}{x} \right)^2 \quad (4.2)$$

Burada;  $x$  demir bilye ile elektromıknatıs çekirdeği arasındaki mesafedir ve birimi metre (m)'dir.  $i$  elektromıknatısa uygulanan elektrik akımıdır ve birimi Amper (A)'dir.  $C$  ise kuvvet katsayısını ifade etmektedir. (4.2) eşitliği (4.1) eşitliğinde yerine yazıldığında oluşan eşitlik aşağıdaki gibidir.



$$m\ddot{x} = mg - C\left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (4.3)$$

Doğrusal olmayan elemanların orijinal yapısal ilişkileri yerine, bir çalışma noktası etrafında geçerli olmak üzere, doğrusal ilişkilerinin kullanılmasına doğrusallaştırma (lineerleştirme) denir.

Bir sistemin dinamik davranışı diferansiyel denklemler ile temsil edilebilir. Bu diferansiyel denklemlerin karakteristikleri ifade ettikleri sistemin karakteriyle aynıdır. Doğrusal elemanlardan meydana gelmiş bir sistemin davranışlarını ifade eden diferansiyel denklemler de doğrusaldır. Buradaki sistemde olduğu gibi bazı elemanları doğrusal olmayan sistemlerin davranışları ise doğrusal olmayan diferansiyel denklemler ile tanımlanır.

Doğrusal diferansiyel denklemlerin çözümleri için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Buna karşılık doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözümleri için özel yöntemler kullanılması gereklidir ve uygulaması matematiksel işlemlerin karmaşıklığı nedeniyle oldukça zordur.

Doğrusallaştırma işlemi sırasında diferansiyel denklemdeki doğrusal olmayan terimler güç serisi biçiminde açılır; denklemler değişkenlerin çalışma noktasındaki değerlerinden olan sapmaları cinsinden yazılır ve sapmaların yüksek dereceli terimleri ihmal edilir. Bu işlemler Taylor Serisi açılımından yararlanarak gerçekleştirilir. Sistem için bu yaklaşımdan yola çıkılarak; kuvvet değeri bobinden geçen akım ve bobin çekirdeği ile bilye arasındaki hava aralığına bağlı olduğundan her iki değişken için de doğrusallaştırma yapılmalıdır. Hava aralığı ve bobine uygulanan akım değerleri, denge durumunun çalışma noktası olduğu kabul edilerek, çalışma noktasından olan sapmaları cinsinden (4.4) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} i &= \bar{i} + \tilde{i} \\ x &= \bar{x} + \tilde{x} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Burada  $\bar{\quad}$  indisi denge durumundaki değerleri,  $\tilde{\quad}$  indisi ise dengedeki ufak sapmaları ifade etmektedir. Kuvvet ifadesinin çalışma noktası etrafında Taylor Serisi açılımı

yapıldığında aşağıdaki ifade ortaya çıkar. Yüksek mertebeli terimlere ihtiyaç olmayacağından kullanılmayacaktır. Bu terimler sistemi daha karmaşık bir hale getirmektedir.

$$F_m = C \left( \frac{\bar{i}}{\bar{x}} \right)^2 + \left. \frac{\partial F_m}{\partial x} \right|_{\tilde{x}} + \left. \frac{\partial F_m}{\partial i} \right|_{\tilde{i}} + \text{Yüksek Mertebeli Terimler} \quad (4.5)$$

yukarıdaki denklemin kısmi türevli kısımları çözümlenirse aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F_m}{\partial x} = -2C \frac{\bar{i}^2}{\bar{x}^3} \tilde{x} \equiv -k_1 \tilde{x} \\ \frac{\partial F_m}{\partial i} = -2C \frac{\bar{i}}{\bar{x}^2} \tilde{i} \equiv k_2 \tilde{i} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} k_1 = 2C \frac{\bar{i}^2}{\bar{x}^3} \\ k_2 = 2C \frac{\bar{i}}{\bar{x}^2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Sistem denge durumundayken, yani  $F_m = mg$  için;

$$mg - C \left( \frac{\bar{i}}{\bar{x}} \right)^2 = 0 \Rightarrow mg = C \left( \frac{\bar{i}}{\bar{x}} \right)^2 \quad (4.7)$$

Bu bulunan değerler (4.3) eşitliğinde yerine koyulursa;

$$m\ddot{x} = mg - C \left( \frac{\bar{i}}{\bar{x}} \right)^2 + k_1 \tilde{x} - k_2 \tilde{i} \quad (4.8)$$

elde edilir.

(4.8) eşitliği kullanılarak ve tekrar düzenlendikten sonra sistemin çalışma noktası etrafındaki doğrusallaştırılmış hali sapmalar cinsinden elde edilmiş olur. Sistemin sapma denklemi (4.9) eşitliği ile verilmiştir.

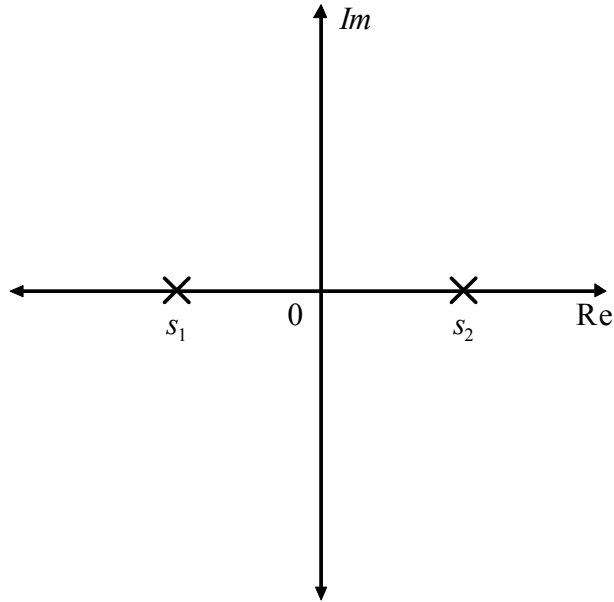
$$m\ddot{x} = k_1 \tilde{x} - k_2 \tilde{i} \quad (4.9)$$

Sistemin kutuplarının kavramsal ifadeleri (4.10) eşitliğinde, eğrisi ise şekil 4.2’de verilmiştir.

Sistemin kutupları ;

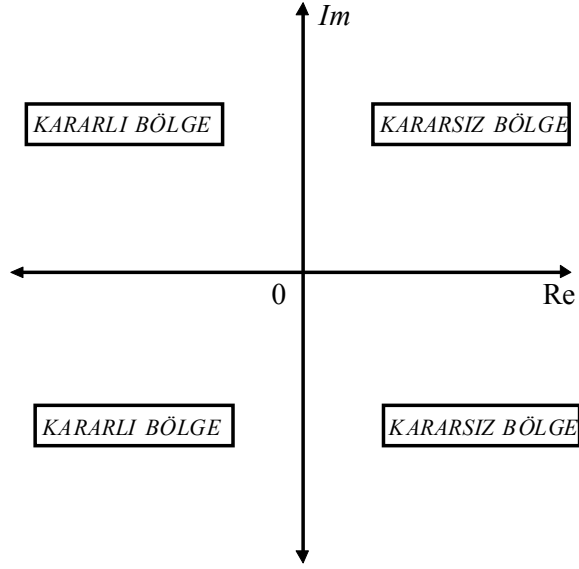
$$\begin{aligned} s_1 &= -\sqrt{\frac{k_1}{m}} \\ s_2 &= +\sqrt{\frac{k_1}{m}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4.2 : Sistemin kutuplarının yer eğrisi

Sistem tasarımında kullanılan pek çok davranış kriteri arasında en önemli olanı sistemin kararlılığıdır. Kararlı bir sistemde karakteristik denklem kökleri yada  $G(s)$  transfer fonksiyonunun kutupları, sağ yarı  $s$  düzleminde yada zahiri eksende bulunmamalıdır, bir başka deyişle kutupların tümü sol yarı  $s$  düzleminde bulunmalıdır.  $s$  düzlemindeki kararlı ve kararsız bölgeler şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi sistemde sağ yarı  $s$  düzleminde bir kök bulunmaktadır. Bu durum sistemin bu haliyle kararsız olduğunu gösterir. Tasarlanan denetleyici ile sağ yarı  $s$  düzlemindeki bu kök sol yarı  $s$  düzlemine çekilecektir. Sonraki bölümde kullanılan denetleyici yapısı daha detaylı anlatılacaktır.



Şekil 4.3 : s düzleminde kararlı ve kararsız bölgeler

Bu yaklaşımın bir dezavantajı ancak çalışma noktasından küçük sapmalar için geçerli olmasıdır. Yine de basit ve uygulaması kolaydır ve kalıcı hal formunda sunulabilir. Bu da hesaplamayı kolaylaştırır. Bir sonraki bölümde geleneksel doğrusallaştırma metodunun sınırlandırmalarının üstesinden gelip çalışma sınırlarını üst seviyelere çekecek bir yöntem olan geri beslemeli doğrusallaştırma yönteminden bahsedilecektir.

#### 4.2 Geri Beslemeli Doğrusallaştırma

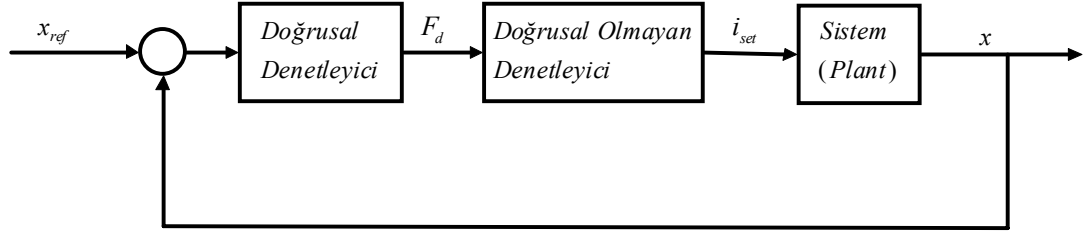
Geri beslemeli doğrusallaştırma yönteminin ardındaki ana fikir, doğrusal olmayan bir dönüşümü doğrusal sistem altında icra etmektir. Doğrusal olmayan kontrol hakkındaki detaylı bilgiler [23] ve [27]'de verilmiştir. Manyetik süspansiyon hakkındaki daha detaylı bilgiler [31] ve [32]'de yer almaktadır. Dönüşümün bütün çalışma noktası aralığında geçerli olması amaçlanmıştır. Bu bölümde, doğrusal geri besleme teknikleri kullanılarak bir denetleyici tasarlanmış ve doğrusal olmayan kontrol bilgisayar yazılımı sayesinde gerçekleştirilmiştir.

En temel haliyle buradaki kapalı çevrim sistem üç ana elemana sahiptir.

- Doğrusal denetleyici (linear compensator)
- Doğrusal olmayan denetleyici (nonlinear compensator)
- Sistem (plant)

Kontrol edilen bir sistem genellikle sisteme ait blok diyagramlarıyla ifade edilir. Şekil 4.4’de doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler ve kontrol edilecek sistemden oluşan kapalı çevrim blok diyagramı kavramsal biçimde gösterilmiştir.

Sistemde kuvvet, akım ile doğrusal olmayan bir ilişki sergilemektedir. Doğrusal olmayan bloğun görevi doğrusal olmayan bu ilişkiyi bütün çalışma aralığında doğrusal hale getirmektir. Ondan sonra geleneksel doğrusallaştırma teknikleri sistem kararlılığını ve performansını arttırmada çevrimin geri kalanında geçerlilik kazanacaktır.



Şekil 4.4 : Geri-beslemeli Doğrusallaştırma Kontrolü

Sistemde bobin, akım kontrollü doğrusal yükselteç ile sürülmektedir (doğrusal yükseltecin detayları bölüm 2.2’de anlatılmıştır). (4.6) eşitliğinden akım değeri çekilirse;

$$i_{set} = x \sqrt{\frac{F_d}{C}} \quad (4.11)$$

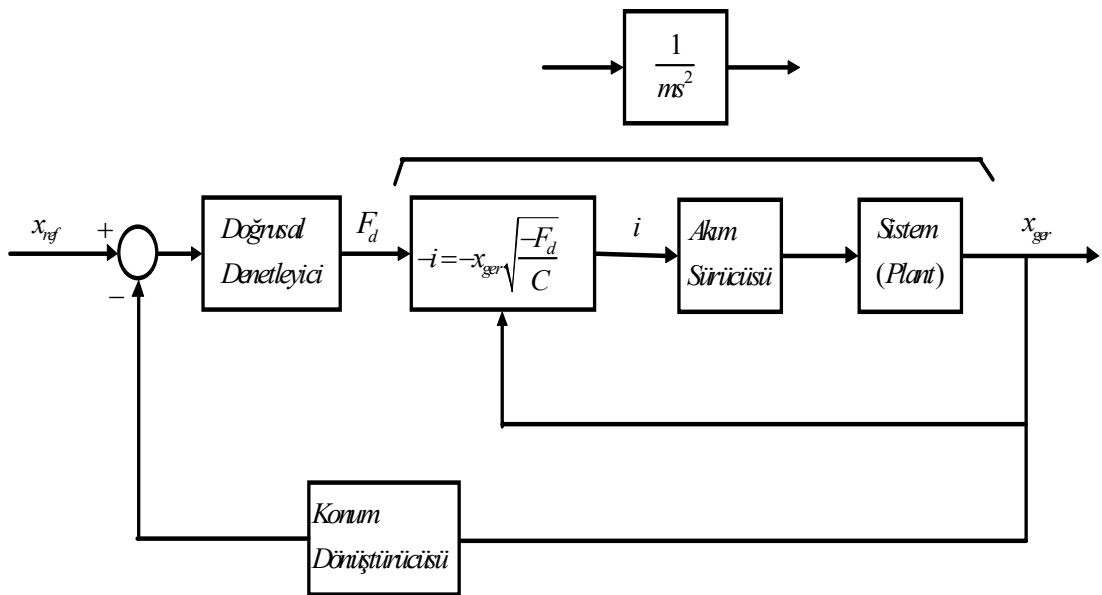
elde edilir.

Denklemden de görüleceği gibi, yükselteç akımı arzu edilen kuvvet değeri ve ölçülen konum değerine bağlı olarak değişmektedir ve bu değişim doğrusaldır. Doğrusal

bloğun görevi, giriş referans değeri ile konum dönüştürücüsünden alınan ölçülen konum değerleri arasındaki farka göre  $F_d$  değerini elde etmektir.  $F_d$  bobin tarafından üretilmesi istenen ve bilyeyi havada tutacak kuvvet değeridir. Doğrusal olmayan denetleyici bloğunun girişleri  $F_d$  ve ölçülen konum bilgisi  $x$ 'dir.  $F_d$  doğrusal denetleyiciden,  $x$  değeri ise sistemin çıkışından geri besleme yolu ile alınır. Doğrusal olmayan blok giriş değeri olarak  $F_d$ 'yi alır ve bilye üzerine uygulanacak gerekli gücü oluşturabilmek için gerekli akım değerini çıkış olarak verir. Bu durumda doğrusal olmayan blokla kontrol edilecek sistem bloğu birlikte doğrusal denetleyici bloğuna doğrusal hale gelmiştir. Son haliyle bu ikilinin transfer fonksiyonu ;

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad (4.12)$$

şeklinde elde edilir. (4.12) eşitliğinde kütle değeri 0,063 kg alınmıştır. Ortaya çıkan sonuç blok diyagramı şekil 4.5'te gösterilmiştir. Hava aralığı  $x$ 'in değeri koordinat eksenine göre negatif yönde arttığı için kapalı çevrimdeki blokta  $x_{ger}$  ifadesinin başında  $-$  işareti koyulmuştur. Hava aralığının bu tanımından dolayı bobinin pozitif bir akımla sürülebilmesi için kuvvet de  $-F_d$  olarak alınmıştır. Bilye havaya kalkarken bir başka deyişle bobine doğru çekilirken hava aralığı düşmektedir. Programdaki cebirsel işlem, donanımdaki akım sürücüsü ve son olarak süspansiyon (4.12)'de verilen eşitlik ile modellenmiştir.



Şekil 4.5 : Doğrusal olmayan sistemin kapalı çevrim blok diyagramı

(4.12)'de verilen doğrusallaştırılmış sistem orijinde iki kutba sahiptir. Gerçekte kutuplar şekil 4.2'de gösterildiği gibi orijinden az da olsa kayabilir ve bu kutupların, kararlılık durumunun oluşturulabilmesi için sol yarı s düzlemine çekilmesi gerekir. Bunu gerçekleştirmek üzere bir denetleyici tasarlanmalıdır.

### 4.3 Faz İlerlemeli Denetleyici Tasarımı

Kontrolör sisteminin tasarımı üç ana basamaktan oluşur;

- Sistemin neyi, nasıl yapacağını saptanması yani tasarım kriterlerinin belirlenmesi.
- Denetleme yada kompanzasyon yapısının sisteme nasıl bağlanacağını belirlenmesi.
- Denetleyici parametrelerinin tasarım hedeflerine göre belirlenmesi.

Tasarım kriterleri genellikle sistemin ne yapması gerektiğini belirtmek ve nasıl yaptığını değerlendirmek amacı ile kullanılır. Bu kriterler her bir uygulamaya özgü farklılıklar gösterirler ve genellikle görelî kararlılık, hata, geçici cevap ve frekans cevabı özellikleri ile ilgili kısımlardan oluşur.

Doğrusal kontrol sistemlerinin tasarımı zaman yada frekans tanım bölgesinde gerçekleştirilebilir. Sistemin frekans domeni davranışını belirlemek için girişine genliği sabit fakat frekansı değişen sinüzoidal bir giriş işareti uygulanır ve sistemin çıkışı elde edilir. Görelî kararlılık, kazanç payı (KP), faz payı (FP) ve rezonans tepesi ( $M_r$ ) gibi büyüklüklerle ölçülebilir. Otomatik kontrol sistemlerinin incelenmesi ve tasarımında doğrudan doğruya analitik bir yöntem kullanma olanağı yoktur. Bu nedenle, belli bazı matematik modellerin kullanılması ve bu modellerin çözümü ile tutulacak inceleme ve tasarım yolları zor ve karışık olabilir. İşte bu gibi hallerde frekans bölgesi davranışı ve Bode diyagramları kullanılır.

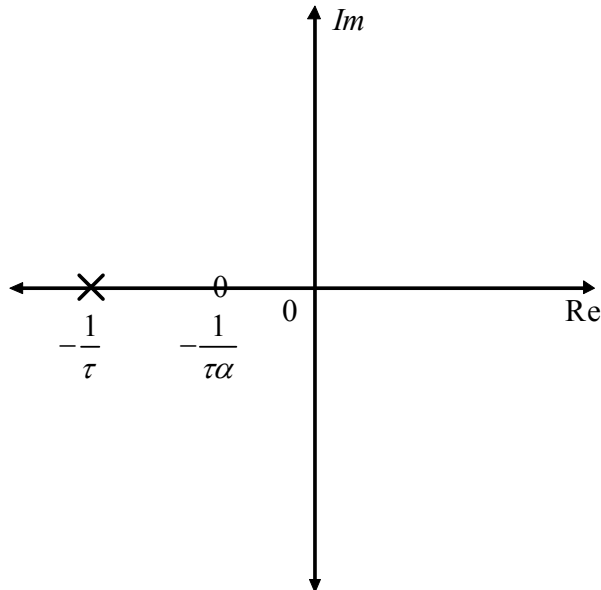
Bode diyagramı, çevrim transfer fonksiyonu genliğinin desibel (dB) cinsinden ve fazının derece cinsinden  $\omega$  açısal frekansına bağlı olarak çizimidir. Bu çizimlerin davranışına bakarak kapalı çevrimli sistemlerin kararlılığı hakkında bilgi edinilebilir.

Tasarımın amacı, kontrol edilen çıkış değişkeninin istenilen şekilde davranmasıdır. Sorun temelde, tasarım amaçlarının tümünün gerçekleşeceği şekilde kontrol işaretini belirli bir zaman aralığında belirlemektir. Amaç, sistem davranış özelliklerini karşılamaya ve değiştirmeye yönelik olduğundan genellikle sabit yapıli tasarıma kompanzasyon adı verilir [14]. Burada ilk etapta, denetleyicinin sisteme ileri yönde seri olarak yerleştirildiği en yaygın denetleyici yapısı olan ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmiş denetleyici uygulanmıştır. Bir sonraki bölümde, kullanıldığında daha iyi sonuçlar veren geri besleme yolu üzerine seri olarak yerleştirilmiş denetleyici yapısı detaylandırılacaktır.

Sistemde, otomatik kontrol sistemlerinde oldukça sık kullanılan bir yapı olan faz ilerlemeli denetleyici kullanılmıştır. Faz ilerlemeli denetleyiciler, sistemin kararlılığını veya cevabının hızını artırırlar. Burada, faz ilerlemeli denetleyici frekans cevabı kullanılarak tasarlanmıştır. Frekans cevabında kullanılan denetleyicinin yapısı (4.13)'de gösterildiği gibidir.

$$G_C(s) = K \frac{1 + \alpha \tau s}{1 + \tau s} \quad (4.13)$$

(4.13) ile ifade edilen faz ilerlemeli denetleyici yapısının kutup – sıfır yerleşimi şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Tasarlanan faz ilerlemeli denetleyicinin kutup – sıfır yerleşimi



Parametrelerin uygun seçilmesi koşuluyla, sıfırı koordinat merkezine daha yakın bir kutup – sıfır çifti yerleştirilmesi halinde, sistemde bir faz ilerlemeli denetleyici oluşturarak, kapalı çevrimli sistemin kararlılığı arttırılabilir. Faz ilerlemeli denetleyici tasarlamak, denetleyicinin transfer fonksiyonu olan  $G_c(s)$ 'in kutup ve sıfırlarını tasarım koşullarını sağlayacak şekilde yerleştirmek anlamına gelir. Transfer fonksiyonu (4.13) biçimindeki faz ilerlemeli denetleyicide  $G_c(0) = 1$  olduğundan yani DC kazancı 1'e eşit olduğundan sistemin kararlı hal hatası etkilenmez.

Denetleyicinin iki köşe frekansı  $\omega_1 = 1/\alpha\tau$  ve  $\omega_2 = 1/\tau$ 'dir. Faz ilerlemeli denetleyici yapısında, bu iki frekans aralığında sisteme pozitif faz eklenir. Fazın maksimum değeri  $\phi_m$ 'dir ve bunun oluştuğu maksimum frekans iki köşe frekansının geometrik ortalamasının alınmasıyla hesaplanabilir.

Buna göre;

$$\log_{10} w_m = \frac{1}{2} \left( \log_{10} \frac{1}{\alpha\tau} + \log_{10} \frac{1}{\tau} \right) \quad (4.14)$$

yazılabilir. Buradan;

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\alpha\tau}} \quad (4.15)$$

elde edilir. Bu frekans değerinde faz da en yüksek değerindedir.

Denetleyiciye ilişkin  $\phi_m$  maksimum fazı belirlemek için  $G_c(j\omega)$  fazı;

$$\angle G_c(j\omega) = \phi(j\omega) = \tan^{-1} \omega\alpha\tau - \tan^{-1} \omega\tau \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ilişkiden;

$$\tan \phi(j\omega) = \frac{\omega\alpha\tau - \omega\tau}{1 + (\omega\alpha\tau)(\omega\tau)} \quad (4.17)$$

elde edilir. (4.17) eşitliğindeki  $\omega$  yerine (4.15) eşitliğindeki en büyük frekans değeri yazılırsa en büyük açı değerinin sinüsü;

$$\sin \phi_m = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \quad (4.18)$$

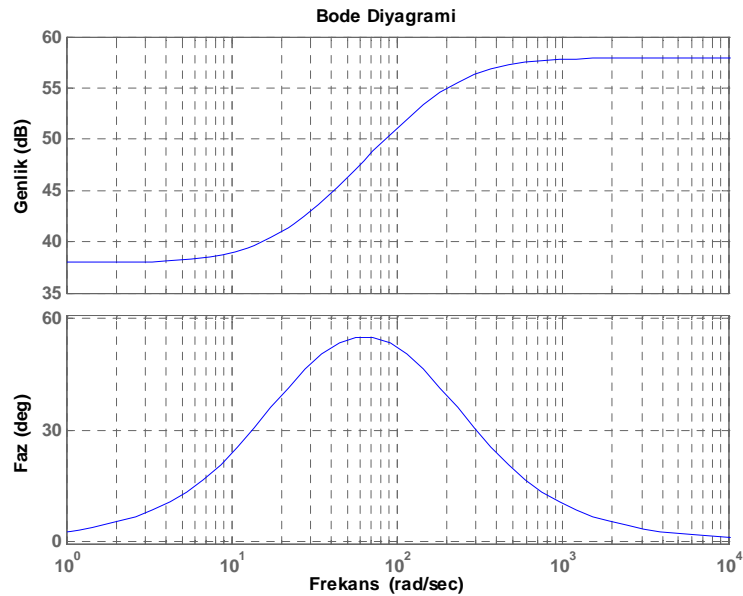
olarak bulunur. (4.18) ifadesinden fazın en büyük değeri;

$$\phi_m = \sin^{-1} \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \quad (4.19)$$

olarak elde edilir.

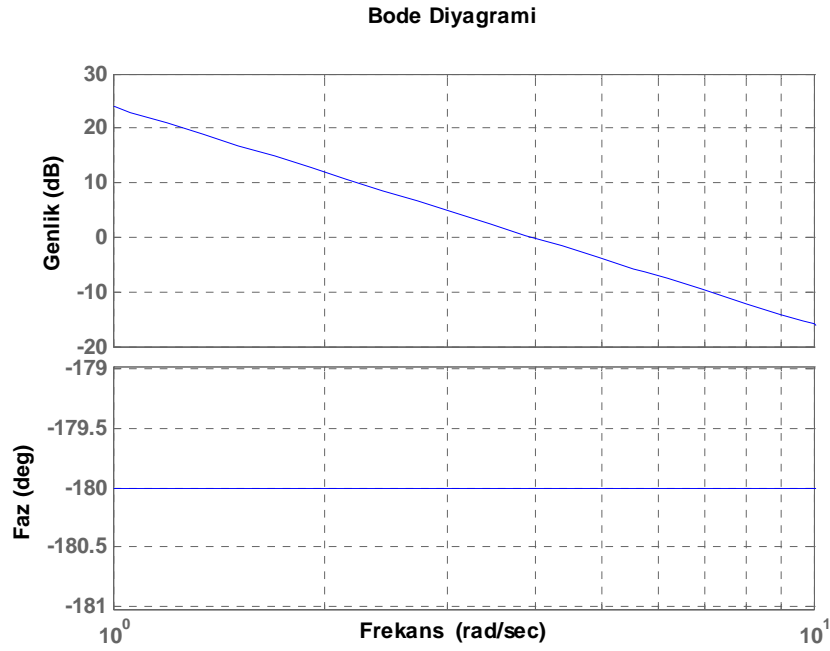
Eklenen pozitif faz, faz sınırını ve böylece sistemin kararlılığını artırır. Faz ilerlemeli denetleyicinin diğer bir etkisi genlik çiziminde ortaya çıkabilir. Faz ilerlemeli denetleyici yüksek frekanslarda sistemin kazancını artırır. Bu da, sistemin oturma zamanını ve yükselme zamanını azaltmaya yarayan geçiş frekansını artırır.

Tasarlanan faz ilerlemeli denetleyicinin Bode diyagramı şekil 4.7'de gösterilmiştir. Diyagramda frekans değeri 10'un katları şeklinde değiştiği için  $\alpha = 10$  alınmıştır. Ayrıca ilk aşamada kazanç 80, yükselme zamanı da 5ms kabul edilmiştir.



Şekil 4.7 : Tasarlanan faz ilerlemeli denetleyicinin,  $K = 80$ ,  $\alpha = 10$ ,  $\tau = 0.005s$  değerleri için çizdirilen Bode diyagramı

Denetleyici bu haliyle, sistemin kutuplarını sol yarı s düzlemine taşımakta ve kararlılığı sağlamakta yeterli olacaktır fakat istenen performansı elde etmek için parametrelerin daha uygun olarak seçilmesi gerekir. Geri beslemeli doğrusallaştırmanın teorik olarak hatasız yapıldığı kabul edildiğinde, kompanze edilmiş sistem (4.12) eşitliği ile ifade edilmiştir. Bu ifadeyle verilen sistemin Bode diyagramı şekil 4.8’de gösterilmiştir. Diyagramın çiziminde  $m = 0.063\text{kg}$  kabul edilmiştir.



Şekil 4.8 : Doğrusallaştırılmış sistemin Bode diyagramı

Genel olarak faz geçiş frekansında  $L(j\omega)$  genliği dB cinsinden negatif ise kazanç payı pozitifdir ve sistem kararlıdır. Yukarıdaki diyagramdan 10Hz frekansta kazanç dB cinsinden -15,9868dB yada 0.1587 olduğu görülür. Yani sistem bu haliyle kararlıdır.

Denetleyici ve doğrusallaştırılmış sistemin transfer fonksiyonlarını kullanarak elde edilen açık çevrimin transfer fonksiyonunu  $LT$  olarak adlandırılmıştır. (4.12) ve (4.13) eşitlikleri çarpıldığında elde edilen sonuç genel ifadesiyle aşağıdaki gibidir.

$$LT = K \frac{1 + \alpha \tau s}{ms^2(1 + \tau s)} \quad (4.20)$$

İstenen bant genişliğini elde edebilmek için 10Hz'de LT'nin 1 olması ve iyi bir kararlılık için en az 45°'lik faz farkı olması istenir (10Hz için  $\phi > -135$ ). Bu nedenle,  $f_c = 10\text{Hz}$  yada  $\omega_c = 62.8\text{rad/s}$ 'de denetleyicinin kazancının  $4 \times 10^{-3}$  ve fazının  $+ 45^\circ$  olması gerekir.

$\alpha$  ve  $\tau$  değerleri (4.15) eşitliğinde yerine konulduğunda maksimum fazda oluşan geçiş frekansı  $\omega_c$  değeri;

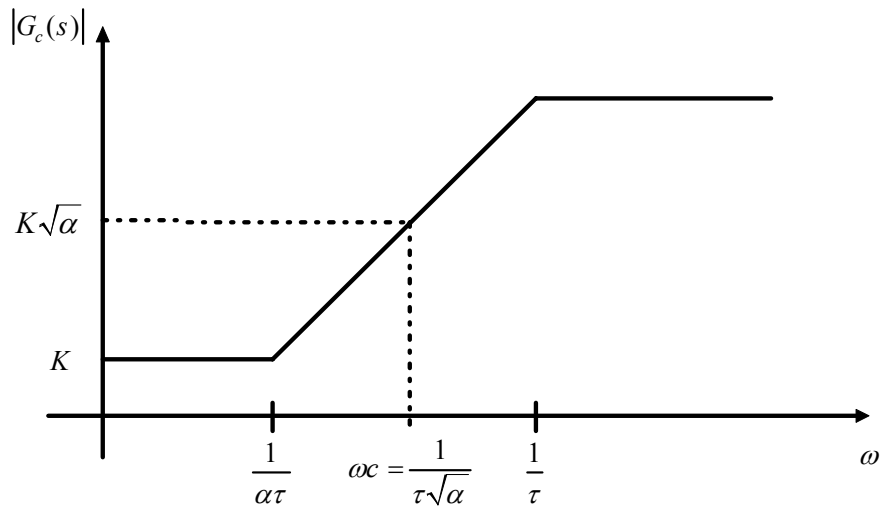
$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{10 \times 0.005}} = 62,8 \text{ rad / s} \quad (4.21)$$

olarak elde edilir.

Bulunması gereken son parametre K kazancıdır. Açık çevrim iletim transfer fonksiyonu (LT) geçiş frekansında 1'e eşit olmalıdır. Denetleyicinin transfer fonksiyonu  $\omega = \omega_c$  için (4.13)'de yerine konulduğunda;

$$G_c(s) = K \frac{\left(1 + \alpha \tau \frac{1}{\sqrt{\alpha \tau}}\right)}{\left(1 + \tau \frac{1}{\sqrt{\alpha \tau}}\right)} = K \sqrt{\alpha} \quad (4.22)$$

elde edilir. Bu genlik şekil 4.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Faz ilerlemeli denetleyicinin genlik - faz eğrisi

(4.20) ve (4.22) eşitlikleri düzenlenip 1'e eşitlendiğinde;

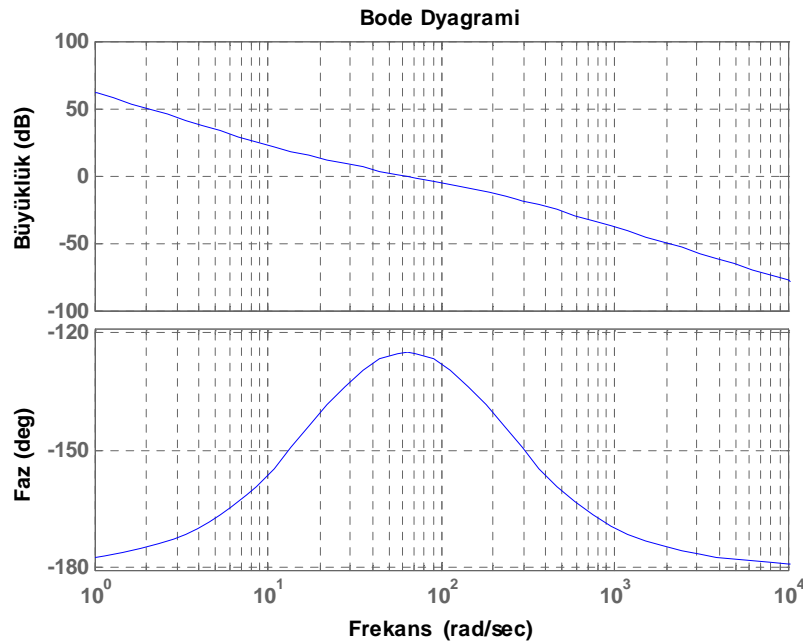
$$\frac{K\sqrt{\alpha}}{m\omega^2} \Rightarrow \frac{K\sqrt{10}}{0.063 \times 62,8^2} = 1 \quad (4.23)$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen bu denklemden;

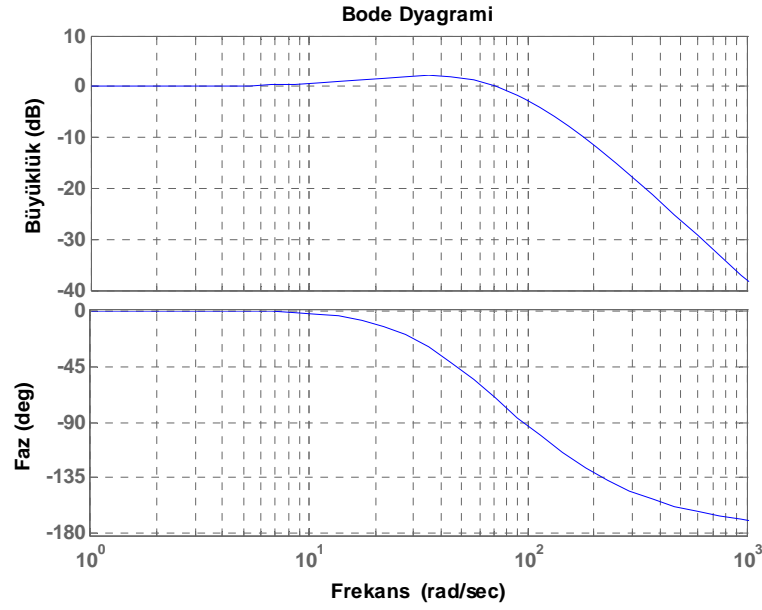
$$K = 79 \quad (4.24)$$

bulunur.

Bulunan kazanç değeri ile gerekli tüm parametreler belirlenmiştir. Tüm kriterler hesaba katılarak oluşturulan açık çevrim ve kapalı çevrimin Bode diyagramları şekil 4.10 ve şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.10'dan da görüleceği üzere geçiş frekansında faz farkının değeri  $\phi_m = 54,9^0$ 'dir. Bu değer  $\alpha = 10$  için (4.19) eşitliğinden de kolayca hesaplanabilir.

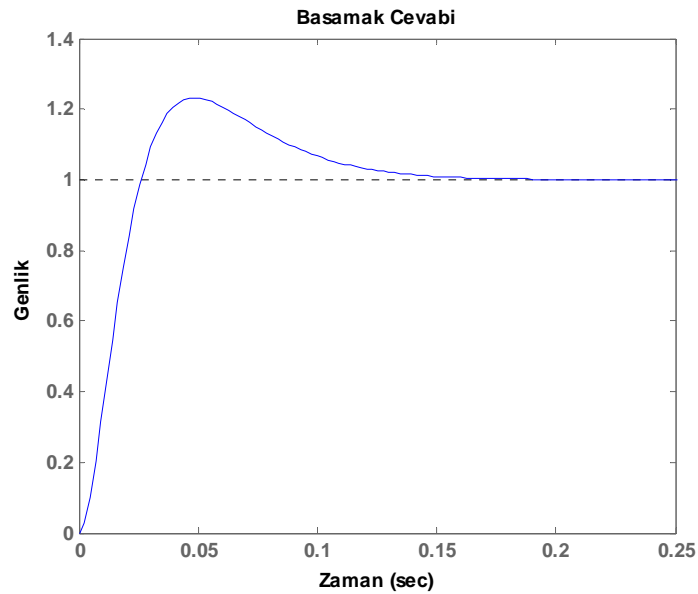


Şekil 4.10 : Açık çevrim transfer fonksiyonunun  $K = 79$  ,  $\alpha = 10$  ve  $\tau = 0.005s$  değerleri için çizdirilen Bode diyagramı



Şekil 4.11 :  $K = 79$  ,  $\alpha = 10$  ,  $\tau = 0.005s$  değerleri için faz ilerlemeli denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmesiyle elde edilen kapalı çevrim Bode diyagramı

Geçici hal, sistem yanıtının zaman ilerledikçe sifıra giden kısmı olarak tanımlanır ve geçici hal yanıtının genliği ve süresi makul değerlerin altında tutulmalıdır. Doğrusal kontrol sistemlerinde geçici hal yanıtının değerlendirilmesi genellikle  $u_s(t)$  birim basamak yanıtından yararlanılarak yapılır. Bu yoldan hareketle; kapalı çevrimin basamak cevabının grafiği şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 :  $K = 79$  ,  $\alpha = 10$  ,  $\tau = 0.005s$  değerleri için faz ilerlemeli denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmesiyle elde edilen kapalı çevrim birim basamak yanıtı

Sistemin basamak yanıtının son değerinin belirli bir yüzdesine kadar azalması ve bu değerin altında kalması için geçmesi gereken süre yerleşme zamanı olarak tanımlanır ve  $t_s$  olarak ifade edilir. Sistemde yükselme zamanı  $t_s = 5\text{ms}$  seçilmiştir. Faz ilerlemeli denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmesiyle elde edilen kapalı çevrim birim basamak yanıtına bakıldığında  $t_s = 5\text{ms}$  için sistemde aşım (overshoot) oluştuğu görülür. Aşım genellikle bir kontrol sisteminin kararlılığını değerlendirme ölçüsü olarak kullanılır ve sistemde kapalı çevrim sıfırının bulunması nedeniyle oluşur. Kararlılığın kabul edilebilir düzeyde olması için aşımın büyük değerlerde olmaması istenir. Bir sonraki bölümde, bu bölümde ileri besleme yolu üzerine yerleştirilen denetleyici geri besleme yolu üzerine yerleştirilerek kapalı çevrim sıfırı sol yarı düzlemde çok uzaklara götürülecek ve böylece olumsuz etkileri en az seviyeye indirilerek sistemin kararlılığı arttırılacaktır.

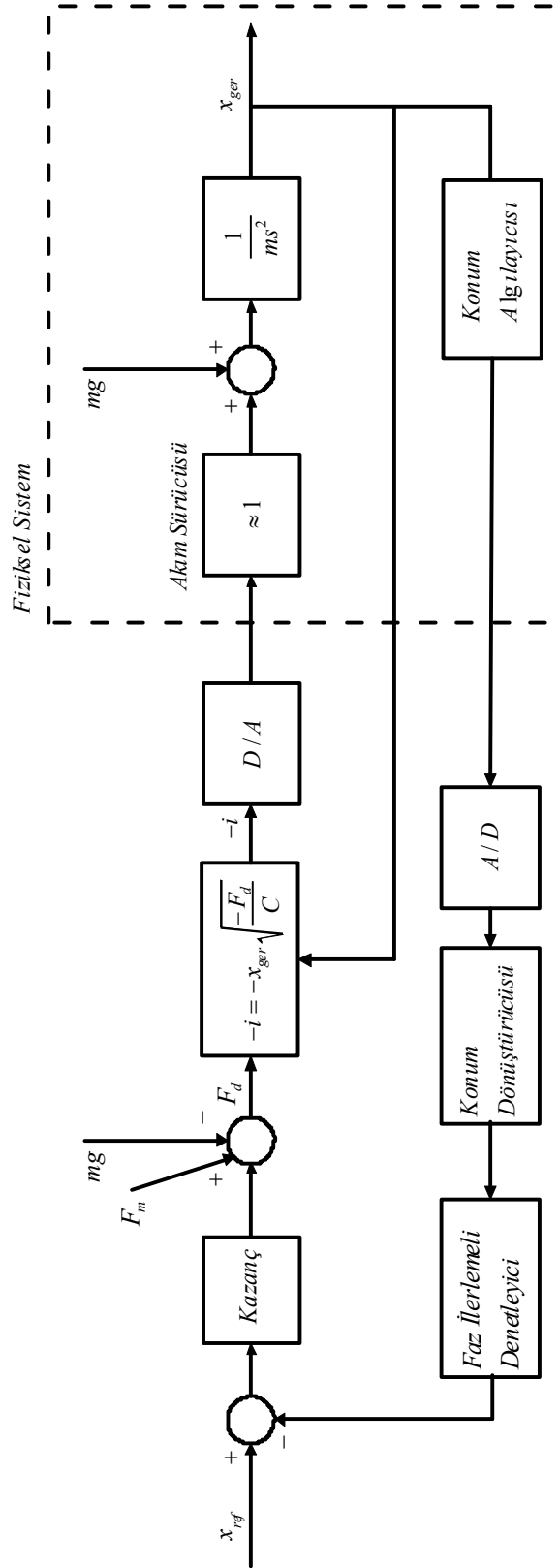
## BÖLÜM 5 DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1 Sistemin Kapalı Çevrimi

Sistemin kapalı çevrim blok diyagramının son hali şekil 5.1’de gösterilmiştir. İstenilen kuvvet olan  $F_d$ ’yi elde etmek için Newton’un 2. yasası uyarınca  $F_m$ ’den  $mg$  çıkarılmıştır. Üretilen kuvvetin işareti hava aralığının tanımı gereği eksidir çünkü kuvvet hava aralığını kapatacak yöndedir. Dolayısıyla akım da negatif olmalıdır. Akım bloğu,  $F_d$ ’yi giriş olarak alır ve çıkış olarak bobine uygulanacak olan akım değerini verir. Bu dijital akım sinyali bobine uygulanabilmesi için analog sinyale çevrilmelidir. Bunun için çevrimin devamında dSPACE’in bir parçası olan dijital – analog dönüştürücü mevcuttur. Daha sonra doğrusallaştırılmış sistemin bloğu ve konum algılayıcısı bloğu görülmektedir. Fiziksel sistemin blokları şekilde kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Fiziksel sistemden alınan analog sinyalin bilgisayar tarafından işlenebilmesi için dijital sinyale dönüştürülmesi gerekir. Bu yüzden, konum algılayıcısından sonra analog sinyali dijital sinyale çeviren bir dönüştürücü bloğu yerleştirilmiştir. Bu bloklardan sonra, geri besleme yolu üzerinde, direnç – geçişli yükselteçten aldığı gerilim değerini konum bilgisine çeviren bir konum dönüştürücüsü mevcuttur. Bu konum değeri daha sonra denetleyici bloğuna girilerek, denetleyicinin çıkışından elde edilen değer giriş referans konumu ile karşılaştırılmaktadır.

Bu aşamada, denetleyici kapalı çevrimin sıfırından kaynaklanacak olan aşımaları önlemek amacı ile önceki bölümde olduğu gibi ileri besleme yolu yerine, geri besleme yolu üzerine yerleştirilmiştir.





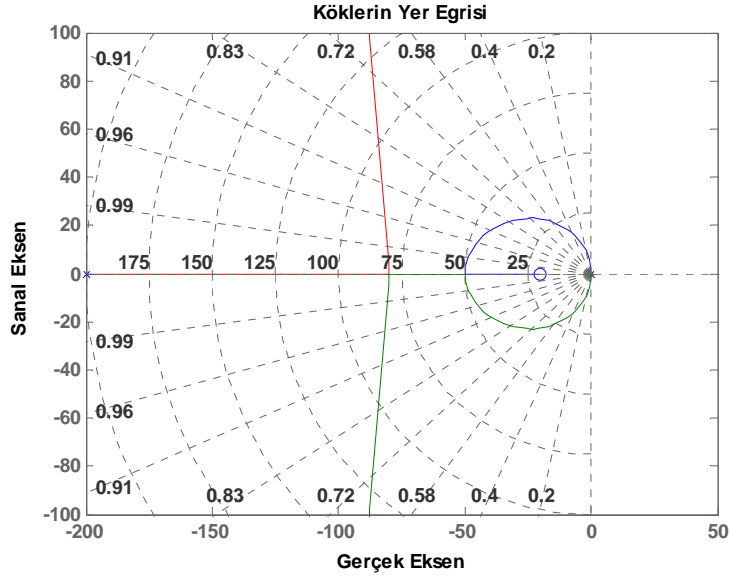
Şekil 5.1 : Manyetik süspansiyon sisteminin kapalı çevrim blok diyagramı

## 5.2 Geri Besleme Yoluna Yerleştirilen Denetleyici

Bölüm 4’de de belirtildiği üzere, kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutuplarını oluşturan karakteristik denklem kökleri, sistemin mutlak ve göreliliğini belirler. Ancak, sistemin geçici hal davranışının kapalı çevrimin sıfırlarına da bağlı olduğu unutulmamalıdır.

Belirli bir sistem parametresine göre sistemin karakteristik denklem köklerinin değişimi, ya da kök eğrileri, sistemin incelenmesinde büyük önem taşır. Köklerin yer eğrisi, kazanç sıfırdan sonsuza değişirken kapalı çevrim sistemine ait karakteristik denklemin köklerinin  $s$  düzleminde mümkün olan tüm yerlerinin çizimidir. Bu eğriler ile kazanç değerine göre köklerin yerleri incelenir.  $K$ ’nın  $-\infty$ ’dan  $+\infty$ ’a değişmesi halinde bir kökün kök yer eğrisi üzerinde izlediği eğriye kol denir ve kök yer eğrisinde bu kolların sayısı kök sayısına eşittir. Eğer sistemdeki kutup sayısı sıfırların sayısından fazla ise sistemin sonsuzda sıfıra sahip olduğu söylenir. Köklerin yer eğrisinde sonsuza giden kolların (asimptotlar) sayısı kutup sayısından sıfır sayısını çıkararak bulunabilir. Kök yer eğrisi  $s$  düzleminin gerçekteksene göre simetriktir ve  $G(s)H(s)$ ’in kutuplarında  $K = 0$ ,  $G(s)H(s)$ ’in sıfırlarında ise  $K = \pm\infty$  arasında değişen değerler alır. Kök yer eğrisinde, eğriye ait iki kolun gerçekteksende karşılaştığı ve daha sonra zıt yönlerde ekseni terk ettiği noktaya kopma yada semer noktası adı verilir.

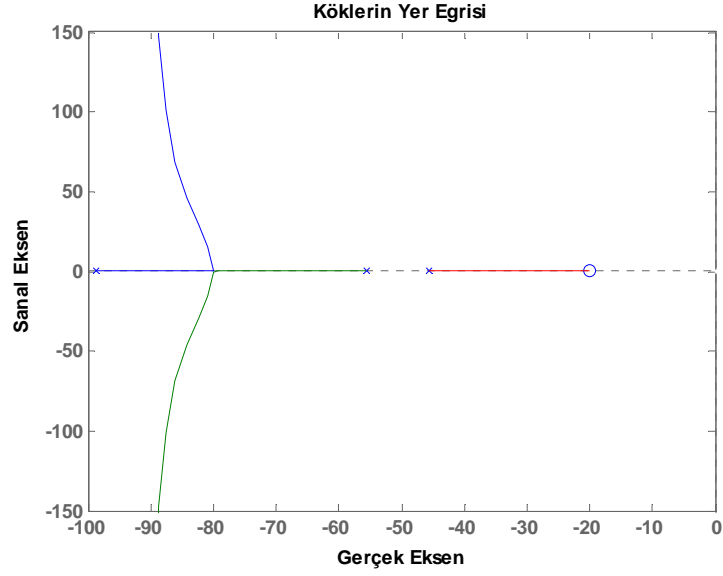
Kontrol sistemlerinin tasarlanmasında, sistem istenen bir karakteristik denklemi sağlamalı ve aynı zamanda da oluşacak parametre değişimlerine karşı duyarsız olması gerekir. Bir sistemin davranışını belirli bir kazanç değerine için uygun görülebilir, ancak kazançtaki değişimlere karşı duyarlı olması durumunda, küçük bir kazanç değişiminde, sistem davranışını kabul edilebilir sınırların üzerinde davranış sergileyebilir yada kararsız hale geçiş yapabilir. Buna göre kontrol sistemlerinin kök eğrileri yöntemi ile kazanç parametresine bağlı olarak incelenmesi sırasında, köklerin yerinin belirlenmesinin yanında, sistemin bu müdahalelerden etkileniş biçimi de önem taşır.



Şekil 5.2 : Süspansiyon sisteminin kök – yer eğrisi (Root Locus)

Şekil 4.12’de de görüldüğü üzere denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi halinde sistemin birim basamak cevabında, kapalı çevrimin sıfırından kaynaklanan aşımalar oluşmaktadır. Şekil 5.2’de süspansiyon sisteminin köklerinin yer eğrisi (Root-Locus) gösterilmiştir.

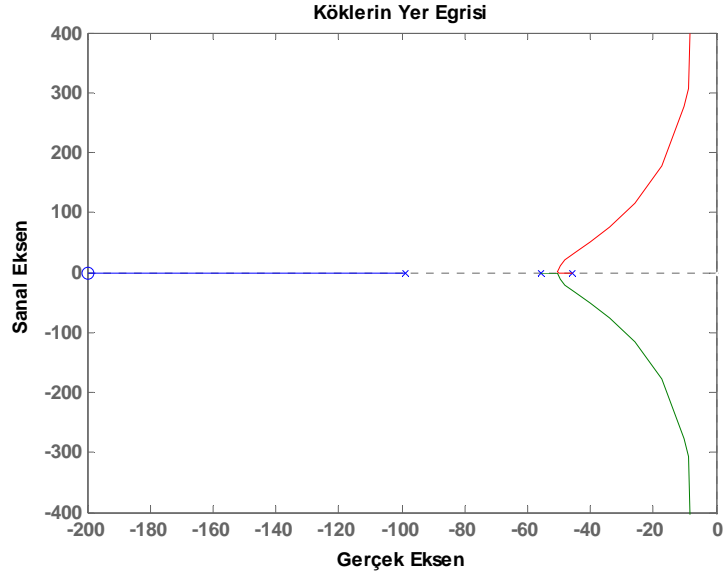
Eğriye bakıldığında, kazanç değeri artarken orijindeki iki kutup gerçel eksenini önce terk eder daha sonra sıfır etrafında daire çizer ve yeniden gerçel eksen üzerinde birleşir son olarak da tekrar ayrılarak sonsuzda bulunan sıfırlara doğru hareket ederler. Sistemdeki kutup sayısı sıfır sayısından iki fazla olduğundan, iki adet asimptot mevcuttur. Kutuplardan ikisi sonsuza giderken biri de mevcut sıfıra doğru hareket eder. Şekil 5.3’de  $K = 79$  ve 10Hz bant genişliği değerleri için denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi ile elde edilen kapalı çevrimin kutup ve sıfırların yerleri çizdirilmiştir.



Şekil 5.3 : Denetleyicinin ileri besleme yolu üzerinde olması halindeki kutup – sıfır eğrisi

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi, sistemin karakteristik denkleminin kökleri karmaşık sayılar olmadığından sistemin kutupları gerçek eksen üzerinde bulunmaktadır. Kutuplardan biri sistemin mevcut sıfırına doğru giderken, diğer ikisi gerçekte kesişir ve eksenden ayrılarak eksi ve artı sonsuza doğru hareket ederler. Bu haliyle yani denetleyicinin sistemde ileri besleme yolu üzerine yerleştirildiği durumda, şekil 4.12’de de gösterildiği üzere sistemin sıfırından kaynaklanan bir aşım oluşmaktadır.

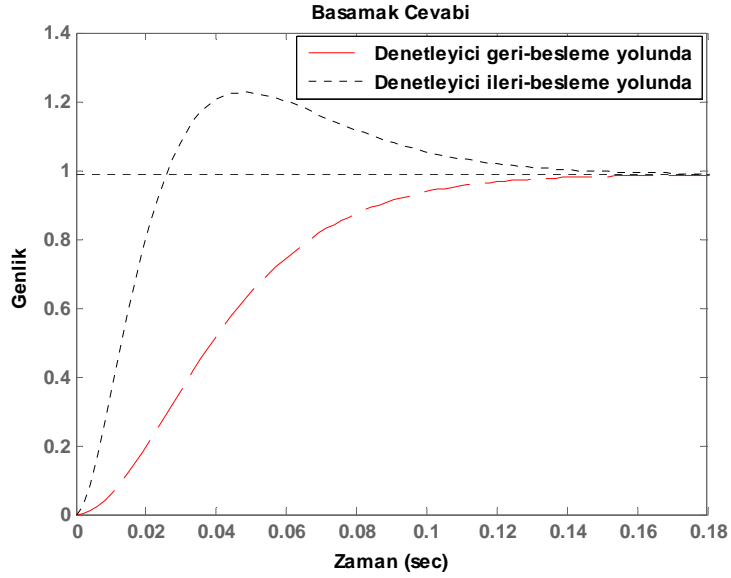
Kapalı çevrim sıfırından kaynaklanan aşımı önlemenin yollarından biri denetleyiciyi ileri besleme yolu yerine geri besleme yolu üzerine yerleştirmektir.  $K = 79$  ve  $10\text{Hz}$  bant genişliği değerleri için denetleyicinin geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi ile elde edilen kapalı çevrim kutup ve sıfırlarının yerleri ise şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Denetleyicinin geri besleme yolu üzerinde olması halindeki kutup – sıfır eğrisi

Denetleyicinin geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi çevrim dönüşümünü değiştirmez fakat geri besleme yolundaki kutuplar kapalı çevrimin sıfırları haline gelirler. Şekil 5.3’den de görüleceği gibi, eski durumda sistemin sıfırının frekansı  $-20\text{rad/s}$ ’dir. Şekil 5.4’de ise denetleyicinin geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi ile sistemin yeni sıfırının frekansının  $-200\text{rad/s}$ ’ye gelmiş olduğu görülür. Bu durumda sistemin sıfırı, kutuplar tarafından bastırılmış ve etkisiz hale getirilmiştir.

Denetleyicinin ileri besleme yolu yerine geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi ile aşımaya sebep olan sıfır orijinden çok uzak bir noktaya taşınmış ve bozucu etkisi önceki haline göre çok aza indirilmiştir. Yeni ve eski halleriyle sistemin birim basamak fonksiyonuna verdiği cevaplar şekil 5.5’de gösterilmiştir. Denetleyicinin ileri besleme yolu üzerine yerleştirildiğinde elde edilen değerler ‘...’ ile, geri-besleme yolu üzerine yerleştirildiğinde elde edilen değerler ‘...’ ile temsil edilmiştir.



Şekil 5.5 : Denetleyicinin ileri ve geri besleme yolu üzerine yerleştirildiği durumlarda elde edilen kapalı çevrim birim basamak cevapları

Şekilde de görüleceği gibi, denetleyicinin ileri besleme yolu üzerinde olduğu durumda yükselme zamanı daha kısa yani sistem daha hızlıdır fakat sistemde bir aşım meydana gelir. Bu da kontrol sistemlerinde istenmeyen bir davranıştır. Denetleyicinin geri besleme yolu üzerine yerleştirildiği durumda ise sistemin yükselme zamanı daha uzun yani önceki haline göre sistem daha yavaştır fakat aşım oluşmadığı görülmektedir. Bu haliyle sistem davranışı, önceki durumuna göre daha arzu edilen bir konumdadır. Her iki yapı için sistemin oturma zamanının ise yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Şekil 5.5 incelendiğinde, sistem davranışı açısından, denetleyicinin ileri besleme yolu yerine geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesi daha iyi bir sonuç vereceği açıktır.

### 5.3 Manyetik Süspansiyon Sisteminin Fiziksel Yapısı

Oluşturulan manyetik süspansiyon sistemi genel haliyle üç ana fiziksel yapıdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Bilgisayar ve dSPACE kartı
- Güç kaynağı ve devreler
- Demir aksam

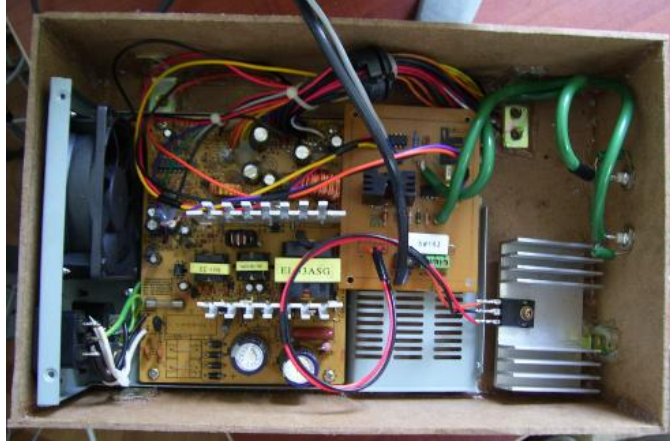
olarak sıralanabilirler.

Manyetik süspansiyon sistemi tüm elemanları ile şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Manyetik süspansiyon sisteminin tüm elemanlarının fotoğrafı

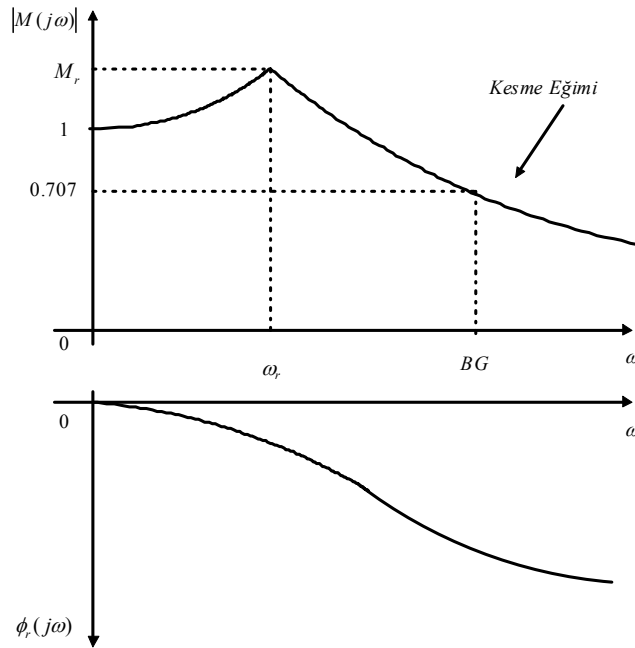
Şekil 5.7'de ise güç kaynağı ve oluşturulan devreler bir kutu içinde toplu halde gösterilmiştir. Kutunun içinde; gerilim kaynakları, doğrusal yükselteç ve konum algılayıcı devresi bulunmaktadır. 30V 3A'lık gerilim kaynağı, yüksek akım seviyelerine ulaşabilmek için anahtarlamalı tip olarak seçilmiştir. Anahtarlamalı gerilim kaynakları, eşdeğeri olan diğer gerilim kaynaklarına göre daha düşük güç kaybı değerlerine sahip olduklarından, kullanılması doğrusal kaynaklara oranla daha uygun görülmüştür. Işık kaynağı devresinde kullanılan  $\pm 12V$ 'lik gerilim için doğrusal gerilim kaynağı kullanılmıştır. Çünkü, çekilen akımın değeri mA mertebesindedir bu nedenle oluşabilecek güç kaybı da ihmal edilebilecek seviyededir. Kutunun ön yüzünde, dSPACE kartıyla yapılan BNC bağlantılar görülmektedir.



Şekil 5.7 : Gerilim kaynağı ve oluşturulan devreler

#### 5.4 Band Genişliği Değerlendirmesi

Rezonans, bir sistemin doğal frekanslarından birinde ya da doğal frekanslarının yakınında beslenmesi sonucu, küçük genlikli, dönemli bir girişin yüksek genlikli salınmalara yol açması olarak tanımlanabilir [24]. Burada olduğu gibi, frekans tanım bölgesi yöntemleri kullanılarak tasarlanan kontrol sistemlerinde sistemlerin davranışlarını belirlemek için rezonans tepesi ( $M_r$ ), rezonans frekansı ( $\omega_r$ ) ve band genişliği (BG) olmak üzere bir dizi kriter tanımlamak gerekir [14]. Bu kriterler şekil 6.8’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Frekans tanım bölgesi kriterleri



Geri beslemeli bir kontrol sisteminde  $M_r$  genliğin maksimum değerini ifade eder. Sistemin kararlılığı hakkında bilgi verir.  $M_r$  büyük olduğu sistemlerde birim basamak yanıtında aşırı aşımalar oluşabilir.  $M_r$ 'nin büyük olması istenmez.  $\omega_r$  ise  $M_r$ 'nin olduğu frekanstır. Bu bölümde band genişliği kriteri üzerinde durulacaktır.

Band genişliği, genliğin sıfır frekansının yüzde 70.7'ine eşit olduğu yada 3dB düştüğü frekanstır. Büyük band genişliği, yüksek frekanslı işaretlerin sistemden iletilmesini olanaklı kıldığından, kısa yükselme zamanına karşı düşer. Band genişliğinin küçük olması halinde sistemden sadece düşük frekanslar aktarılabilir ve sistemin zaman yanıtı yavaş olur. Band genişliği ayrıca, sistemin gürültü süzme özelliğinin ve parametre değişimlerine karşı duyarlılığın da bir ölçüsüdür. Dayanıklı bir sistem, parametre değişimlerine karşı aşırı duyarlı olmayan sistemdir. Manyetik süspansiyon sistemi band genişliğinin 10Hz olması durumunda başarılı bir şekilde çalışmaktadır.

Havada asılı halde duran bilyenin fotoğrafı şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Manyetik süspansiyon sisteminin çalışırken çekilmiş resmi

Yüksek band genişliğine sahip olmak ne kadar sınırlamalara neden olsa da sağladığı faydalar da mevcuttur. Tablo 5.1'de sistemin kesim frekansının 10Hz, 30Hz ve 100Hz değerleri için gerekli parametreler gösterilmiştir.

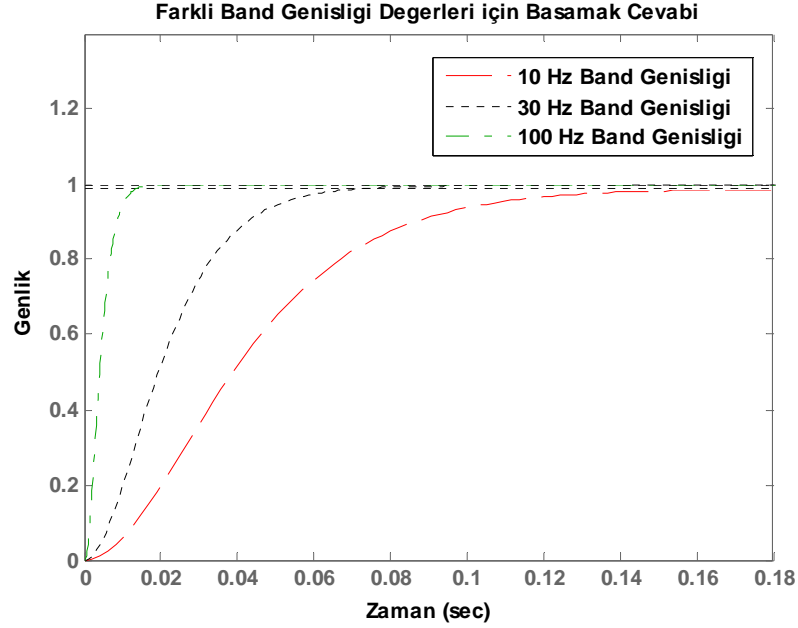
Tablo 5.1 : Farklı band genişliği değerleri için tasarlanan denetleyici parametreleri

$f_c$	$\omega_c$	$K$	$\tau$
10Hz	63rad/s	79	5ms
30Hz	126rad/s	316	2.5ms
100Hz	628rad/s	7857	0.5ms

Gerçekte, sistemler alçak geçirendir ve parazitler nedeniyle frekans artarken kazanç düşer. Dahası, yüksek mertebeli sistem dinamikleri için içine girer ve modelleme gittikçe zorlaşır. Çalışmada bu dinamikler modellenmemiştir fakat yine de mevcuttur ve sistemin band genişliğini sınırlarlar.

Band genişliğini sınırlayan etkenlerden bir diğeri de sistemde oluşan gürültüdür. Denetleyici, konum algılayıcısından gelen tüm yüksek frekans gürültülerini referans değeri ile karşılaştırmadan yükseltmektedir. Hata sinyali büyük olasılıkla gürültü tarafından bastırılacak ve sonrasında sinyal kazanç ile kuvvetlendirilecektir. Kazancın yüksek olduğu durumlarda, hatanın da kuvvetlendirilmesi bir sorun oluşturabilir. Bu durumun çözümlerinden biri, gürültüyü bastırmak için yüksek frekanslı kutuplar eklemek olabilir. İleriki bir uygulamada bu çözüm güzel bir yol olabilir.

Şekil 5.10'da, tablo 5.1'de bahsedilen üç band genişliği değeri için diğer parametreler de göz önüne alınarak, denetleyicinin geri besleme yolu üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan kapalı çevrim sistemin birim basamak cevapları gösterilmiştir. Şekilde, band genişliğinin 10Hz olduğu durumdaki sistemin basamak cevabı “\_ \_” ile, 30Hz olduğu durumdaki sistemin basamak cevabı “...“ ile, 100Hz olduğu durumdaki sistemin basamak cevabı ise “- . -” ile gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : 10Hz, 30Hz ve 100Hz band genişliği değerleri için teorik basamak cevapları

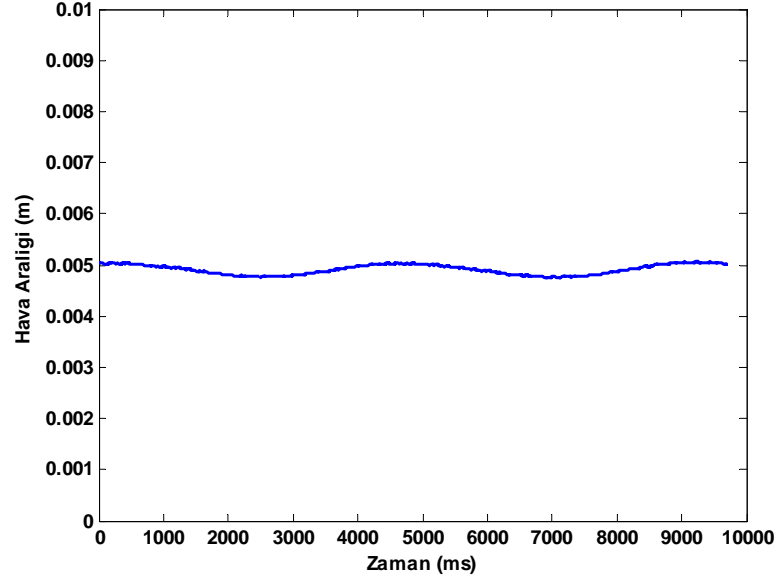
Yukarıdaki şekilde, değişik ban genişlikleri için çizdirilen fonksiyonların yükselme zamanlarına dikkat edildiğinde, band genişliği arttıkça yükselme zamanlarının kısaldığı görülmektedir. Yükselme zamanının düşük olması sistemin uygulanan bir işarete daha hızlı cevap vermesi yani daha hızlı olması anlamına gelir. Bu durum birçok sistem için arzu edilen bir olaydır fakat bu çalışmadaki manyetik süspansiyon sisteminin cevabının çok hızlı olması gerekli değildir. Sistem hızlandıkça kararlı durumu korumak zorlaşır. Daha hızlı olabilmek adına kararlı hali riske atmak bu sistem için mantıklı bir davranış olmaz. Çünkü, sistemin kararlı olması hızlı olmasından daha önemlidir.

### 5.5 Değişik Hava Aralıklarında Sistemin Davranışının İncelenmesi

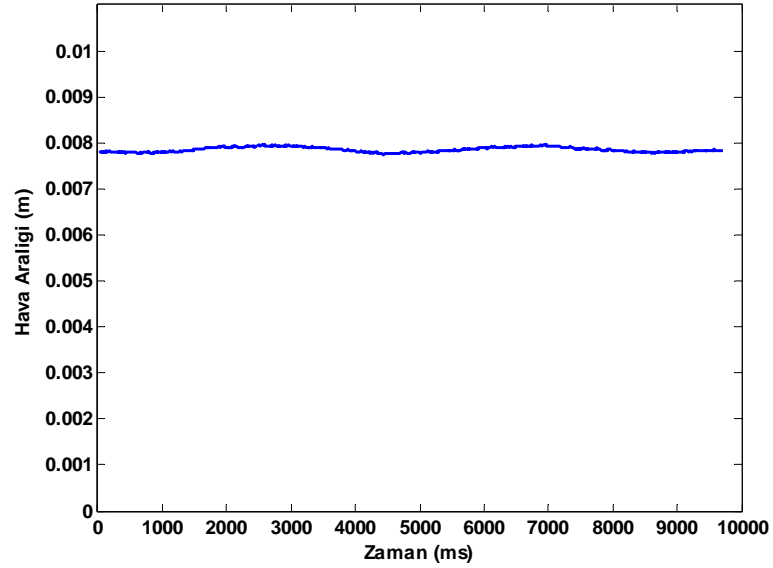
Geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğinin kullanılmasındaki temel neden daha geniş hava boşluğu değerlerinde çalışabilmektir. Kontrol sistemlerinde, daha geniş çalışma noktası aralıklarında çalışabilmek arzu edilen bir durumdur.

Bobin çekirdeği ile bilye arasındaki hava aralığının 5mm, 8mm, 10mm ve 15mm değerlerine ayarlandığı durumlarda sistemin konum algılayıcısından okunan

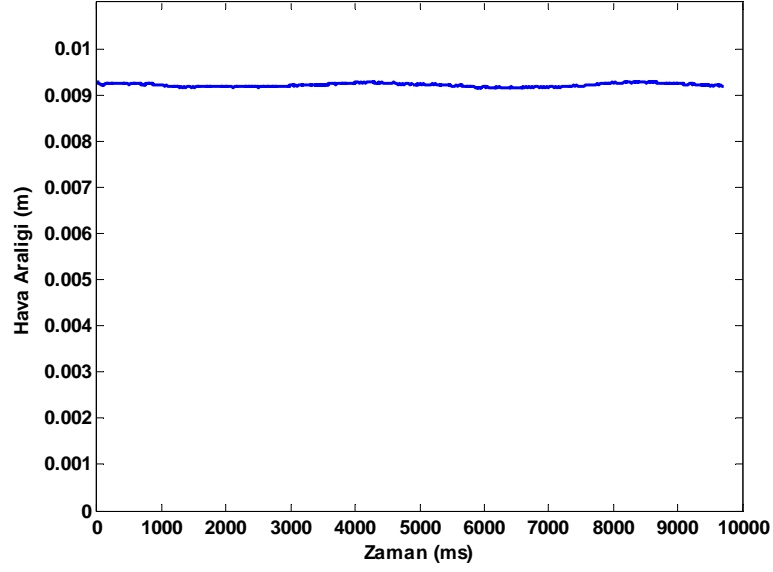
değerlerinin zamanla değişimleri sırasıyla şekil 5.11, şekil 5.12, şekil 5.13 ve şekil 5.14'de gösterilmiştir.



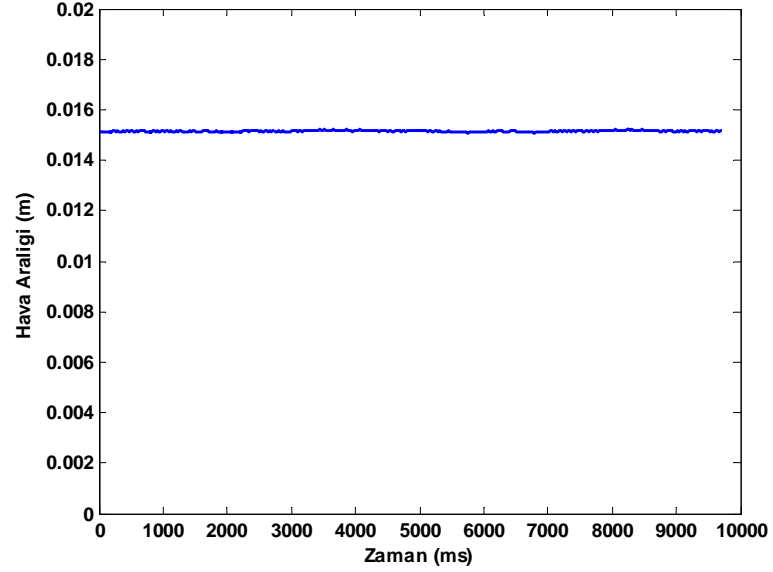
Şekil 5.11 : Hava aralığının 5mm değerine ayarlandığı durumda konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.12 : Hava aralığının 8mm değerine ayarlandığı durumda konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.13 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi



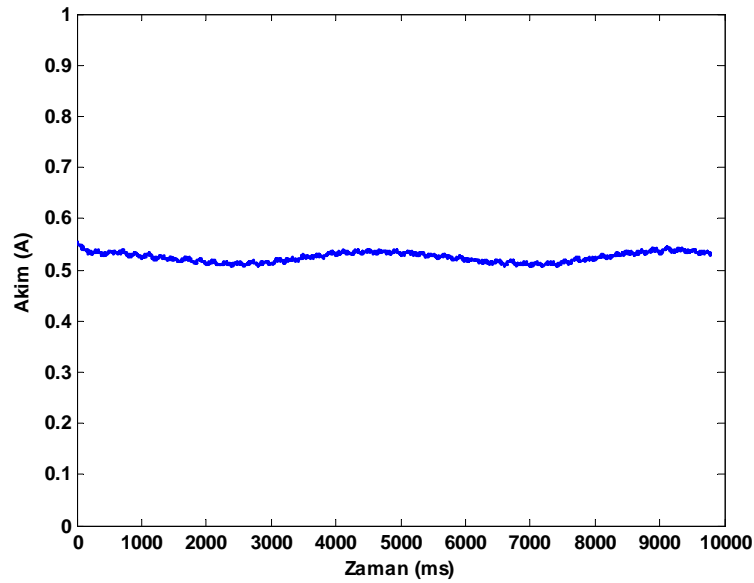
Şekil 5.14 : Hava aralığının 15mm değerine ayarlandığı durumda konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi

5mm, 8mm, 10mm ve 15mm hava aralığı değerleri, bilgisayar yardımıyla girilen referans değerlerdir ve bobin çekirdeği ile bilye arasındaki mesafeyi temsil eder. Şekillerde hava aralığı değerlerinin birimi metredir. Zaman birimi ise ms cinsinden ifade edilmiştir. Bobinin, bilyeyi girilen bu mesafelerde havada tutması gerekir. Alınan veriler, sistemin konum algılayıcısından elde edilen gerçek verilerdir ve bilyenin o andaki gerçek konumunu temsil eder. Bu veriler, dSPACE kartının

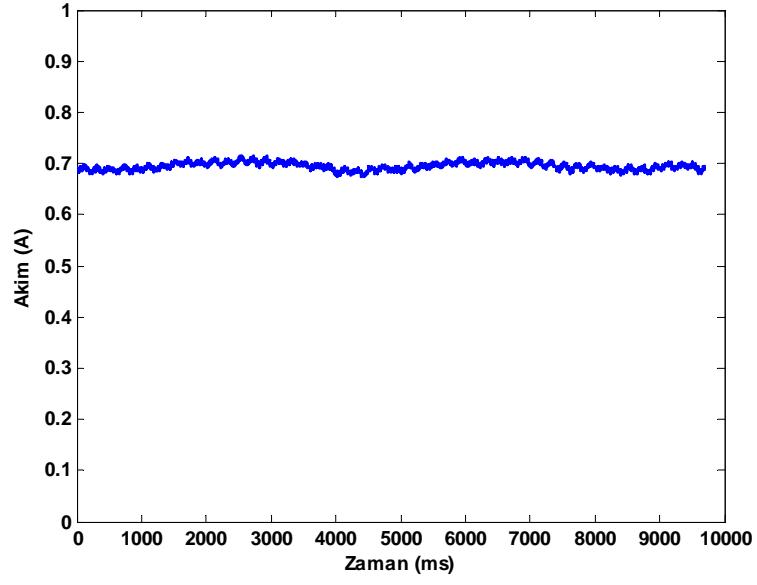
programı olan ControlDesk programı yardımıyla toplanmış ve Matlab'a aktarılarak yukarıdaki çizimler elde edilmiştir.

Şekillerden görüldüğü üzere; bobin, bilyeyi geniş bir çalışma noktası aralığında yüksek doğrulukta havada tutmaktadır. Konum algılayıcısından alınan değerlerde, ışık kaynağındaki değişimlerden dolayı algılanan ışığın seviyesindeki değişim, ortamdaki ışık ve sistem gürültüsü gibi çeşitli etkenlerden dolayı sapmalar meydana gelmektedir. Bu sapmalar dolayısıyla alınan değerlerde dalgalanmalar oluşur. Sapmalar sistemde var olmakla birlikte sistem kararlılığı açısından kabul edilebilir sınırlar içerisindeyler.

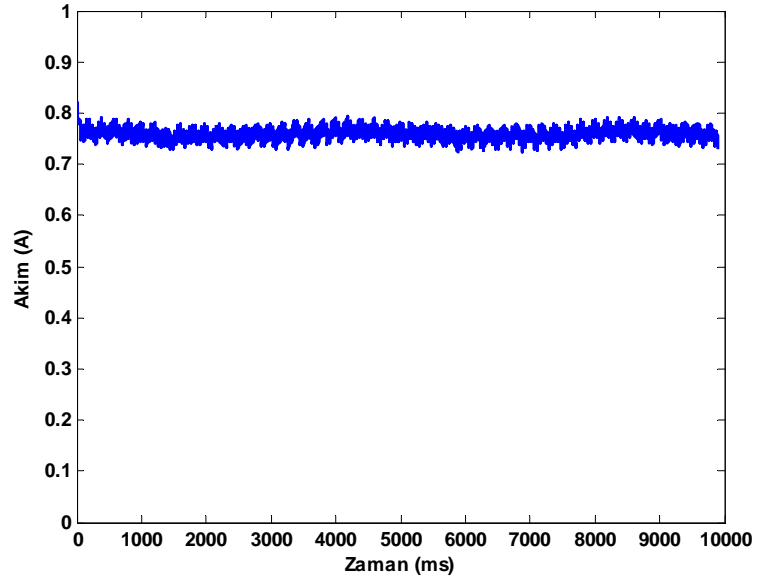
Yukarıdakilerle aynı hava aralıkları değerleri için bobinin çektiği akımların zamanla değişiminin grafikleri, konum grafiklerinin elde edildiği yolla elde edilmiş ve şekil 5.15, şekil 5.16, şekil 5.17 ve şekil 5.18'de gösterilmiştir.



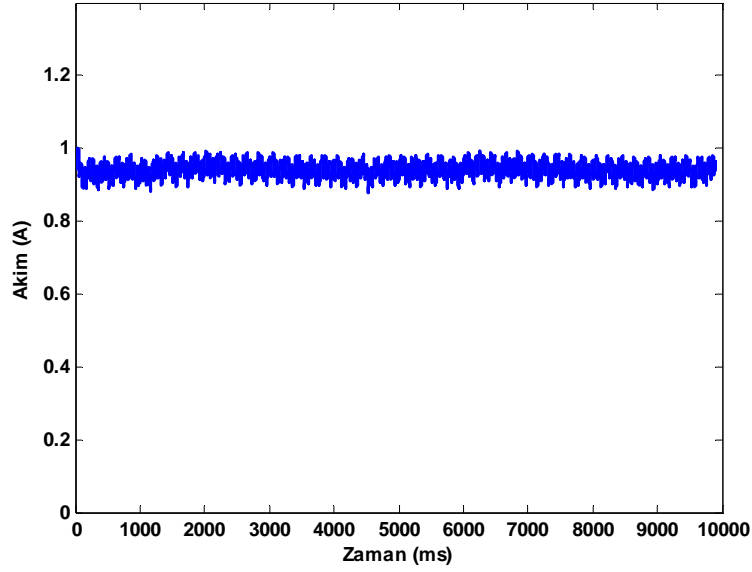
Şekil 5.15 : Hava aralığının 5mm değerine ayarlandığı durumda bobinin çektiği akım değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.16 : Hava aralığının 8mm değerine ayarlandığı durumda bobinin çektiği akım değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.17 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda bobinin çektiği akım değerinin zamanla değişimi



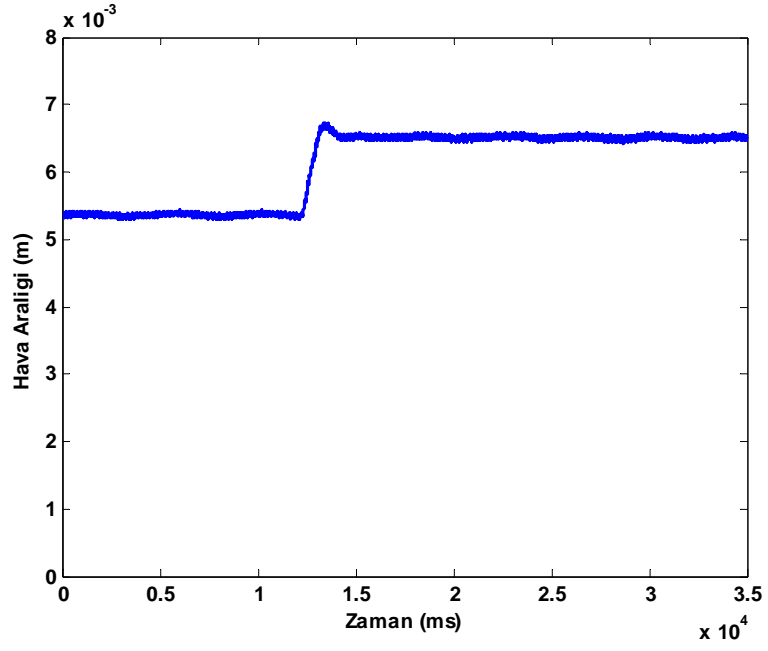
Şekil 5.18 : Hava aralığının 15mm değerine ayarlandığı durumda bobinin çektiği akım değerinin zamanla değişimi

Hava aralığı değeri arttırıldıkça bobinin bilyeyi havada tutabilmesi için üretmesi gereken kuvvetin de artması gerekir. Dolayısı ile bobin tarafından çekilen akım değeri de üretilen kuvvetteki artışa paralel olarak artmalıdır. Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi; gittikçe arttırılan hava aralıkları değerleri için bobinin çektiği akım da artmıştır. Fakat her hava aralığında çekilen akım aynı şekilde dalgalanmamaktadır. Hava aralığının yüksek değerlerinde kontrol düşük değerlerine nazaran daha zor olduğu için akımdaki dalgalanmaların da buna bağlı olarak arttığı görülmüştür.

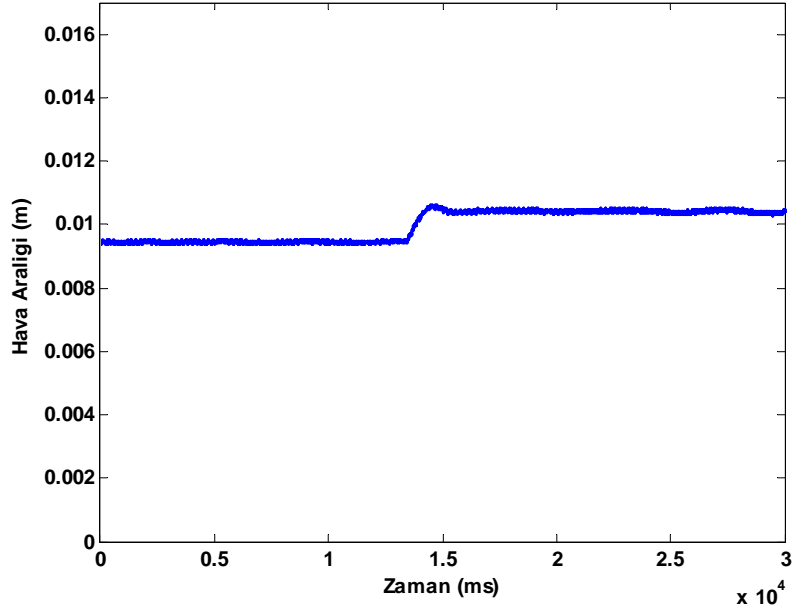
## 5.6 Birim Basamak Girişi Yanıtları

Şekil 5.19, şekil 5.20, şekil 5.21 ve şekil 5.22’de sırasıyla 5mm, 10mm, 11mm ve 13mm hava aralığı değerlerinde sisteme 1mm’lik basamak girişi uygulandığında sistemden bu girişlere karşılık alınan konum cevapları gösterilmiştir. Bu denemede de, önceki denemelerde yapıldığı şekilde veriler ControlDesk programı yardımıyla toplanmış ve Matlab’a aktarılarak grafikler elde edilmiştir.

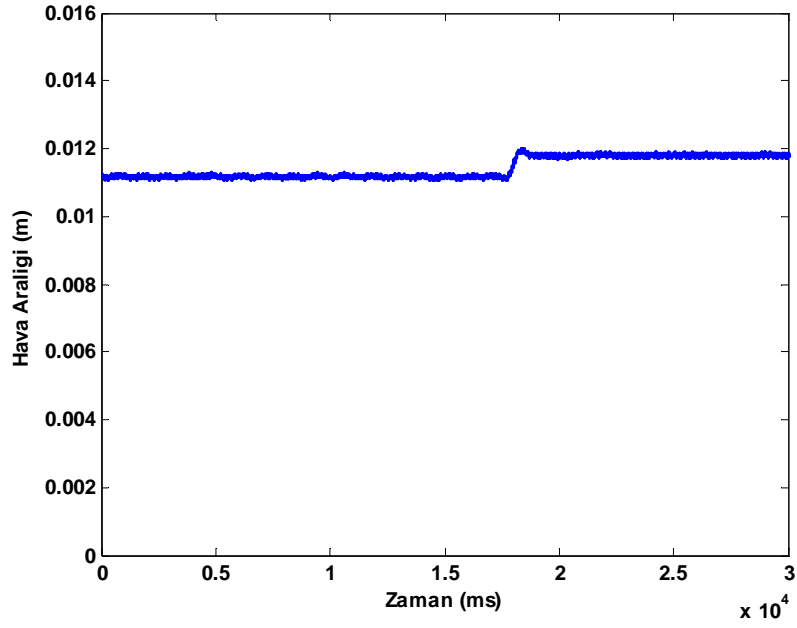




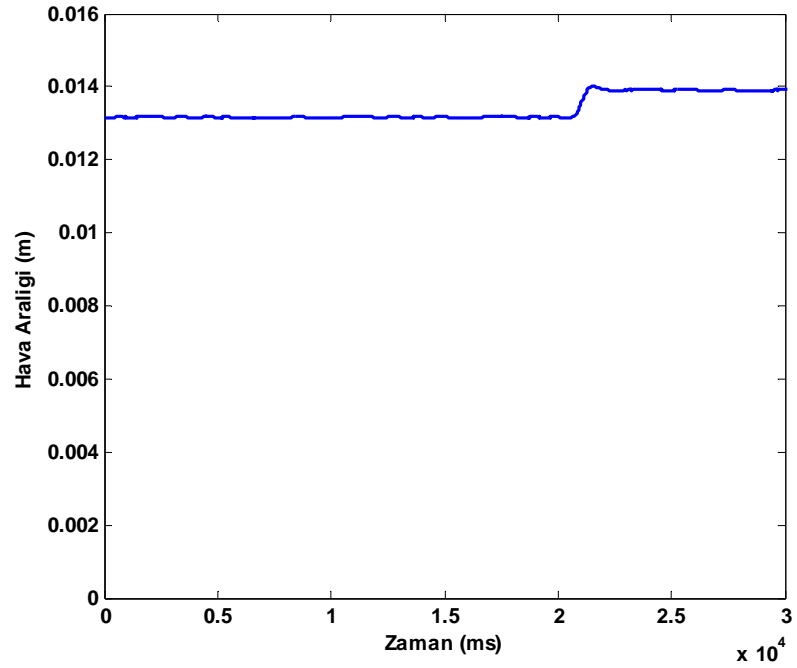
Şekil 5.19 : Hava aralığının 5mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için elde edilen konumun zamanla değişimi



Şekil 5.20 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için elde edilen konumun zamanla değişimi



Şekil 5.21 : Hava aralığının 11mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için elde edilen konumun zamanla değişimi

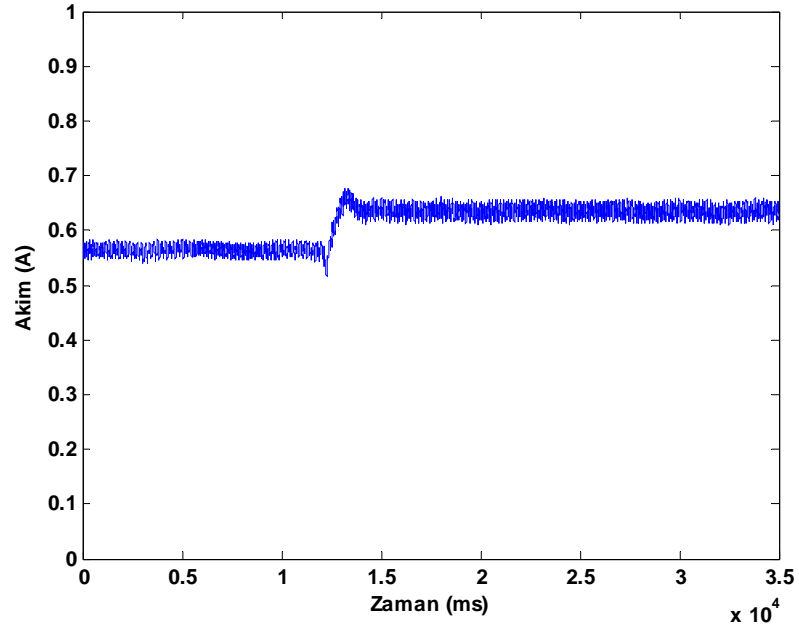


Şekil 5.22 : Hava aralığının 13mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için elde edilen konumun zamanla değişimi grafiği

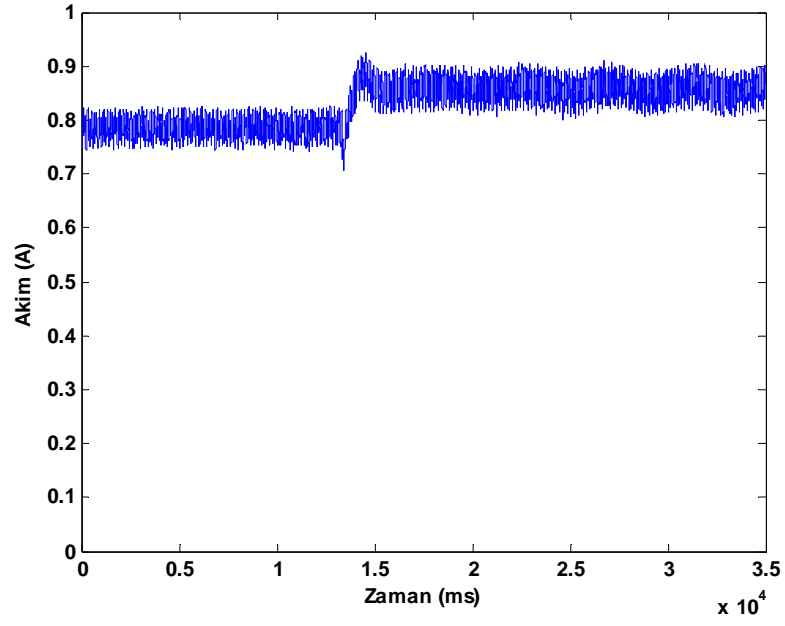
Basamak girişinin sisteme uygulanmasıyla bilye bobin çekirdeğine yaklaşarak hava aralığı 1mm kapanır. Yukarıdaki değerler direnç – geçişli yükselteçten okunan kompanze edilmemiş konum değerlerini temsil etmektedir. Basamak cevapların

biçimlerinin değişik hava boşluğu değerleri için aynı olmaları geri beslemeli doğrusallaştırmanın çalışma noktasını geniş aralıklara çektiğinin göstergesidir. Sistemin yüksek hava aralığı değerlerinde aynı tepkiyi verdiği söylenebilir. Geçiş noktalarında az da olsa aşım meydana gelmiştir fakat makul değerlerde olduğundan bir zararı yoktur.

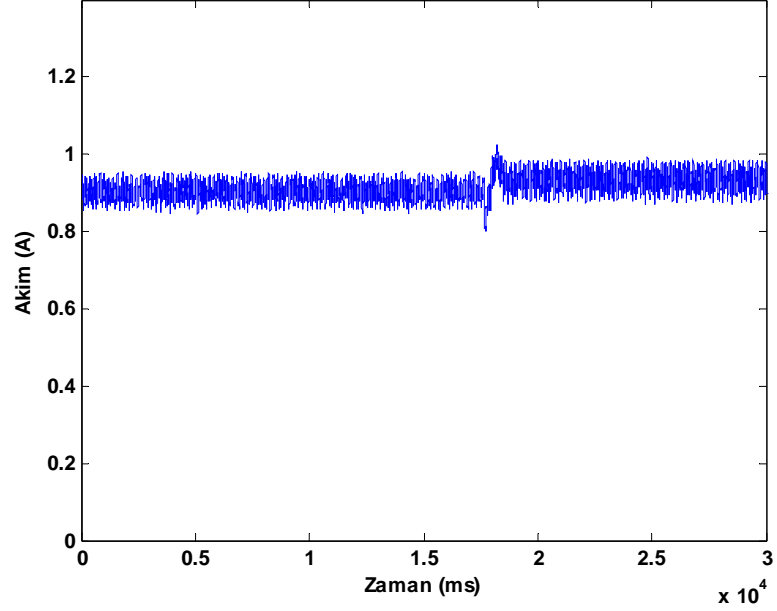
Şekil 5.23, şekil 5.24, şekil 5.25 ve şekil 5.26'da yine sırasıyla yukarıdaki hava aralığı değerlerinde sisteme 1mm'lik basamak girişi uygulandığında sistemden bu girişlere karşılık bobinden çekilen akımlar gösterilmiştir. Veriler önceki denemelerde yapıldığı şekilde toplanmıştır.



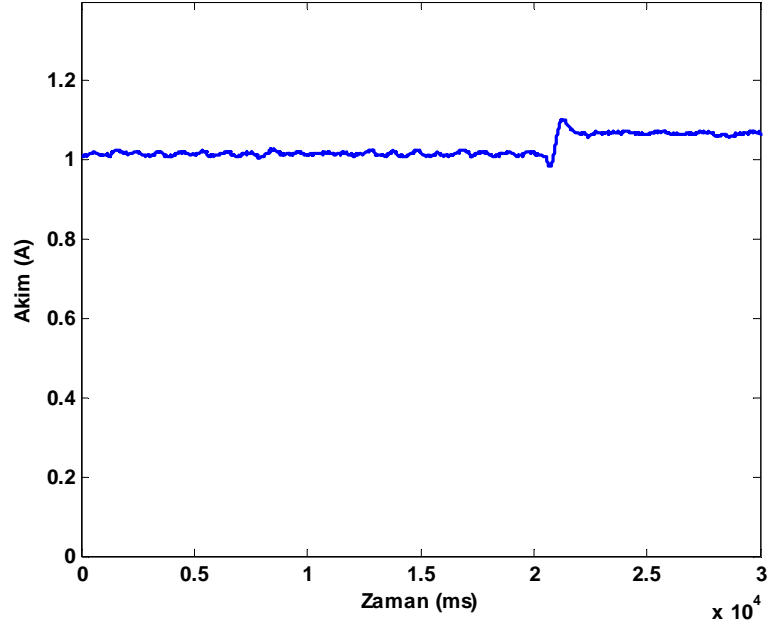
Şekil 5.23 : Hava aralığının 5mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için bobinden çekilen akım değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.24 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için bobinden çekilen akım değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.25 : Hava aralığının 11mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için bobinden çekilen akım değerinin zamanla değişimi



Şekil 5.26 : Hava aralığının 13mm değerine ayarlandığı durumda sisteme uygulanan 1mm'lik basamak girişi için bobinden çekilen akım değerinin zamanla değişimi

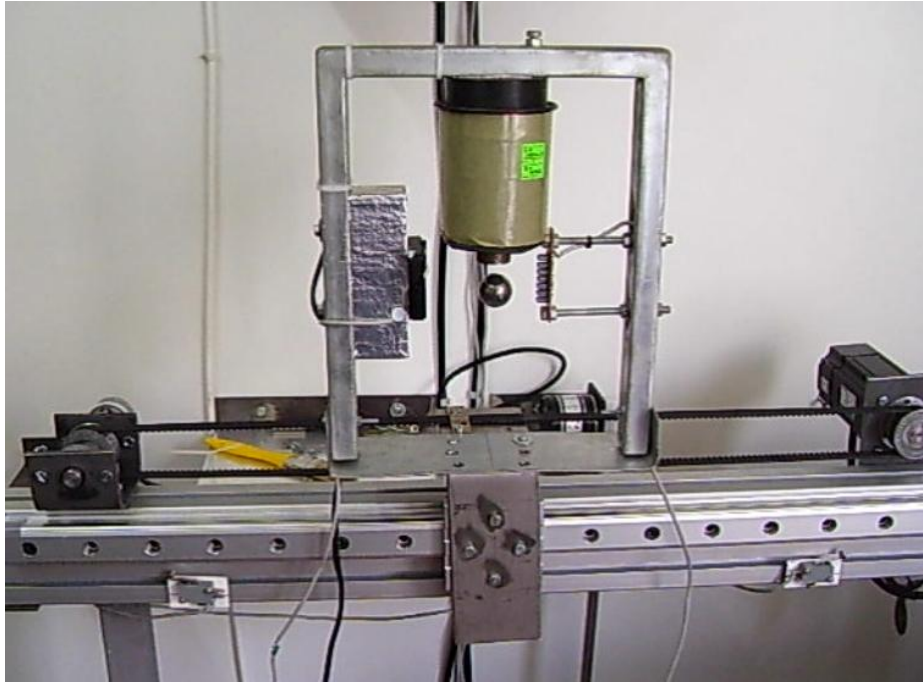
Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi; hava aralığının belli değerlerinde sisteme 1mm'lik basamak girişi uygulandığında bobinden çekilen akım değeri de bilyenin konumundaki artışa paralel olarak artmaktadır. Daha önce elde edilen konum grafikleri ile çekilen akım grafiklerinin şekillerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür. Basamak cevapların biçimlerinin değişik hava boşluğu değerleri için benzer olmaları geri beslemeli doğrusallaştırmanın çalışma noktasını geniş aralıklara çektiğinin göstergesidir. Sistemin yüksek hava aralığı değerlerinde aynı tepkiyi verdiği söylenebilir.

### 5.7 Bozucu Dış Etkenler Uygulandığında Sistemin Davranışının İncelenmesi

Kontrol sistemlerinin uygulamasında, tasarlanan sistemin sönüm ve doğruluk koşullarına uyması dışında, sisteme etki edebilecek dış bozucu etkenlere ve sistem parametrelerindeki değişimlerine karşı davranışının dayanıklı olması yani duyarsız olması beklenir. Bu bölümde, sisteme yatay ve düşey eksenlerde bozucu dış sinyaller uygulanmış ve sistemin davranışı deneysel olarak ifade edilmiştir.

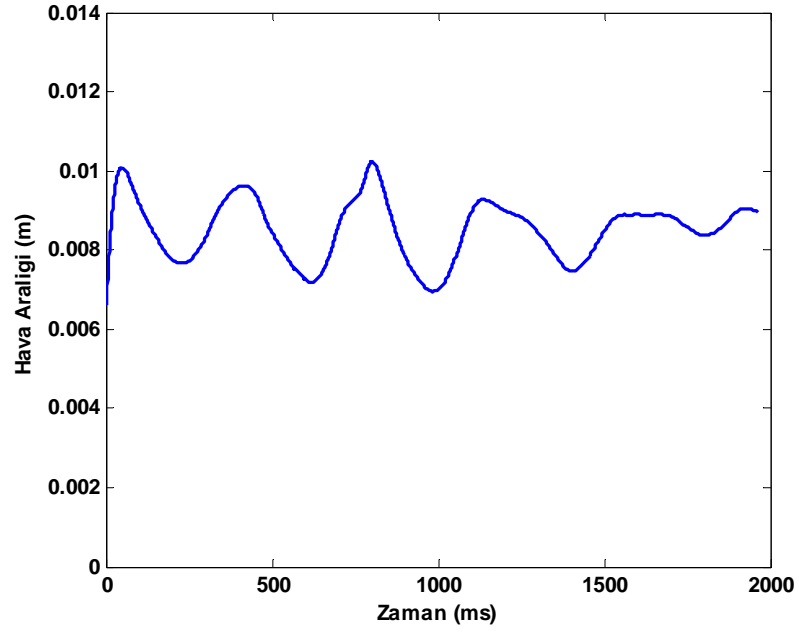
### 5.7.1 Yatay bozucu etkilere karşı sistem davranışı

İlk olarak; sistemin yatay ekseninde uygulanacak dış bozucu etkenlere karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla, sistem yatay ekseninde uygulanan işarete göre ileri-geri hareket edebilen bir yapıya monte edilmiş ve 8mm hava aralığı değeri için bilye 2Hz, 4Hz, 6Hz ve 10Hz frekans değerlerine sahip, 0.2V genlikli bir sinüs işareti uygulanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Deney düzeneğinin resmi şekil 5.27’de gösterilmiştir.

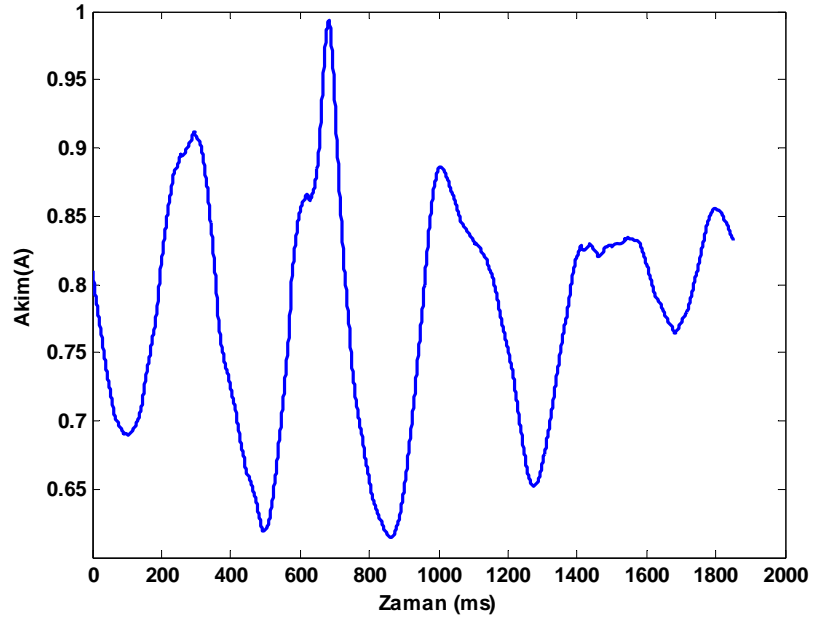


Şekil 5.27 : Manyetik süspansiyon sisteminin yatay ekseninde hareket eden düzeneğe monte edilmesiyle oluşan deney düzeneği

Sistemin bu koşullar altındaki konum algılayıcısından alınan konum verileri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. İlk olarak, 2Hz frekanslı ve 0.2V genlikli bir sinüs işareti uygulandığında elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla şekil 5.28 ve şekil 5.29’da gösterilmiştir.

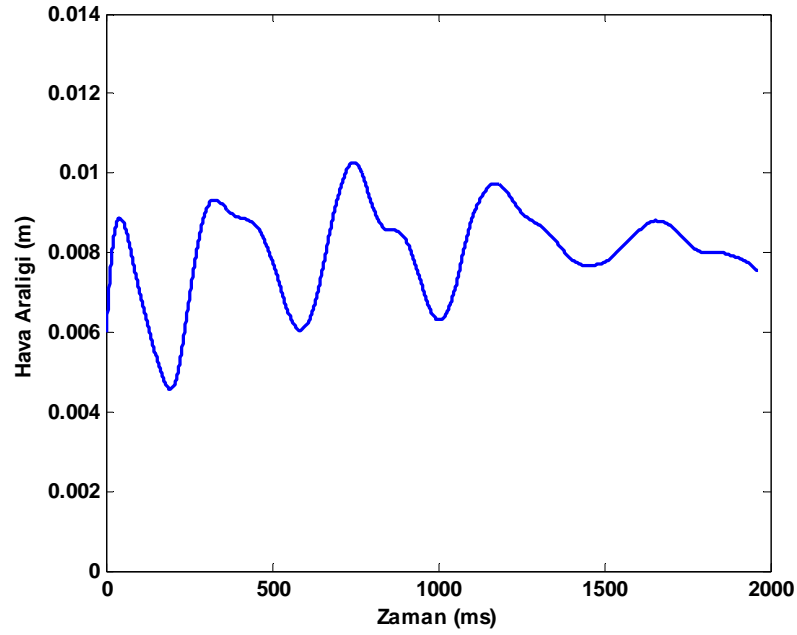


Şekil 5.28 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 2Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi

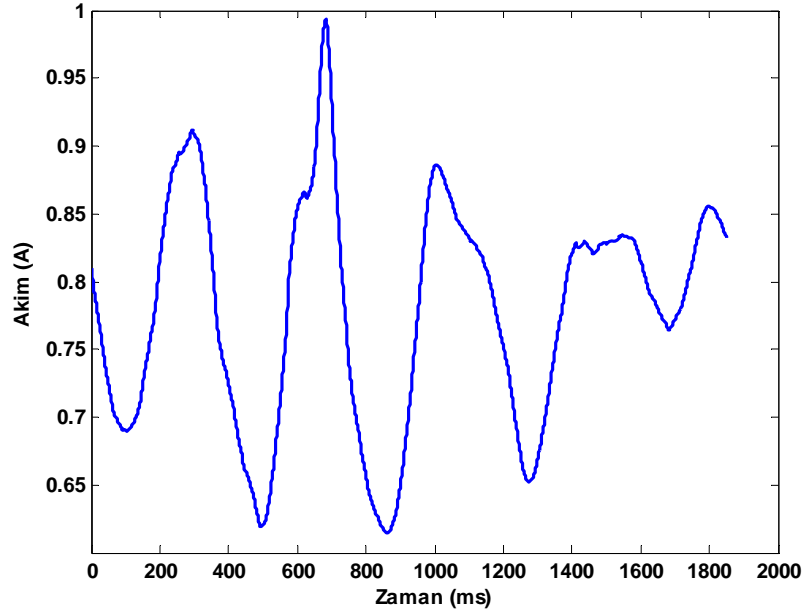


Şekil 5.29 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 2Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında elde edilen akım değeri

Daha sonra 4Hz frekanslı ve 0.2V genlikli bir sinüs işareti uygulandığında elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla şekil 5.30 ve şekil 5.31’de gösterilmiştir.



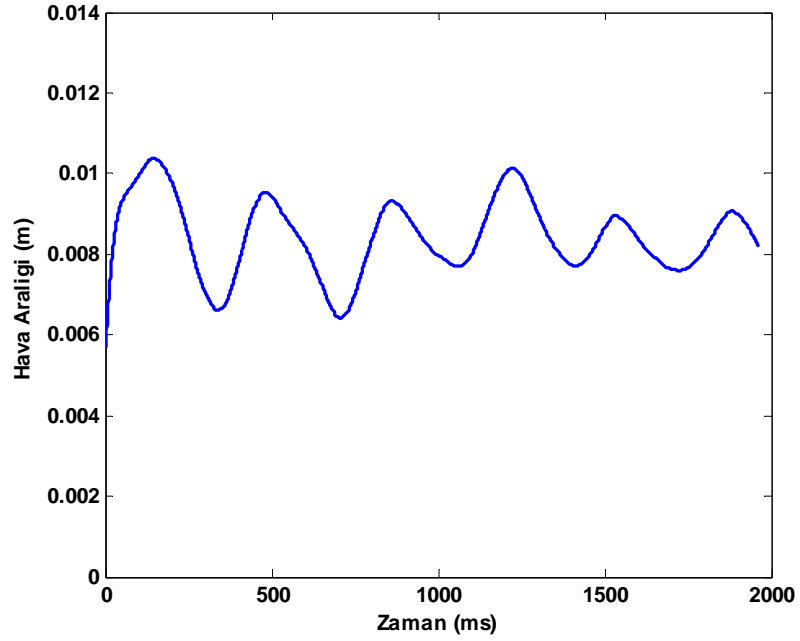
Şekil 5.30 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 4Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi



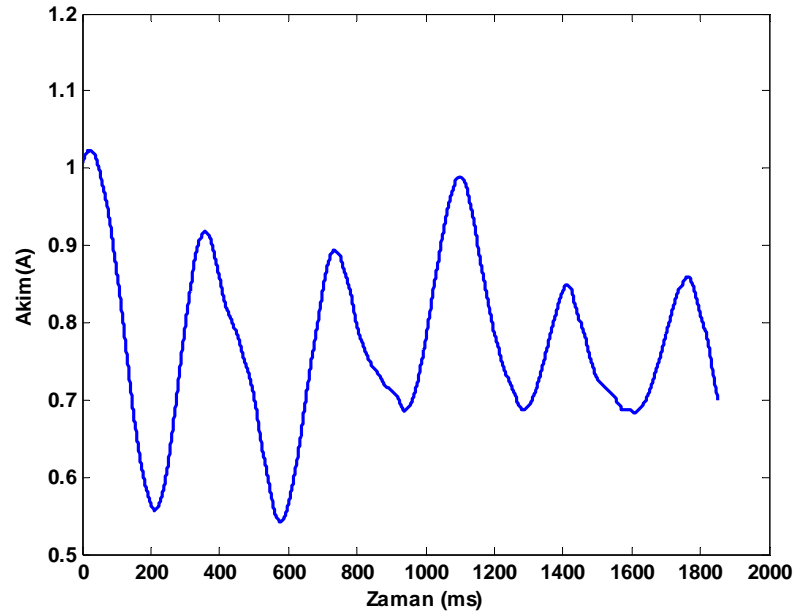
Şekil 5.31 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 4Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında elde edilen akım değeri

Daha sonra 6Hz frekanslı ve 0.2V genlikli bir sinüs işareti uygulandığında elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla şekil 5.32 ve şekil 5.33'de gösterilmiştir.



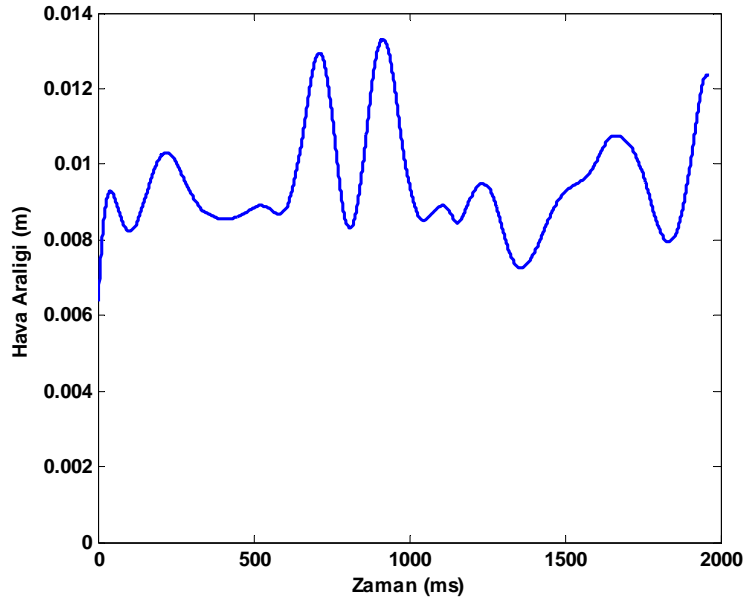


Şekil 5.32 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 6Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi

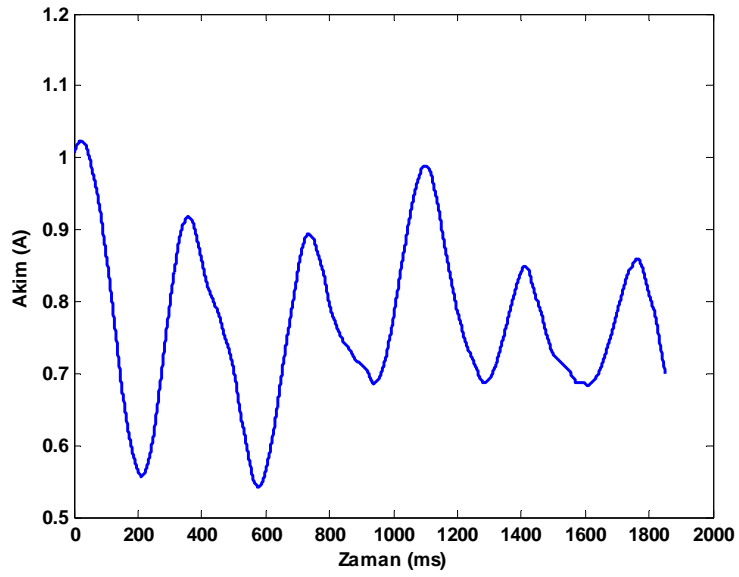


Şekil 5.33 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 6Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında elde edilen akım değeri

Son olarak, 10Hz frekanslı ve 0.2V genlikli bir sinüs işareti uygulandığında elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla şekil 5.34 ve şekil 5.35’de gösterilmiştir.



Şekil 5.34 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 10Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi



Şekil 5.35 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 10 Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında elde edilen akım değeri

Tablo 5.2 : 8mm hava aralığı için 25mm çaplı bilye kullanılarak yatay ekseninde bozucu kuvvet uygulandığında elde edilen konum ve akım değerlerindeki standart sapmalar

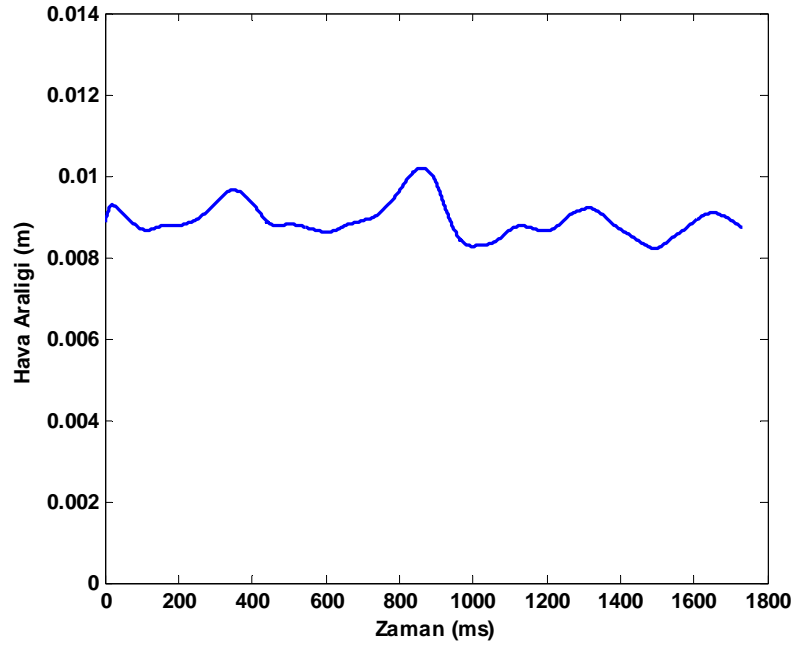
<b>Frekans (Hz)</b>	<b>Konumdaki Standart Sapma (m)</b>	<b>Akımdaki Standart Sapma (A)</b>
2	0.00078	0.147
4	0.00123	0.155
6	0.00242	0.191
10	0.00536	0.2452

Yukarıdaki şekillerden ve elde edilen verilerin standart sapmalarından yararlanılarak oluşturulan yukarıdaki tablodan (tablo 5.2) görüldüğü gibi, sisteme yatay ekseninde uygulanan sabit genlikli bozucu işaretin frekansı arttırıldıkça konum algılayıcısından alınan konum bilgilerinde ve bobinden geçen akım değerlerinde meydana gelen hatalar da artmaktadır. En iyi sonuç uygulanan işaretin frekansının 2Hz olduğu durumda, en kötü sonuç ise 10Hz olduğu durumda elde edilmiştir. Sistemin fiziksel yapısı yatay ekseninde hareket ettirildiğinde, ışık kaynağı ile ışık algılayıcısı arasında asılı duran bilye de yatay ekseninde hareket ederek, konum algılayıcısından alınan konum değerleri ve bobinden geçen akım değerlerinde hatalı sonuçların alınmasına neden olmuştur. Elde edilen hatalara rağmen sistemin bu davranışı, bozucu dış etkenlere karşı oldukça dayanıklı olduğunun göstergesidir.

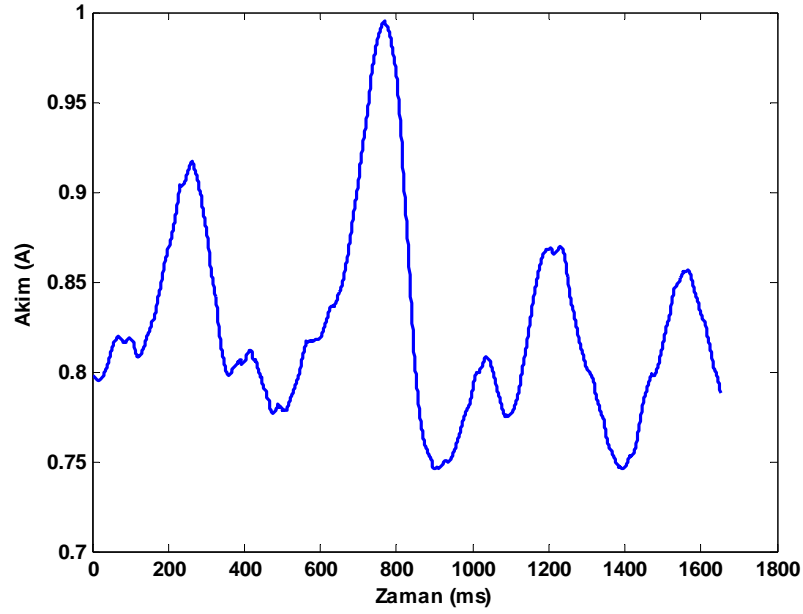
Bunların dışında, 25mm çaplı bilyeye bir de 16mm çapında başka bir bilye eklenerek şekil 5.27’de gösterilen sistemde salınmaya bırakılmış ve 8mm hava aralığında 4Hz frekans ve 0.2V genlikli bir giriş uygulanmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinin resmi şekil 5.36’da gösterilmiştir. Bozucu işaret uygulandığında elde edilen konum değerleri şekil 5.37’de akım değerleri ise şekil 5.38’de gösterilmiştir.



Şekil 5.36 : Manyetik süspansiyon sisteminin 25mm ve 16mm çaplarında iki bilye ile birlikte yatay ekseninde hareket eden düzeneğe monte edilmesiyle oluşan deney düzeneği



Şekil 5.37 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 4Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında iki bilye için konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi



Şekil 5.38 : Yatay ekseninde 8mm hava aralığı için 4Hz 0.2 genlikli sinüsoidal bozucu işaret uygulandığında iki top için elde edilen akım değeri

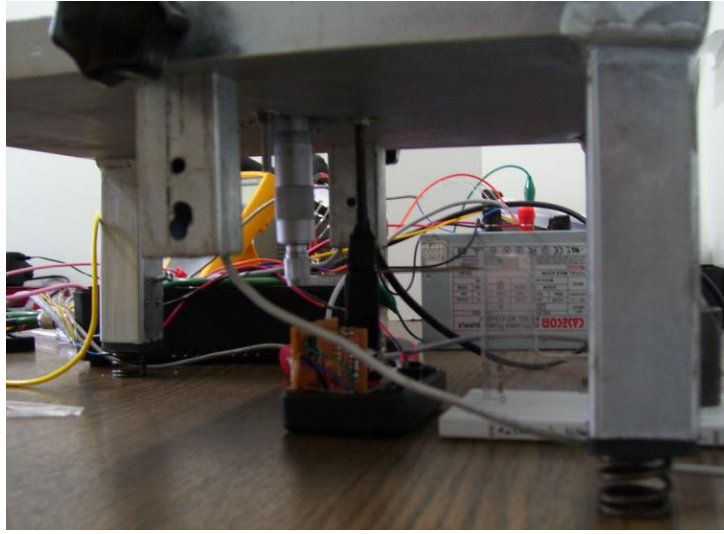
Tablo 5.3 : 8mm hava aralığı için 25mm ve 16mm çaplı iki bilye kullanılarak yatay ekseninde bozucu kuvvet uygulandığında elde edilen konum ve akım değerlerindeki standart sapmalar

<b>Frekans (Hz)</b>	<b>Konumdaki Standart Sapma (m)</b>	<b>Akımdaki Standart Sapma (A)</b>
2	0.00089	0.157
4	0.00153	0.195
6	0.00342	0.261
10	0.00686	0.352

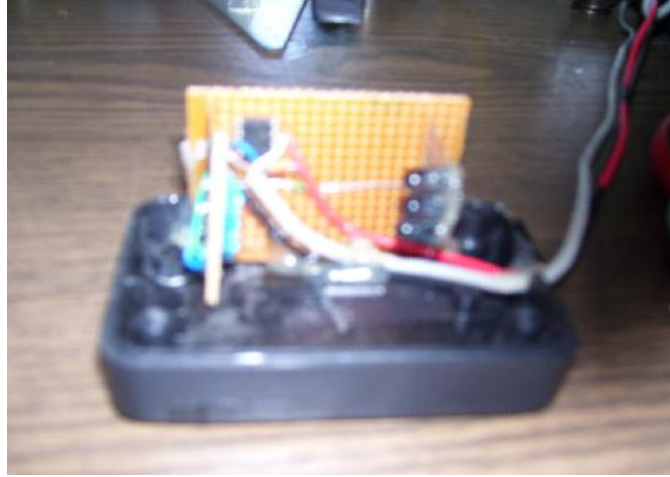
Yukarıdaki şekillerden ve elde edilen verilerin standart sapmalarından yararlanılarak oluşturulan yukarıdaki tablodan (tablo 5.3) görüldüğü gibi, iki bilyenin birlikte salınmaya bırakıldığı durumda bilyelerin salınmaları sırasında konumlarının değişmesinin yanında ağırlığın da arttırılmış olması elde edilen konum ve akım değerlerinde ortaya çıkan hata değerini yükseltmiştir. Yine de sistem, yatay ekseninde uygulanan bu bozucu etkenlere rağmen çalışarak bozucu etkenlere karşı dayanıklılığını göstermiştir.

### 5.7.2 Düşey bozucu etkilere karşı sistem davranışı

Daha sonra; sistemin düşey ekseninde uygulanacak dış bozucu etkenlere karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla, sistem 4 adet yay üzerine oturtulup üzerine kuvvet uygulanarak konum algılayıcısından alınan değerler kaydedilmiş ve çizdirilmiştir. Bu işlem yapılırken, daha önceki gibi bir fotodiyot sırası ve kızılötesi LED'ler kullanılarak, sistemde kullanılan konum algılayıcısının bir benzeri oluşturulmuş ve ana yapının altına yerleştirilmiştir. Bu ikinci konum algılayıcısının kullanılmasındaki amaç, ana yapının üzerine düşey ekseninde bir kuvvet uygulandığında, yayların da etkisiyle toplam sistemin ne kadar yer değiştirdiğini görmek ve bu değeri gerilime çevirerek bilgisayarda işlenebilir hale getirmektir. Oluşturulan düzeneğin resmi şekil 5.39'da, oluşturulan yeni konum algılayıcısının resmi ise şekil 5.40'da gösterilmiştir.



Şekil 5.39 : Sistem ve yaylardan oluşan deney düzeneği



Şekil 5.40 : Oluşturulan yeni konum algılayıcısının resmi

Yeni konum algılayıcısı sadece bu deney için oluşturulmuştur. Sistem üzerine bir kuvvet uygulandığında yayların esnemeleriyle manyetik süspansiyon sisteminin fiziksel yapısı düşey ekseninde pozitif ve negatif yönlerde yer değiştirir. Bu değişim 1mm aralıklarla ölçülerek konum algılayıcısından alınan gerilim değerleri kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. dSPACE kartına BNC bağlaç ile bağlanmış ve önceki yöntemlerde olduğu gibi ControlDesk programı yardımıyla veriler kaydedilmiş ve Matlab'a aktarılarak çizimler elde edilmiştir.

Deney düzeneğini oluştururken kullanılan yay elemanına uygulanan kuvvetle ( $F_{yay}$ ) esneme miktarı ( $y$ ) arasındaki ilişki;

$$y = \frac{8F_{yay} D^3 N}{d^4 G} \quad (5.1)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilir [13].

(5.1) eşitliğindeki  $N$  yayın sarım sayısını,  $d$  yayın yapımında kullanılan telin çapını,  $D$  yayın dış çapını,  $G$  ise ağırlık merkezini ifade etmektedir.

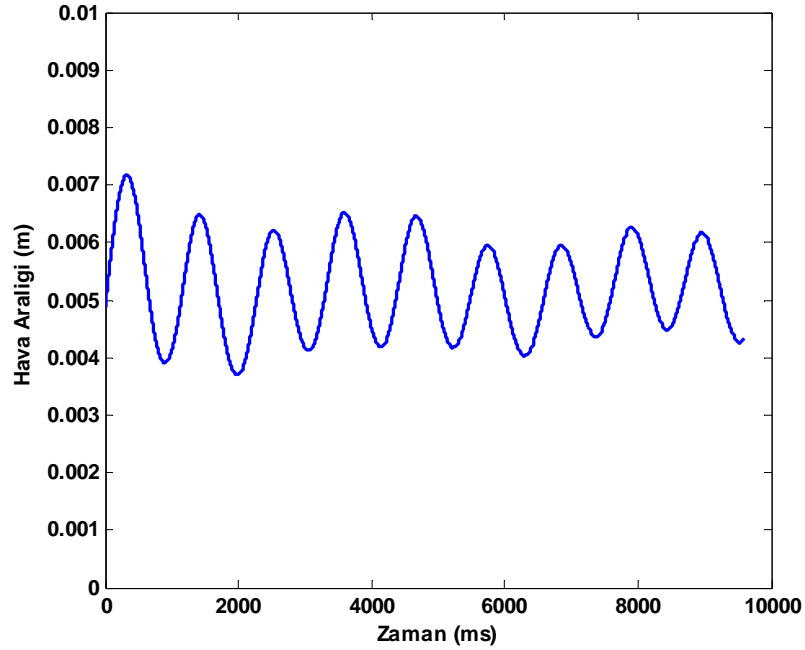
Bir yayın yay sabiti yada esneklik katsayısı yayın üzerine uygulanan kuvvetin esneme miktarına oranı olduğundan yay sabiti ( $k$ ) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$k = \frac{F_{yay}}{y} = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (5.2)$$

Kullanılan yaylar üzerine 8kg'lık (yaklaşık 80N) bir kuvvet uygulandığında manyetik süspansiyon sisteminin fiziksel yapısının dolayısıyla yayların 1mm esnediği deneysel olarak gözlenmiştir. Bu deneysel verinin ışığında (5.2) eşitliği yardımıyla kullanılan yayların yay sabiti  $k = 80.000\text{N/m}$  olarak elde edilmiştir.

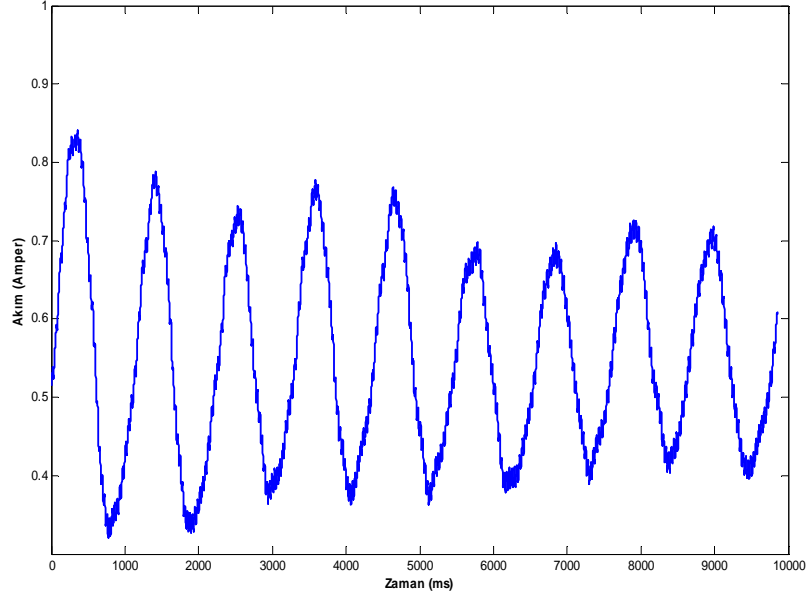
Deney sonucu ana sistemin konum algılayıcısından elde edilen konum verileri 5mm, 8mm ve 9mm hava aralıkları değerleri için elde edilmiştir.

Hava aralığının 5mm olduğu durumda elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla, şekil 5.41 ve şekil 5.42'de gösterilmiştir.



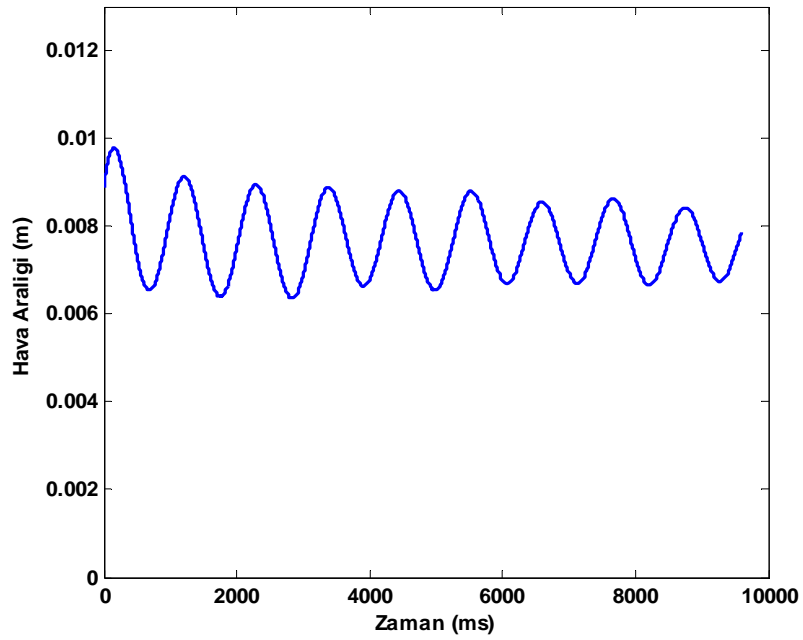
Şekil 5.41 : 5mm hava aralığı değeri için düşey eksende bozucu bir kuvvet uygulandığında ana sistemin konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi



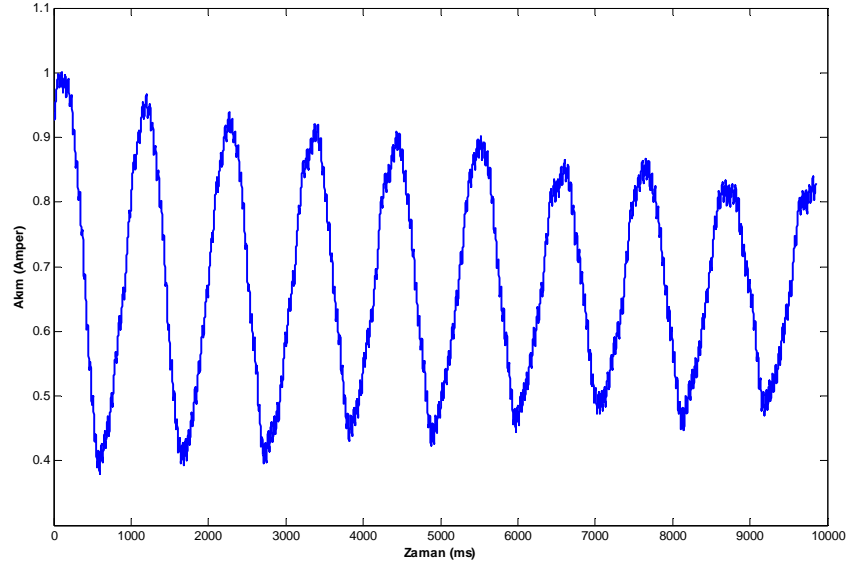


Şekil 5.42 : Düşey ekseninde 5mm hava aralığı için bozucu kuvvet uygulandığında elde edilen akım değeri

Hava aralığının 8mm olduğu durumda elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla, şekil 5.43 ve şekil 5.44’de gösterilmiştir.

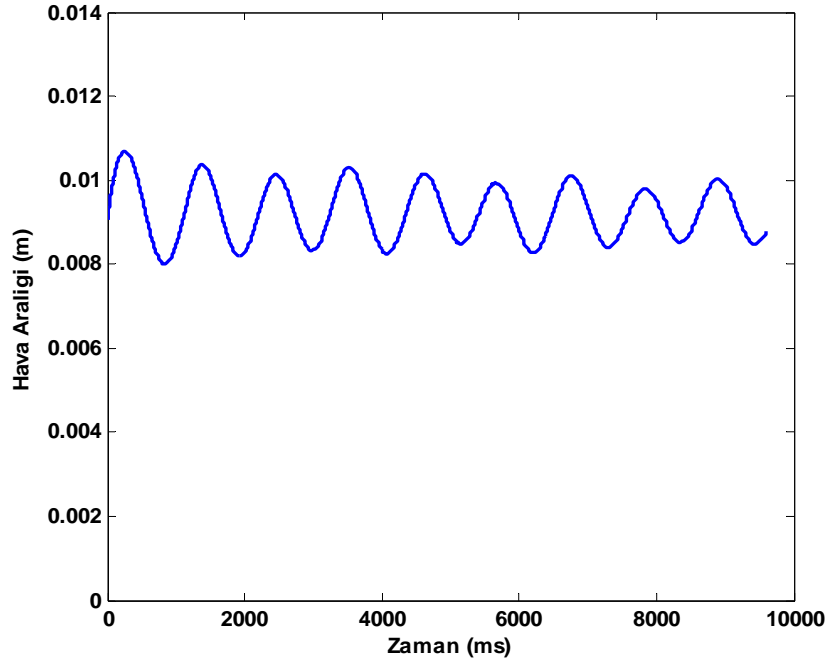


Şekil 5.43 : 8mm hava aralığı değeri için düşey ekseninde bozucu bir kuvvet uygulandığında ana sistemin konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi

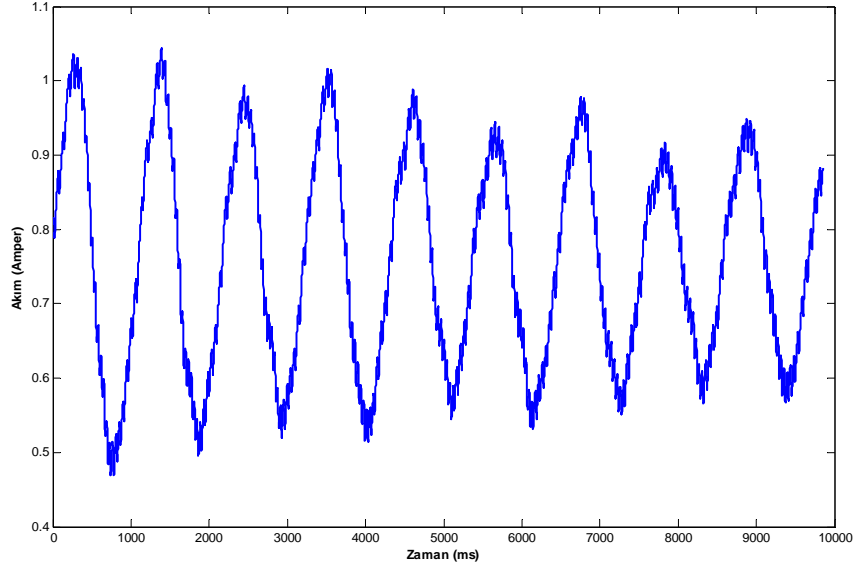


Şekil 5.44 : Düşey ekseninde 8mm hava aralığı için bozucu kuvvet uygulandığında elde edilen akım değeri

Hava aralığının 9mm olduğu durumda elde edilen konum ve akım değerleri sırasıyla, şekil 5.45 ve şekil 5.46'da gösterilmiştir.



Şekil 5.45 : 9mm hava aralığı değeri için düşey ekseninde bozucu bir kuvvet uygulandığında ana sistemin konum algılayıcısından alınan değerlerin zamanla değişimi



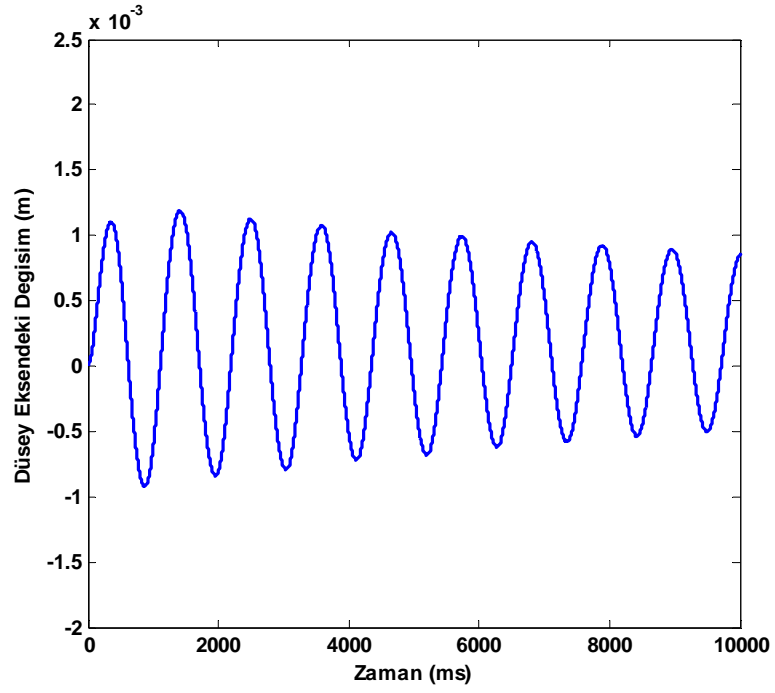
Şekil 5.46 : Düşey ekseninde 9mm hava aralığı için bozucu kuvvet uygulandığında elde edilen akım değeri

Tablo 5.4 : Farklı hava aralıklarında 25mm çaplı bilye kullanılarak elde edilen konum ve akım değerlerindeki standart sapmalar

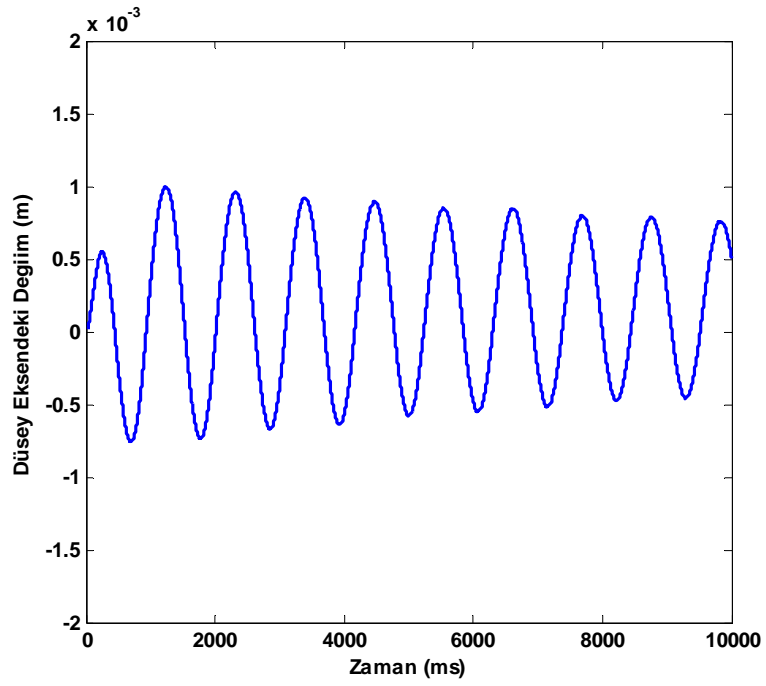
<b>Frekans (Hz)</b>	<b>Konumdaki Standart Sapma (m)</b>	<b>Akımdaki Standart Sapma (A)</b>
2	0.00042	0.2182
4	0.00066	0.2588
6	0.00087	0.2691

Yukarıdaki şekillerden ve elde edilen sonuçlardaki sapmalarından yararlanılarak çıkartılan tablodan (tablo 5.4) görüldüğü gibi, sistemi yaylar üzerine oturtup düşey ekseninde bir kuvvet uygulandığında, ana sistemin konum algılayıcısından deneysel olarak elde edilen konum bilgisindeki ve buna bağlı olarak elde edilen akım bilgisindeki değişim miktarı ilk anda yüksek değerlerdedir. Zaman geçtikçe bu değişim yayların salınmasının etkisiyle sinüsoidal bir biçimde azalır.

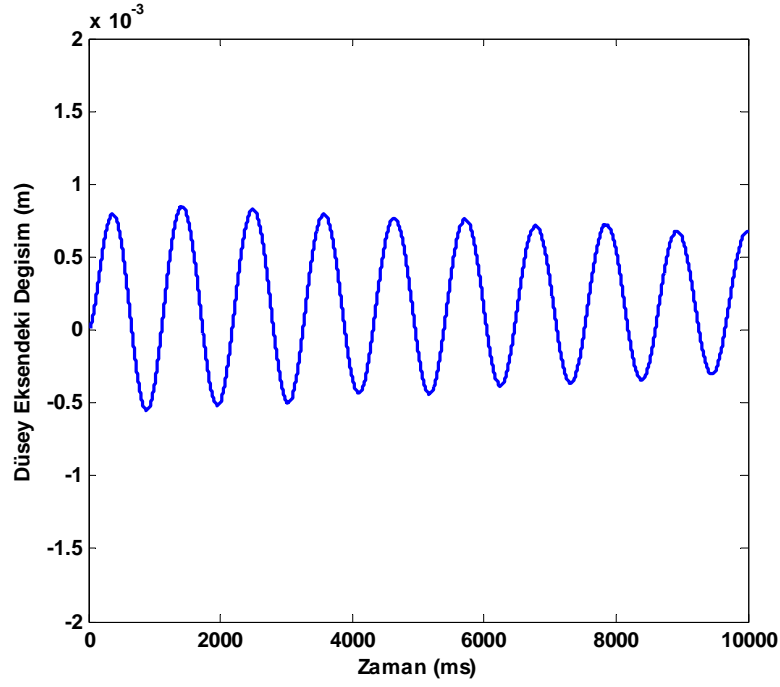
Ayrıca, sadece bu deney için oluşturulan diğer konum algılayıcısından elde edilen veriler yine aynı hava aralığı değerleri için sırasıyla, şekil 5.47, şekil 5.48 ve şekil 5.49'da gösterilmiştir.



Şekil 5.47 : 5mm hava aralığında düşey eksende bozucu bir kuvvet uygulandığında fiziksel yapının yer değiştirmesi



Şekil 5.48 : 8mm hava aralığında düşey eksende bozucu bir kuvvet uygulandığında fiziksel yapının yer değiştirmesi



Şekil 5.49 : 10mm hava aralığında düşey eksende bozucu bir kuvvet uygulandığında fiziksel yapının yer değiştirmesi

Grafiklerden de görüldüğü gibi; algılayıcının çıkışı  $\pm$  konum değerleri arasında değişmektedir. Bunun nedeni, fiziksel yapının üzerine uygulanan kuvvetin etkisiyle yapının yayların etkisiyle düşey eksende + ve – yönlerde salınmasıdır.

Çeşitli hava aralıkları için sisteme düşey eksende bir kuvvet uygulandığında yukarıdaki grafikler elde edilmiştir. Kuvvet uygulandığında, sistemin konum algılayıcısından elde edilen verilerdeki dalgalanmalar daha sonra oluşturulan konum algılayıcısından elde edilen verilerdeki sapmalara nazaran daha düşük seviyededir. Sistemin konum algılayıcısından alınan veriler ilk anda bütün hava aralıkları değerleri için tepeden tepeye yaklaşık 3mm fark ederken, daha sonra oluşturulan konum algılayıcısından elde edilen veriler, hava aralığının 5mm olduğu durumda 20mm, 8mm olduğu durumda yaklaşık 17mm, 10mm olduğu durumda ise yaklaşık 13mm değişmiştir. Yani hava aralığı 5mm iken, sistemin fiziksel yapısı düşey eksende 20mm yer değiştirirken o anda havada asılı duran bilye yaklaşık 3mm yer değiştirmiştir. Denenen diğer hava aralıklarında da aynı durum söz konusudur. Sistemin ana yapıda meydana gelen salınmayı başarılı bir şekilde tolare ederek çalıştığı görülmüştür. Bu da sistemin düşey yöndeki bozucu etkenlere karşı son derece başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

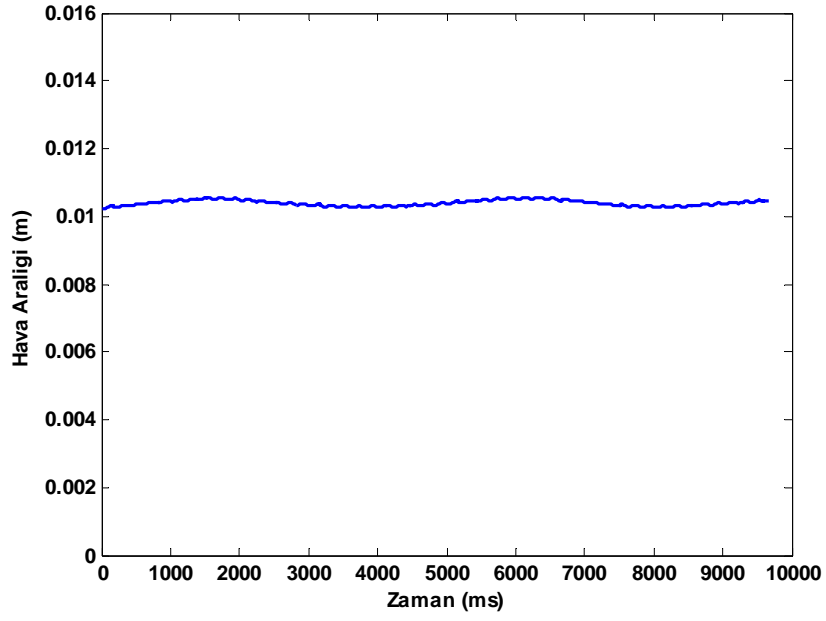
## 5.8 Farklı Ağırlıktaki Bilyelerin Kullanılması Halinde Sistemin Davranışının İrdelenmesi

Bu kısımda, farklı ağırlıklı bilyeler kullanılarak sistemin değişen kütleler karşısındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, bilyeler için hava aralığının 10mm olduğu durumda, konum algılayıcısından elde edilen konum bilgisi ve bobinden geçen akımın değişimi Matlab ortamında çizdirilmiştir.

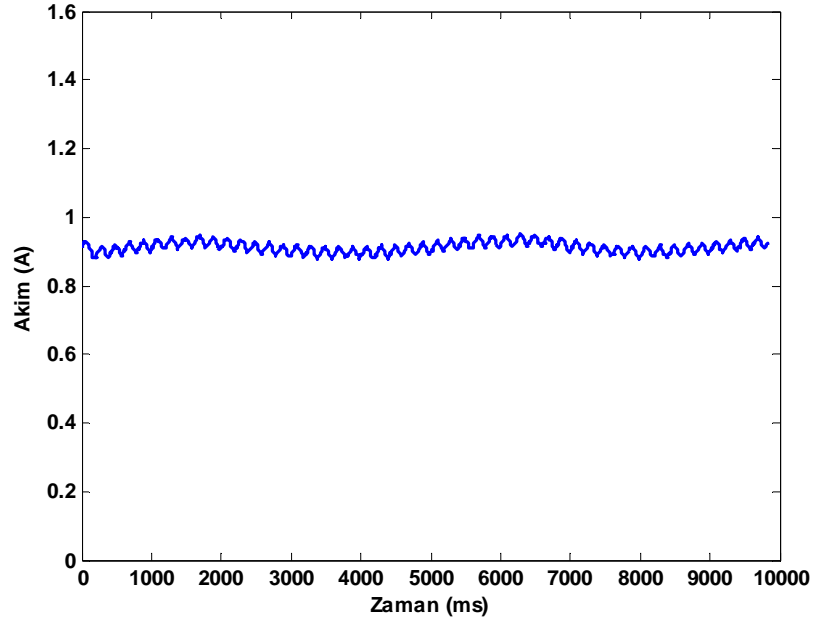
İlk olarak, daha önce de kullanılan 25mm çapında ve 63gr ağırlığındaki bilyeye 16mm çapında ve 38gr ağırlığındaki bir bilye eklenmiş ve salınmaya bırakılmıştır. Oluşturulan yapının resmi şekil 5.50'de gösterilmiştir. Bu durumda, 10mm hava aralığı için elde edilen konum ve akım bilgileri sırasıyla şekil 5.51 ve şekil 5.52'de gösterilmiştir.



Şekil 5.50 : Manyetik süspansiyon sisteminde 25mm ve 16mm çaplarında iki bilyenin birlikte salınması



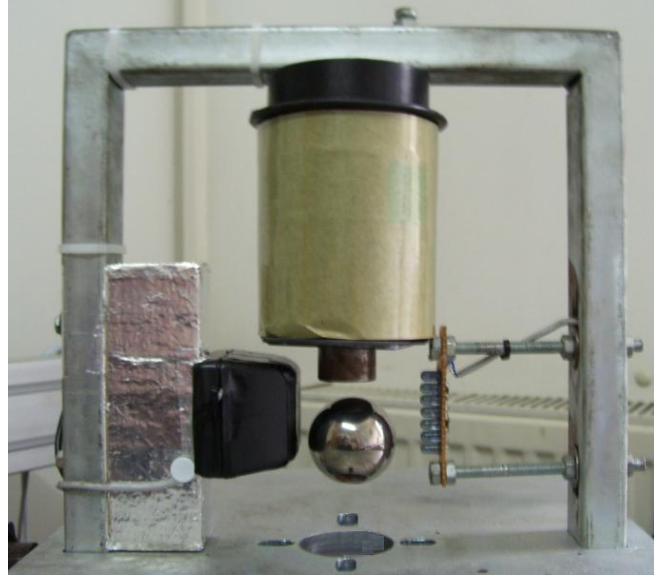
Şekil 5.51 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda birbirine yapışık iki bilye için konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi



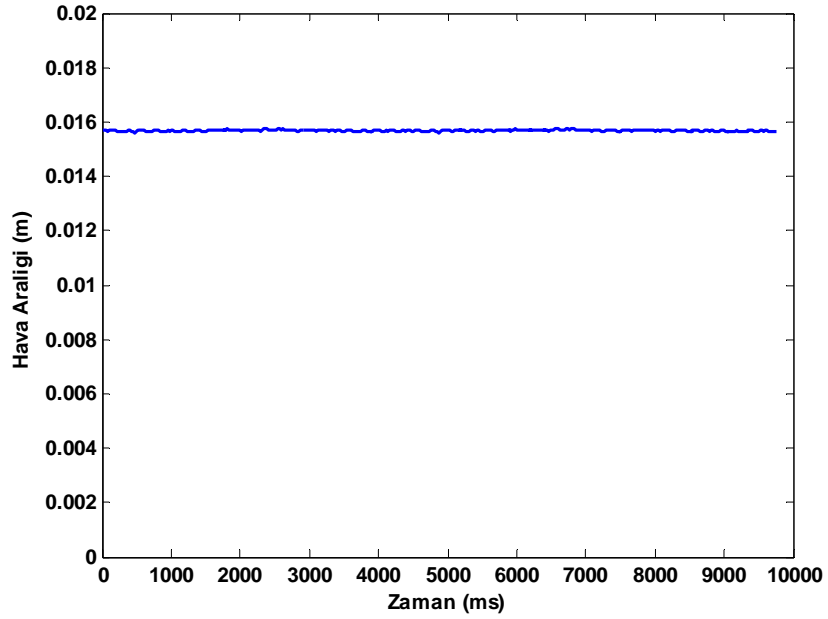
Şekil 5.52 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda birbirine yapışık iki bilye için bobinden geçen akım değerinin zamanla değişimi

Daha sonra, 38mm çapında ve 225gr ağırlığındaki bilye salınmaya bırakılmıştır. Oluşturulan yapının resmi şekil 5.53’de gösterilmiştir. Bu durumda, 10mm hava

aralığı için elde edilen konum ve akım bilgileri sırasıyla şekil 5.54 ve şekil 5.55’de gösterilmiştir.

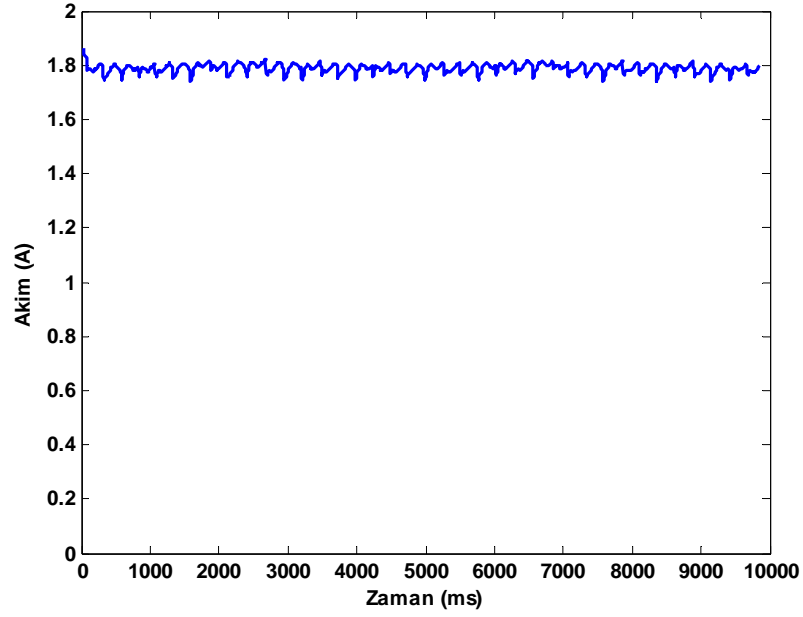


Şekil 5.53 : Manyetik süspansiyon sisteminde 38mm çaplı büyük bilyenin salınması



Şekil 5.54 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda 38mm çaplı büyük bilye için konum algılayıcısından elde edilen konum değerinin zamanla değişimi





Şekil 5.55 : Hava aralığının 10mm değerine ayarlandığı durumda 38mm çaplı büyük bilye için bobinden geçen akım değerinin zamanla değişimi

Daha önce şekil 5.13’de gösterildiği gibi, 25mm çapında ve 63gr ağırlığında bir bilye kullanıldığında elde edilen konum bilgisi ile aynı hava aralığı için 25mm ve 16mm çaplarında toplam 101gr ağırlığında birbirine yapışık iki bilye (şekil 5.51) ve 38mm çapında 225gr ağırlığında büyük bir bilye (şekil 5.54) kullanıldığında elde edilen konum bilgileri karşılaştırıldığında, ortaya çıkan sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. İki bilye ve büyük bilyenin kullanıldığı durumlarda konum bilgisindeki hatalar ağırlıklarıyla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, tüm ayarların 25mm çaplı ve 63gr ağırlıklı bilye için yapılmış olmasıdır. Denetleyici parametreleri, konum algılayıcının yapısı bu bilye için ayar edilmiştir. Dolayısıyla, diğer bilyeler için hataların artmış olması çok doğaldır.

Aynı şekilde, 25mm çaplı bilye kullanıldığında elde edilen bobin akımının değişimi şekil 5.1’de gösterilmiştir. Bu şekle göre 25mm çaplı bilye kullanıldığında bobinden yaklaşık 0.8A akım geçmektedir. Şekil 5.52’de gösterildiği gibi iki bilye birleştirildiğinde çekilen akım yaklaşık 0.1A artışla 0.9A civarına yükselmiştir. 38mm çaplı büyük bilye kullanıldığında ise bobin akımı 1.8A civarına gelmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi salınmaya bırakılan bilyelerin ağırlıkları arttıkça bobinin çektiği akımın da ağırlık artışıyla orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bobin

bilyeyi havada tutabilmek için daha fazla kuvvet üretir. Bunu yapabilmek için de kaynaktan daha çok akım çeker.

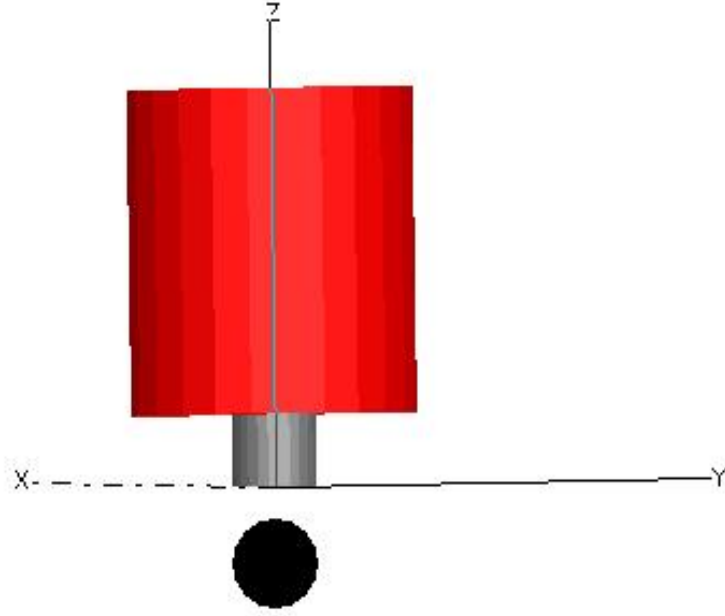
### **5.9 Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Sistemin Manyetik Benzetimi**

Manyetik süspansiyon sistemi, bir modelleme ve analiz programı olan Maxwell kullanılarak modellenerek manyetik benzetimi yapılmıştır. Maxwell 3D Alan Simulatörü, elektromanyetik problemleri çözmek için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanan bir programdır. Oluşturulan model için her adımda maxwell denklemleri çözümlenerek değerler elde edilir ve bu değerlerin analizi yapılır. Problemin çözümünde, bobinin geometrik özellikleri, kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri ve bobinden geçecek akım tanımlanarak çözümleneceği yapılır. Maxwell programı sayesinde;

- Gerekli sonlu eleman ağı otomatik olarak oluşturulur.
- Bobine etki eden kuvvet, tork, indüktans, kapasitans ve güç kayıpları gibi değerler hesaplanabilir. Fakat burada, kullanılan versiyon sınırlı imkanlara sahip olduğundan sadece kuvvet ölçümü ve analizi yapılmıştır.
- Bulunan değerler grafiksel olarak ifade edilebilir.

Modelleme aşamasında, programda ilk olarak bobindeki manyetik alanların etkisiyle oluşan kuvvet değeri hesaplanacağından çözümleyici tipi olarak “magnetostatic” çözümleyici seçilmiştir. Geometrik modelin tanımlanması aşamasında ise bobin modeli XYZ ekseninde çizim yapılarak oluşturulmuştur. Bobinde kullanılan malzemelerin yapısal özellikleri ve sınırlar belirlendikten sonra oluşturulan modelin çözümlenmesi yapılmıştır. Hava aralığının 2mm, 5mm ve 10mm olduğu durumlarda belirlenen akım değerleri için bilyeye etki eden manyetik kuvvet değerleri Maxwell 3D programı ile elde edilmiş ve daha önce deneysel olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak bobin çekirdeğinde oluşan manyetik akının yönü şekil üzerinde gösterilmiştir.

Oluşturulan model şekil 5.56’da gösterilmiştir. Kullanılan bobin 25mm çaplı demirden silindirik yapıda bir çekirdek üzerine sarılmış dışı yalıtımlı bakır tellerden oluşmaktadır. Bobinin sarım sayısı 2.200’dür.



Şekil 5.56 : Manyetik süspansiyon sisteminin Maxwell programı ile oluşturulan manyetik modeli

Çözümlemede daha iyi bir sonuç elde edebilmek için 10 adet deneme yapılmış ve elde edilen kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Program her denemede modellenen sistem için maxwell denklemlerini çözümlenerek sonuca ulaşır. Bu maxwell denklemleri hesaplanırken sistemin bulunduğu alan küçük üçgenlere ayrılarak işlem yapılır. Bu üçgenlerin sayısı ne kadar fazla ise yapılan hesaplamalar da o kadar hassaslaşır. Üçgen sayısı arttıkça hesaplama hassasiyeti arttığı için elde edilen sonuç daha kesin ve doğru olacaktır.

Programdan elde edilen kuvvet verileri farklı hava aralıklarında aynı akım değerleri için elde edilmiş ve bu veriler daha önce deneysel olarak elde edilmiş kuvvet verileri ile birlikte sırasıyla tablo 5.5, tablo 5.6 ve tablo 5.7’de gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilen kuvvet verileri ise şekil 3.10, şekil 3.11 ve şekil 3.12’de daha önce gösterilmiştir.

Tablo 5.5 : 2 mm hava aralığında farklı akım değerleri için bilyeye etki eden manyetik kuvvetler

<b>Çekilen Akım (A)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Deneysel Kuvvet (N)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Simülasyon Kuvveti (N)</b>	<b>% Hata</b>
0.15	0.104	0.112	%8.1
0.20	0.172	0.185	%7.6
0.25	0.265	0.287	%8.3
0.30	0.372	0.402	%8.2

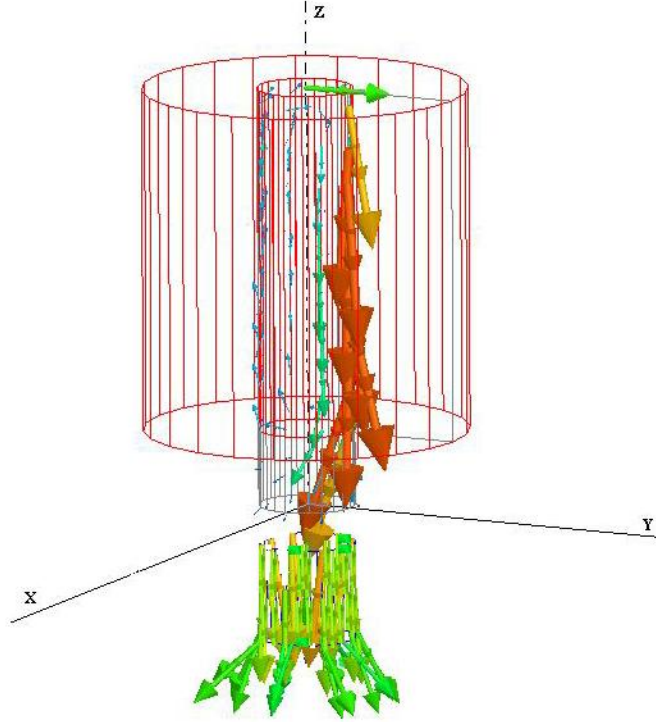
Tablo 5.6 : 5 mm hava aralığında farklı akım değerleri için bilyeye etki eden manyetik kuvvetler

<b>Çekilen Akım (A)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Deneysel Kuvvet (N)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Benzetimsel Kuvvet (N)</b>	<b>% Hata</b>
0.15	0.042	0.046	%9,1
0.20	0.068	0.074	%8.5
0.25	0.120	0.130	%7.9
0.30	0.174	0.189	%8.4

Tablo 5.7 : 10 mm hava aralığında farklı akım değerleri için bilyeye etki eden manyetik kuvvetler

<b>Çekilen Akım (A)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Deneysel Kuvvet (N)</b>	<b>Bilyeye Etki Eden Benzetimsel Kuvvet (N)</b>	<b>% Hata</b>
0.15	0.012	0.0131	%9.6
0.20	0.022	0.0238	%8.1
0.25	0.043	0.0470	%9.2
0.30	0.062	0.0674	%8.7

Bobine uygulanan akım sonucunda oluşan manyetik akının yönünün grafiği şekil 5.57'de gösterilmiştir. Görüleceği üzere çekirdekte oluşan akı bilye üzerinden geçip devresini tamamlamaktadır. Bu esnada belli bir miktar akı da bilyenin altından dış ortama saçılmaktadır.



Şekil 5.57 : Sistemde oluşan manyetik akının izlediği yol

Maxwell 3D Simülatörü ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak manyetik süspansiyon sisteminin bir modeli oluşturulmuş ve manyetik benzetimi yapılmıştır. Bu sayede, farklı hava aralıklarında çekilen belirli akım değerleri için oluşan manyetik kuvvetler elde edilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen değerler ile daha önce deneysel olarak elde edilen değerler tablo halinde verilmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel olarak elde edilen kuvvetler ile manyetik benzetim sonucu elde edilen kuvvetlerin küçük bir hata payıyla birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca sabit akım değerleri için hava aralığı arttıkça oluşan kuvvetin giderek azaldığı belirlenmiştir.

## BÖLÜM 6 SONUÇLAR

### 6.1 Özet

Yapılan çalışmada, tek eksenli bir manyetik süspansiyon sisteminin modellenmesi, tasarımı ve uygulaması sunulmuştur. Süspansiyon sistemi ana yapısı itibari ile; konum algılayıcısı, demir bilye, bobin, doğrusal yükselteç ve denetleyiciden meydana gelmektedir. Sistem, klasik doğrusal olmayan kontrol probleminin modellenmesi, dinamikleri ve kontrolüne dair güzel bir örnek teşkil etmektedir. Geri beslemeli doğrusallaştırma tekniği ile doğrusal olmayan manyetik süspansiyon sistemi, çalışma noktasına olan bağımlılığından kurtarılmıştır. Sistemin geniş aralıklarda çalışabilmesi açısından sapmanın yüksek olduğu sistemlerde çalışma noktasına olan bağımlılığın ortadan kaldırılması hayli önemlidir. Bununla birlikte, sistem modelleme hatalarına karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Bu nedenle, modelleme yapılırken hassas davranılmış ve oluşabilecek hatalar en az seviyeye indirilmiştir. Sistemin verdiği cevaplar 25mm'lik bilye için farklı hava aralıklarında ve 1mm'lik basamak girişleri uygulandığında kaydedilmiş ve çizdirilmiştir. Daha sonra, sisteme düşey ve yatay eksenlerde farklı frekans değerlerinde bozucu dış kuvvetler uygulanarak sistemin verdiği cevaplar incelenerek dayanıklılığı test edilmiş ve sonuçlar ortaya konulmuştur. Ayrıca, farklı ağırlıklı bilyeler için konum ve bobin akımı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler karşılaştırılarak manyetik süspansiyon sisteminin değişen kütleler karşısındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Son olarak, Maxwell 3D Alan Benzetimi programı ile, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, sistemin modeli oluşturulmuş ve farklı akım değerleri için benzetim sonucu elde edilen manyetik kuvvet ile deneysel olarak elde edilen kuvvet karşılaştırılmış ve elde edilen verilerin birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür.

Önceki uygulamaların aksine bu sistemde, anahtarlamalı yükselteç kullanmak yerine daha etkili olması ve anahtarlama esnasında oluşan gürültünün en az seviyeye indirilmesi açısından bir doğrusal yükselteç tasarlanmıştır. Işık kaynağı olarak uygun

dalga boyunda kızılötesi LED'ler kullanılarak konum ölçümleri yapılmış ve sistem sorunsuz bir şekilde çalıştırılarak proje tamamlanmıştır.

## 6.2 Öneriler

Önceki araştırmada [32] değinildiği üzere; ışık kaynağındaki tutarsızlıklar doğrusal olmayan sistemin kontrolünde sorunlara yol açmaktadır. Ana problem olarak direnç - geçişli yükselteçten ve ortamdaki ışıktan kaynaklanan düşük frekans gürültüsü gösterilebilir.

Sistemde oluşabilecek gürültüyü kullanılan ışık modüle edilerek ortadan kaldırılabılır. Modülasyon, bir taşıyıcı sinyal ile bilgi sinyalini birleştirmek yada çok alçak frekanslı sinyallerin, yüksek frekanslı taşıyıcı bir sinyal üzerine bindirilerek taşınması olarak tanımlanabilir. Işığın elektrik akımına çeviren fotodiyotlar genelde dış ortamdan gelen ışığın etkisi altındadır. Fakat modüle edilmiş ışık sinyali ile oluşturulan akım gürültülerden ve dış ortamdan etkilenmez. Böylece konum algılayıcısının çıkışından daha verimli ve doğru bilgiler almak mümkün hale gelir. Işığın modülasyonu; genlik modülasyonu, frekans modülasyonu veya darbe-kod modülasyonu şeklinde yapılabilir.

Bir modülasyon çeşidinin gerçekleştirilebilmesi için ışık sinyalini oluşturan ışık kaynağı ve alıcı fotodiyot sırasının seçilen modülasyon türüne tepkisi ve frekans modülasyonunda ışın kaynağının ve fotodiyot sırasının frekans değişimine göre sinyalin değişimini ifade eden karakteristikleri dikkate alınmalıdır.

Buna ek olarak, bölüm 2'de değinildiği gibi konum algılayıcısının mutlak ışık yoğunluğuna olan bağımlılığından kurtulmak gerekir. Işık kaynağının parlaklığı birinci dereceden, kaynaktan alınan gerilime bağlıdır. Bu yüzden, gerilim kaynağında oluşabilecek ufak sapmalar konum algılayıcısının ayarını olumsuz yönde etkiler. Bu durumu engelleyebilmek için, ışığın yoğunluğu yerine ışığın parlaklığına dayanarak konum ölçümü yapan bir algılayıcı tasarlamak da başka bir alternatif yol olarak ortaya konabilir.

Sonuç olarak, gerçek sistemler modelleme hatalarına ve işletim sürecindeki değişimlere karşı dayanıklı olmalıdır. Geri beslemeli doğrusallaştırmanın zorluklarından biri eksiksiz ve doğru modelleme ve tahmin edilebilir dinamiklere yüksek derecede bağımlı olmasıdır. Gelecekte bu alanda yapılacak bir çalışma doğrusal olmayan kontrol adına yararlı bir çalışma olacaktır.



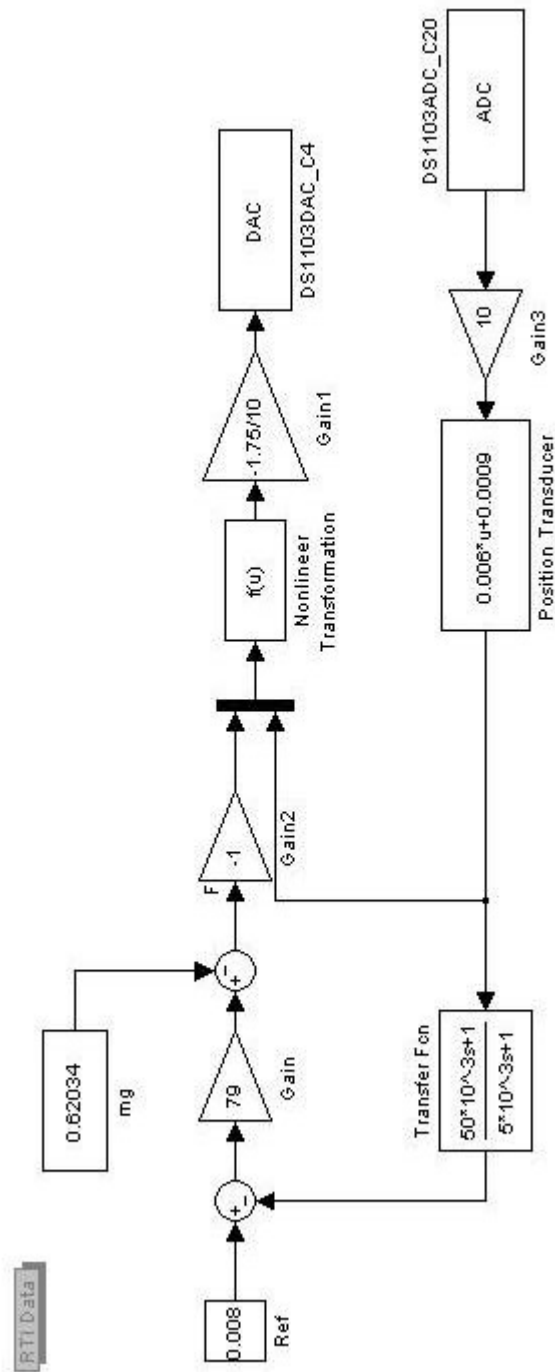
## KAYNAKLAR

- [1] Bingül, Z., “Matlab ve Simulink ile Modelleme/Kontrol II”, *Birsen Yayınevi*, 86-95, (2006).
- [2] Carabelli, S., Mannino, F., Greco, C., “MatDSP: a DSPbased Matlab Toolbox for Rapid Prototyping of Digital Control Systems”, *IFAC Int. Workshop on Algorithm and Architecture for Real-time Control, Ostend, Belgium*, (1995)
- [3] Carabelli, S., Malan, S., “Low Order Controller Design for a Magnetic Ball Levitator”, *Second World Automation Congress, Montpellier, France*, (1996).
- [4] Corban, J., Anthony J., Calise, J.V.R., Prasad, Jeong Hur, and Kim., N., “Flight evaluation of adaptive high-bandwidth control methods for unmanned helicopters.”, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, (2002).
- [5] Haus H. A., and Melcher, J.R., “Electromagnetic Fields and Energy.” *Prentice Hall*, (1989).
- [6] Hunt, L. R., Su, R., and Meyer, G., “Global transformations of nonlinear systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, Jan. (1983).
- [7] Hunt, L. R., Su, R., and Meyer, G., “Design for multiinput nonlinear systems, in Differential Geometric Control Theory”, *Progress in Mathematics, vol. 27. Boston, MA: Birkhauser*, pp. 268–298., (1983).
- [8] Hunt, L. R., Su, R., and Meyer, G., “Application of nonlinear transformations to automatic flight control,” *Automatica, vol. 20, no. 1*, pp. 103–107, (1984).
- [9] Jayawant, B. V., Hodkinson, R. L., Wheeler, A. R., Whorlow, R. J. “Transducers and their influence in the design of magnetically suspended vehicles,” in *Proc. Inst. Elec. Eng. Conf. Contr. Aspects New Forms of Guided Land Transport, I.E.E. Publication 117*, pp. 200–206, Aug. (1974).
- [10] Jayawant, B. V., Hodkinson, R. L., Wheeler, A. R., Whorlow, R. J. “Development of 1-ton magnetically suspended vehicle using controlled dc electromagnets,” *AIAA Paper* ,79-1755, (1979).
- [11] Kadmiry, B., Bergsten, P., and Driankov, D., “Autonomous helicopter control using fuzzy gain scheduling.”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation(ICRA)*, (2001).
- [12] Krauss, L., Shure, J.N. ,”Signal Processing The MathWorks Inc.”, (1992).

- [13] Krupadanam, A.S., Annaswamy, A.M., and Mangoubi, R.S., "A multivariable adaptive control design with applications to autonomous helicopters." *AIAA Journal of Guidance, Navigation, and Control*, (2002).
- [14] Kuo, B.C., "Otomatik Kontrol Sistemleri", Bir, A., 7.Baskı, *Literatür Yayıncılık*, 192-198, 563-591, (2002).
- [15] Lilienkamp K.A., and Trumper, D.L., "Dynamic Signal Analyzer for dSPACE. Precision Motion Control Lab", *MIT, 77 Mass. Ave; Rm.*, 35-39, (2002).
- [16] Musayev, E., "Optoelektronik Devreler ve Sistemler", *Birsen Yayınevi*, 4-12, 77-112, (1999).
- [17] MATLAB User's Manual, *Math works*, (1996).
- [18] Matlab'in çeşitli yayınları, *MathWorkInc.*, internet, <http://www.mathworks.com/archive.html>, (Erişim Tarihi : 02.11.2006).
- [19] Namerikawa, T., Fujita, M., and Smith, R.S., "H $\infty$  control attenuating initial state uncertainties and its application to the magnetic suspension system.", Proceedings of the Eight International Symposium on Magnetic Bearings, (2002).
- [20] Olson, S. M., "Nonlinear compensation of a single degree of freedom magnetic suspension system," Master's thesis, *Dept. Mech. Eng., Massachusetts Inst. Technol.*, Cambridge, MA, (1994).
- [21] Özdaş, M.N., Dinibütün, A.T., Kuzucu, A., "Otomatik Kontrol Temelleri", 2.Baskı, *Birsen Yayınevi*, 270-298, (1998).
- [22] Poovey, T., Holmes, M., and Trumper, D. L., "A kinematically coupled magnetic calibration fixture," *Precision Eng., vol. 16, no. 2*, pp. 103–107, (1994).
- [23] Qu., Z., "Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems". *John Wiley and Sons*, (1998).
- [24] Sarioğlu, M.K., "Otomatik Kontrol I", *Birsen Yayınevi*, 80-103, (2000).
- [25] Sarioğlu, M.K., "Otomatik Kontrol II", *Birsen Yayınevi*, 309-345, 283-309, (1999).
- [26] Schweitzer, G., Bleuler, H., and Traxler, A., "Active Magnetic Bearings". *Zurich, Switzerland: vdf Hochschulverlag AG and ETH*, (1994).
- [27] Slotine, E., and Li, W., "Applied Nonlinear Control", *Prentice-Hall*, (1991).
- [28] Su, R., "On the linear equivalents of nonlinear systems," *Syst. Contr. Lett., vol. 2, no. 1*, pp. 48–52, (1982).

- [29] Traxler, A., Meyer, F., and Murbach, H., “Fast digital control of a magnetic bearing with a microprocessor,” *in Proc. Int. Kongress Mikroelektronik, Munich*, Nov. 13–15, pp. 94–102, (1984).
- [30] Trumper, D.L., *Magnetic Suspension Techniques for Precision Motion Control*. PhD thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, (1990).
- [31] Trumper, D.L., “Nonlinear compensation techniques for magnetic suspension systems”, *NASA Workshop on Aerospace Applications of Magnetic Suspension Technology*, (1990).
- [32] Trumper, D.L., Sanders, J.C., Nguyen, T. H., and Queen, M.A., “Experimental results in nonlinear compensation of a one-degree-of-freedom magnetic suspension.”, *International Symposium on Magnetic Suspension Technology*, (1991).
- [33] Trumper, D.L., Xie, Yi., “Mechatronics Examples For Teaching Modeling, Dynamics, and Control”, *Massachusetts Institute of Technology*, 55-69, (2003).
- [34] Weng., M.C., “Magnetic Suspension and Vibration Control of Flexible Structures for Non-contact Processing.”, PhD thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, (2000).
- [35] Woodson H.H., and Melcher, J.R., “Electromechanical Dynamics - Part I.”, *John Wiley and Sons*, (1968).

EK – A



Manyetik süspansiyon sisteminin Matlab Simulink modeli

## EK – B

### % Durum algılayıcısı kalibrasyon eğrisinin elde edilmesi

```
clc
close all
clear all

t=0:0.5:25;
x=[0.019 0.05 0.097 0.151 0.2 0.249 0.302 0.368 0.435 0.514 0.58 0.672 0.753...
    0.847 0.948 1.034 1.138 1.231 1.335 1.42 1.52 1.645 1.722 1.815 1.895 ...
    1.987 2.092 2.199 2.287 2.385 2.461 2.541 2.632 2.726 2.811 2.871 2.934...
    2.994 3.060 3.128 3.191 3.243 3.289 3.323 3.332 3.392 3.454 3.512 3.582];

hold on
grid
t = t.*10^-3;
j = 1;
plot(x,t)
p=polyfit(x,t,j)
p=polyval(p,x);
plot(x,p,'g')

hold off
```

### % Elektromanyetik kuvvet katsayısı C'nin elde edilmesi

```
figure
a=4;
t=1:12;
for a=1:11
    c(a,:)=((63.3-(a*5+5))*9.8/1000)*(((t+4.358)./1000).^2)./(xo(a,t).^2);
end
c=mean(c);
%c=F*x^2/i^2
t=t./1000;
plot(t,c,'r.')

cdenk=polyfit(t,c,1)
hold on
plot(t,t.*cdenk(1)+cdenk(2))
```

## **% Belirli hava aralıkları değerlerinde kuvvet - akım grafiklerinin elde edilmesi**

```
x=10; %boşuk mm
akim=ort((2+11*(x-1):11+11*(x-1)),1)
kuvvet=15:5:60;
kuvvet=(63.3-kuvvet).*9.8./1000;
plot(kuvvet,akim,'r.')

x=x*10^-3;
xo=0.004358;
F=kuvvet;
c=-0.0057289*x+0.0001735;
i=(x+xo).*sqrt(F./c)+(0.00195*exp((x-0.002)/0.009)-30*(x-0.0007)).*F+450*(x-0.014)^2.*F.^2;
hold on
plot(kuvvet,i)
hold off
```

## **% Düşey ekseninde uygulanan bozucu kuvvetlerin test edilmesinde kullanılan durum algılayıcısı için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesi**

```
clc
close all
clear all

t=-2:1:6;

x=[3.258 3.088 2.585 2.179 1.895 1.418 1.143 0.831 0.648];

hold on
grid
t=t.*10^-3;
j=1;
plot(x,t)
p=polyfit(x,t,j)
p=polyval(p,x);
plot(x,p,'g')

hold off
```

## **ÖZGEÇMİŞ**

1982 yılında Kocaeli, İzmit'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmit'te tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Körfez Fen Lisesi'nden mezun olarak lise öğrenimini tamamladı. 1999 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. Eylül 2004'de Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.