

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKTİF VE PASİF EYLEYİCİLER İLE 1-SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT
HAPTİK ARAYÜZ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Said YILMAZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU

NİSAN 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161511084 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Muhammed Said YILMAZ**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**AKTİF VE PASİF EYLEYİCİLER İLE 1-SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT HAPTİK ARAYÜZ GELİŞTİRİLMESİ**" başlıklı tezi **11.04.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür ÜNVER
Hacettepe Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Muhammed Said Yılmaz

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKTİF VE PASİF EYLEYİCİLER İLE 1-SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT

HAPTİK ARAYÜZ GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed Said YILMAZ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU

Tarih: Nisan 2019

Haptik uygulamaları bilimde ve teknolojide kaydedilen ilerlemeler sayesinde her geçen gün daha çok yaygınlaşmaktadır. Temelde insandaki dokunma duyusu taklit edilmeye çalışıldığı için haptik çıktı kalitesi yapılan uygulamanın en önemli özelliğidir. Haptik cihazlar da bilgisayar ile kontrol edilen elektromekanik cihazlar oldukları için haptik çıktının kalitesi haptik cihazı oluşturan elemanların ve bu elemanları kontrol eden algoritmanın kalitesiyle doğru orantılıdır.

Bu tezde yapılan çalışmada tek serbestlik dereceli haptik cihaz ile arayüz modellemesi yapıldı. Kullanıcının etkileşime girdiği sanal ortamın fiziksel özelliklerini haptik cihaz ile simüle etmek için çalışıldı. İlk olarak kullanıcıda gerçeklik algısını oluşturabilmek için simüle edilecek ortamın fiziksel özelliklerine göre sanal ortam modellemesi yapıldı.

Devamında modellemesi yapılan ortamın simüle etmek için kullanılacak eyleyiciler seçildi. Hibrit eyleyicili sistem için bir aktif ve bir pasif eyleyici seçildi. Haptik cihaz

oluşturmak için eyleyiciler ile bağlantı parçaları birleştirildi. Ölçümler için kullanılacak enkoder ve yük hücresinin kalibrasyon ve analitik modelleri oluşturuldu.

Sonrasında oluşturulan haptik cihaz ile hibrit haptik performans incelemesi yapmak için farklı ortamlar farklı eyleyici kombinasyonları ile simüle edilmiş ve sonuçları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit haptik sistem, Aktif eyleyici, Pasif eyleyici, Gerçek zamanlı kontrol



ABSTRACT

Master of Science Thesis

1-DOF HYBRID HAPTIC INTERFACE DESIGN USING ACTIVE AND PASSIVE ACTUATORS

Muhammed Said YILMAZ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU

Date: April 2019

Haptic applications are becoming more widespread due to the progress in the enabling technologies. Primarily, the aim of haptics is to replicate the tactile sensation of humans. Haptic devices are computer controlled mechatronic devices. Therefore the quality of a haptic display depends on the quality of components that constitute the haptic device as well as the controlling algorithm.

In this thesis, a one-degree-of-freedom haptic device and an interface model has been developed. Firstly, the virtual environment is modeled according to the physical features of the simulated interaction.

Then, an active and a passive actuator are combined with power transmission components and sensors to construct a hybrid haptic device.

Finally, the hybrid haptic device is tested for different environment models in different combinations of actuators to investigate the haptic performance quality of the hybrid actuator approach for haptic device design.

Keywords: Hybrid haptic system, Active actuator, Passive actuator, Real time contro



TEŞEKKÜR

Tez danıőmanım olan Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taçcıoğlu'na bu çalışma süresince bana birçok konuda yol gösterdiği, tavsiye ve yardımlarını esirgemediği için, sevgi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans eğitimim süresince tam burslu olarak çalıőmalarımı yaptığım TOBB ETÜ' ye teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİL LİSTESİ | xi |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xii |
| KISALTMALAR | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ | xiv |
| RESİM LİSTESİ | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Anatomi-Psikoloji-Haptik | 2 |
| 1.2. Haptik Teknoloji Uygulamaları..... | 3 |
| 1.3. Haptik Cihaz Tasarımı ve Çeşitleri | 3 |
| 1.3.1. Empedans tipi haptik cihazlar | 3 |
| 1.3.2. Admitans tipi haptik cihazlar | 4 |
| 1.3.3. Eyleyici tipleri ve uygulama yöntemleri | 5 |
| 1.3.4. Hibrit haptik sistemler..... | 9 |
| 1.4. Literatür Sonuçları ve Çalışmada İzlenecek Yol..... | 17 |
| 2. TEK SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT HAPTİK ARAYÜZ MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE ANALATİK OLARAK İNCELENMESİ | 18 |
| 2.1. Haptik Arayüz Modeli | 18 |
| 2.2. Ortam Modeli ve Kontrol Yöntemi | 19 |
| 3. DENEY DÜZENEGİ VE DENEY METODU | 23 |
| 3.1. Deneysel Düzenek ve Bileşenleri | 23 |
| 3.1.1. Aktif eyleyici..... | 24 |
| 3.1.2. Pasif eyleyici | 25 |
| 3.1.3. Enkoder | 25 |
| 3.1.4. Yük hücresi | 26 |
| 3.1.5. Güç iletim elemanları..... | 27 |
| 3.2. Deneysel Düzeneginin Oluşturulması | 28 |
| 3.3. Deneysel Metodu | 31 |
| 4. TEK SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT HAPTİK ARAYÜZÜN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ | 35 |
| 4.1. Serbest Hareket Modelinin Haptik Cihaz Üzerinde Simüle Edilmesi..... | 35 |
| 4.2. Katı Duvar Modelinin Haptik Cihaz Üzerinde Simüle Edilmesi | 37 |
| 4.2.1. Z-Bandı incelemesi | 37 |
| 4.2.2. $k=20$ Nm/rad, $b=0.1$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi | 39 |
| 4.2.3. $k=100$ Nm/rad, $b=0.3$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.4. $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi..... | 41 |
| 5. SONUÇLAR | 43 |
| KAYNAKLAR..... | 47 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 52 |



ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| Şekil 2.1 : Haptik çevrim modelinin şematik gösterimi..... | 18 |
| Şekil 2.2 : Sanal ortam modeli | 19 |
| Şekil 3.1 : MR sıvılı frenin 0-5 aralığı ölçümü | 25 |
| Şekil 4.1 : Serbest hareket modeli haptik performans grafiği | 36 |
| Şekil 4.2 : Z-bandı deneysel incelemesi..... | 38 |
| Şekil 4.3 : $k=20$ Nm/rad, $b=0,1$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-tork grafiği | 39 |
| Şekil 4.4 : $k=20$ Nm/rad, $b=0,1$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği..... | 40 |
| Şekil 4.5 : $k=100$ Nm/rad, $b=0,3$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği..... | 40 |
| Şekil 4.6 : $k=100$ Nm/rad, $b=0,3$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği..... | 41 |
| Şekil 4.7 : $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-tork grafiği..... | 42 |
| Şekil 4.8 : $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği..... | 42 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 3.1 : Aktif eyleyicinin özellikleri | 24 |
| Çizelge 3.2 : Sürücü özellikleri | 24 |
| Çizelge 3.3 : Redüktör özellikleri | 24 |
| Çizelge 3.4 : Pasif eyleyici özellikleri | 25 |
| Çizelge 3.5 : Kullanılan enkoder özellikleri | 26 |
| Çizelge 3.6 : Güç iletim elemanları ve özellikleri..... | 27 |
| Çizelge 3.7 : Alternatif akım güç kaynağı ve MR fren kontrol kiti | 30 |
| Çizelge 3.8 : Yükseltici ve yük hücresinin teknik özellikleri | 30 |
| Çizelge 3.9 : NI 6221 kontrol kartının teknik özellikleri | 31 |

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|---------------------|
| YH | Yük hücresi |
| K | Kaplin |
| T | Tutamaç |
| SO | Sanal ortam |
| emk | Elektromotor kuvvet |
| sf | Örnekleme frekansı |

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

Simgeler Açıklama

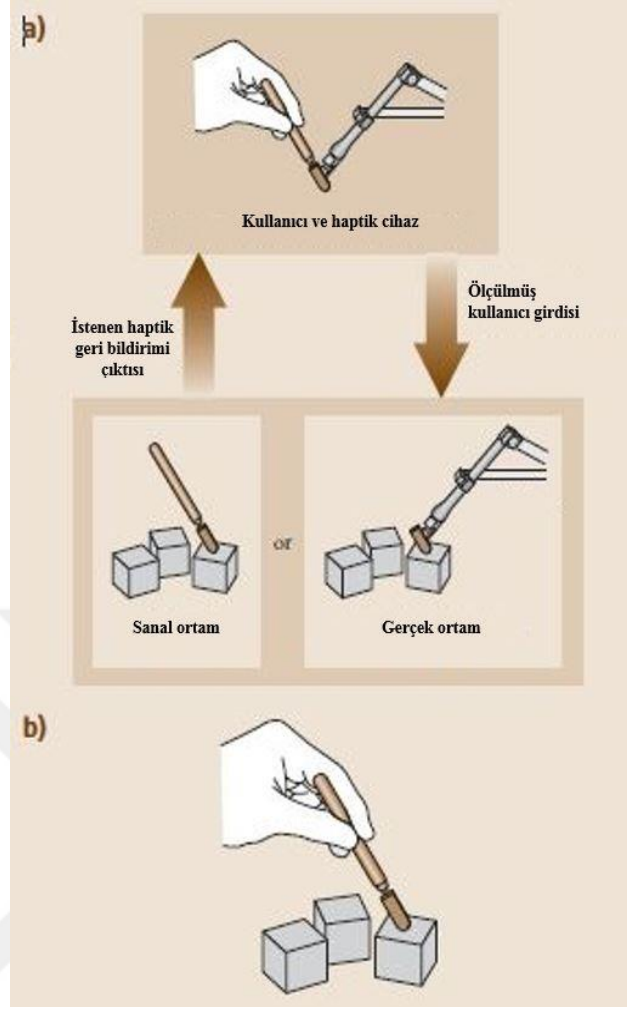
| | |
|-----------------|--|
| $P_{1,2,3}$ | Güç iletim elemanları |
| J | Atalet momenti (kgm^2) |
| $m_{1,2,3}$ | Güç iletim elemanlarının kütleleri(kg) |
| r_i | Kaplin iç yarıçapı (m) |
| r_d | Kaplin dış yarıçapı (m) |
| r | Yarıçap (m) |
| L | Uzunluk (m) |
| R | Dönme yarıçapı (m) |
| a, h | Yük hücresinin ölçüleri (m) |
| N | Doğru akım motorundaki redüktör oranı |
| g | Yerçekimi ivmesi (m/s^2) |
| m_{YH} | Yük hücresi ölçümü (kg) |
| T_K | Kullanıcı torku (Nm) |
| s | Sürtünme |
| R_K | Kullanıcının dönme eksenine uzaklığı (m) |
| b | Sönüm oranı (Nms/rad) |
| k | Yay sabiti (Nm/rad) |
| θ | Açısal konum (rad) |
| $\dot{\theta}$ | Açısal hız (rad/s) |
| $\ddot{\theta}$ | Açısal hız (rad/s ²) |
| F | Sanal ortam empedansı (Nm) |

RESİM LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Resim 1.1 : Haptik arayüzdeki etkileşim döngüsü..... | 2 |
| Resim 1.2 : Empedans tipi haptik cihaz “Phantom Premium” [8]..... | 3 |
| Resim 1.3 : Admitans tipi haptik cihaz “Haptik Master” [10]..... | 4 |
| Resim 1.4 : Aktif eyleyici – Dunkermotoren doğru akım motoru [11] | 6 |
| Resim 1.5 : Pasif eyleyici – LORD MR sıvılı fren [21] | 7 |
| Resim 1.6 : MR sıvı a) sıvının yapısı 1-ferromanyetik parçacıklar, 2-taşıyıcı sıvı, 3- manyetik olmayan katman; b) homojen manyetik alan etkisindeki form [22] | 8 |
| Resim 1.7 : MR sıvılı fren [21] | 9 |
| Resim 1.8 : MR fren ve DC motor empedans karşılaştırması [13] | 10 |
| Resim 3.1 : Hibrit haptik arayüz ve sistem bileşenleri..... | 23 |
| Resim 3.2 : Haptik deney düzeneğini kontrol etmek için kullanılan elektronik donanım elemanları..... | 29 |
| Resim 3.3 : (a)-NI 6221 kontrol kartı (b)-NI 6221 konektör bloğu..... | 31 |

1. GİRİŞ

Haptik Yunancadaki “haptikós” kelimesinden gelmektedir. Anlamı dokunma hissi ile ilgili olarak bilinmektedir. Psikoloji ve sinir bilimi literatüründe, algılama ve manipüle etme esnasında kinestezik ve dokunsal reseptörler aracılığıyla oluşan dokunma hissi ile ilgili çalışmalar haptik başlığı altındadır. Robotik ve sanal gerçeklik literatüründe ise haptik; mekatronik cihazlar vasıtasıyla insan ile gerçek veya sanal ortam arasındaki simüle edilmiş dokunma etkileşimleri olarak geçmektedir. Yani haptik, kullanıcıda dokunma hissi oluşturmak ile ilgilenen bilimsel ve teknolojik çalışmalardır. Mekatronik cihazlar vasıtasıyla simüle edilmiş ya da uzaktaki bir ortamda çalışan kullanıcının performansı artırılmalıdır. Bu ihtiyaçtan ileri gelen haptik arayüz tasarımları gerçek ortamdaki hareket ettirme ya da kavrama sırasında oluşan dokunma hissini bilgisayar kontrollü mekatronik cihazlar aracılığı ile taklit edilmesini ya da artırılmasını amaçlamaktadır. Öyle ki kullanıcıda doğrudan gerçek bir ortamla etkileşim hissi oluşmalıdır. Bu arayüzler sensör ve eyleyicilerden oluşan haptik cihaz ile kullanıcı girdilerini alıp bu girdiler doğrultusunda oluşturulacak haptik geri bildirim kontrol eden yazılımı içeren bilgisayardan oluşur. İlk olarak haptik cihaz kullanıcı tarafından gelen girdileri algılar. Bu girdiler konum, konumun türevleri, kuvvet vb. olabilir. Sonrasında bu girdiler sanal ya da uzak ortama uygulanır. Bu girdilerin sanal ortam üzerindeki etkisi model üzerinde hesaplanır. Bu etkiden kaynaklı oluşacak ve kullanıcıya yansıtılacak tepki haptik geri bildirim algoritmasında hesaplanır. Uzak ortam durumunda ise manipülatör kullanıcı girdilerine göre takip etmeye çalışır ve gerçek ortamla etkileşime geçtiğinde kullanıcıya ileteceği haptik geri bildirim kaydeder veya tahmin eder. Son olarak hesapladığı ya da kaydettiği bilgilere göre haptik cihaz üzerindeki eyleyiciler aracılığıyla dokunma hissi fiziksel olarak kullanıcıya iletilir [1]. Haptik arayüz döngüsünün temsili Resim 1.1’de verilmiştir.



Resim 1.1 : Haptik arayüzdeki etkileşim döngüsü

1.1. Anatomi-Psikoloji-Haptik

İnsan sinir sisteminin iki fonksiyonu haptik işlemde önemli role sahiptir. İlki hareket ya da kuvvetlerin kaslar, tendonlar ve eklemler üzerinden algılanması; ikincisi ise dokunma anında ciltte oluşan deformasyon hissidir [2].

1980'lerde başlayan çalışmaların Leaderman ve Klatzky kalıplaşmış el hareketlerine keşif yöntemleri adını vermişlerdir. Gözleri kapalı deneklerin ellerine farklı objeler verilmiş ve tepkileri gözlenmiştir. Verilen objelerin fiziksel özelliklerine göre deneklerin kullanacağı keşif yöntemlerinin tahmin edilebilir olduğu görülmüştür. Deneyler sonucunda en optimal 8 keşif yöntemini seçmişlerdir. Her ne kadar mevcut ileri teknolojik haptik cihazlar bu yöntemlerdeki dokunma hissine çok uzak olsa da deneylerden elde edilen veriler haptik cihaz tasarımı kriterlerini belirleme önemli rol oynamaktadır [3],[4],[5].

1.2.Haptik Teknoloji Uygulamaları

En yaygın kullanılan haptik cihazlar günlük hayatımızda çokça karşılaştığımız titreşim yoluyla haptik geri bildirim sunan cihazlardır. Video oyun kontrolcülerinde veya cep telefonlarındaki titreşim modülleri basit haptik geri bildirimler tasarlanmıştır. Medikal mekatronik cihazlar, bilgisayar destekli tasarım programları, fiziksel engelli hastalar için rehabilitasyon uygulamaları, otomotiv teknolojileri gibi birçok pragmatik çalışma alanında haptik teknolojiler ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [1].

1.3.Haptik Cihaz Tasarımı ve Çeşitleri

Yaygın olarak tercih edilen iki adet haptik cihaz türü bulunmaktadır. Bunlardan ilki admitans cihazlardır. Admitans cihazlar önce kullanıcının uyguladığı kuvveti algılar, sonrasında bu kuvvet doğrultusunda sanal ortamdaki obje ya da yüzeyde oluşacak deformasyonu hesaplayıp kullanıcının hareketini hesapladığı değere göre haptik cihaz vasıtasıyla sınırlandırır.

Buna karşılık ikinci tip empedans tipi haptik cihazlar önce kullanıcının konumunu algılar. Sonrasında bu konum verisi ile sanal ortamda simüle edilmiş obje ya da yüzey modeline göre hesapladığı uygun davranışı kullanıcıya uygular [1].

1.3.1. Empedans tipi haptik cihazlar

Bu tip cihazlar iki yönlü kontrol edilebilen, düşük sürtünme ve atalete sahip, kuvvet kaynaklı eyleyicilerden oluşurlar. Robotik literatüründe yaygın olarak bilinen empedans tipi haptik cihaz Phantom Premium modelidir [6], [7]. Phantom Premium Resim 1.2’de verilmiştir[8].



Resim 1.2 : Empedans tipi haptik cihaz “Phantom Premium” [8]

Empedans tipi haptik cihazlarda haptik çıktı kullanıcının sisteme uyguladığı konum ya da konum türevi girdilere göre hesaplanan kuvvettir.

$$F = kx + bv \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'e göre simüle edilecek sanal ortamın sönüm ve yay katsayıları belirlenmiştir. Kullanıcıdan gelecek konum ve/veya konum türevi girdilere göre hesaplanan kuvvet haptik çıktı olarak kullanıcıya iletilir[9]. İki yönlü kontrol edilebilen düşük atalet ve sürtünmeli elemanlardan oluşan yapıları gereği düşük kuvvet geribildirimini istenen ortamları rahatlıkla simüle edebilmektedirler. Serbest uzay simüle edilebilecek ortamlara örnek olarak verilebilir. Öte yandan düşük atalet durumlarının rahatlıkla sergilemelerine olanak sağlayan yapılarından dolayı sergilenebilen kuvvet bandının üst limiti çok yüksek değildir[10]. Düşük empedans çıktısı kolaylıkla sergilenebildiği için bu tip haptik cihazlar için performansı sergileyebildiği maksimum empedans değeri ölçülerek belirlenir[11].

1.3.2. Admitans tipi haptik cihazlar

Admitans tipi haptik cihazlar iki yönlü kullanım özelliği olmaması ve hız temelli eyleyiciler barındırmalarıyla bilinirler. Hız kontrolü yüksek bant genişliğine sahip düşük seviyeli kontrolcü ile yapılır ve dışarıdan uygulanan kuvvetlerden bağımsız olduğu varsayımı kabul edilir. Ticari olarak ulaşılabilen bu tip haptik cihazlardan birisi Haptic-Master'dır [12]. "Haptic Master" resim 1.3.2'de verilmiştir[13].



Resim 1.3 : Admitans tipi haptik cihaz "Haptic Master" [10]

Admitans veya empedans tipi uygulama seçiminin yazılım ve donanım tasarımı üzerine etkisi ile alakalı etkili çıkarımlar yapılmıştır. Birçok nedenden dolayı günümüzdeki haptik cihaz çalışmalarının çoğunluğu empedans tipi ile alakalıdır. Çünkü mevcut sistemlerin çoğu empedans tipidir, maliyet ve uzaysal sınırlamalar bunu mümkün kılmaktadır [1].

Admitans tipi haptik cihazlarda haptik çıktı kullanıcının sisteme uyguladığı kuvvete göre hesaplanan konum veya konum türevleri cinsindedir.

$$\ddot{x}_d = \frac{f_h - b\dot{x}_d - kx_d}{m}, x_d = \iint \ddot{x}_d dt \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'ye göre f_h kullanıcının sisteme uyguladığı kuvvet \ddot{x}_d , \dot{x}_d ve x_d ise uygulanan kuvvete göre sistemin hareket etmesini istenen konum hız ve ivme değerleridir.

İki yönlü kullanıma uygun olmayan ve yüksek atalet ve sürtünmeye sahip elemanlardan oluşan yapıları gereği sert kontakt veya katı duvar simülasyonlarında başarılıdır. Öte yandan yüksek ataletli yapıları sayesinde sergilenebilen empedans bandının üst limiti yüksek iken düşük empedans simülasyonlarında başarı oranları düşüktür. Admitans tipi haptik cihaz uygulamalarına dışçılık eğitimleri, dış iskelet uygulamaları veya robotik rehabilitasyon çalışmaları örnek olarak verilebilir[10]. Bu sebepten admitans tipi haptik cihaz performansı kararlı bir şekilde sergileyebildiği minimum empedans değeri ile ölçülür[11]. Empedans ve admitans tipi haptik cihazların çalışma prensipleri ile ilgili daha detaylı bilgiler ilerleyen kısımlarda incelenmiştir.

1.3.3. Eyleyici tipleri ve uygulama yöntemleri

Haptik cihaz tasarımı sırasında; kullanıcıya yüksek doğrulukta haptik hissiyat simüle edebilmek için mekanizma tasarımı büyük önem taşır. Arzu edilen mekanizma tasarımında efektif bir şekilde insan uzuvlarıyla uyumlu çalışabilecek açık çevrim kuvvet kontrolü; düşük atalet, yüksek direngenlik ve uygun kinematik özelliklere bağlıdır. Mekanizma ağırlığı minimize edilmeli ve kullanıcı sanal ortamla etkileşime geçtiğinde bu ağırlık sanal ortamdaki objenin ağırlığı ya da ataleti olarak kullanıcıya iletilmelidir.

Haptik cihazlar kullanıcıya uygun haptik hissiyatı aktarabilmek amacıyla bilgisayar tarafından kontrol edilen eyleyiciler barındırırlar. Bu yüzden de haptik cihazın performansı eyleyicilerin performansına, eyleyiciler arasındaki mekanik güç aktarım elemanlarına ve haptik etkileşim noktasına bağlıdır.

Eyleyici ve mekanik güç aktarım elemanlarında olması istenen en önemli özellikler; düşük atalet, düşük sürtünme, düşük tork dalgalanması, iki yönlü kuvvet elemanı olarak kullanım ve düşük mekanik boşluktur [1].

Aktif eyleyiciler

Haptik cihazlar tasarımlarında kullanılan doğru akım motorları ya da servo motorlar aktif eyleyiciler olarak kabul edilirler. Haptik geri bildirim ile ilgili yapılan çalışmalar ve piyasada mevcut olan haptik geri bildirim özelliği taşıyan ürünler incelendiğinde, kullanılan eyleyici tipi büyük çoğunlukla aktif eyleyicilerdir.

Aktif eyleyicilerin daha yaygın olarak tercih edilmesinin sebeplerinden birisi ve en önemlisi iki yönlü kullanılabilir (back drivable) olmalarıdır. Diğer sebepler ise hızlı tepki süreleri, kaliteli kontrol performanslarının olması ve marketteki ulaşılabilir ürün yelpazesinin çok geniş olmasıdır.



Resim 1.4 : Aktif eyleyici – Dunkermotoren doğru akım motoru [11]

Resim 1.4’te görülen doğru akım motoru aktif eyleyicilere bir örnek teşkil etmektedir[14]. Yukarıda bahsedilen özelliklerinden dolayı sıkça tercih edilmelerine rağmen kararlılık ve kontrol döngüsünün kazançları arasında bir uyum(compromise) olmak zorundadır [15]. Yani aktif eyleyicilerden oluşan herhangi bir haptik cihazın sergileyebileceği dinamik empedansı sınırlıdır [16]. Buradan yola çıkan Colgate ve Brown ulaşılabilir dinamik empedans sınırını temsil eden “Z-width” konsepti ile beraber buradan kaynaklanan, performansı etkileyen arayüz dinamikleri, sensör ölçümleri ve örnekleme frekansı gibi faktörleri ortaya atmışlardır [17].

Haptik etkileşimde kararlılığı elde edebilmek için birçok araştırmacı iki farklı kontrol metodu üzerine yoğunlaşmıştır. İlkinde Colgate ve arkadaşları sanal eşleme yaklaşımını ortaya atmışlardır. Bu yaklaşım pasif kullanıcı ve ortamlar için ulaşılabilir empedans bandını sınırlamıştır [18]. Adams ve Hannaford ise bu yaklaşımda optimum sanal eşleme parametrelerini belirlemek için iki kapılı ağ teorisini kullanmışlardır [19]. İkinci metotta ise Hannaford, Kim ve Ryu pasiflik tabanlı kontrol şemalarını kullanıcıya geri iletilecek enerjiyi kullanıcıdan gelen enerjiden daha fazla olmayacak şekilde limitleyen pasiflik kontrolcüsü olarak kullanmışlardır. Bu metot kararlılığı garanti altına almak için etkili olmuştur [20], [21].

Pasif eyleyiciler

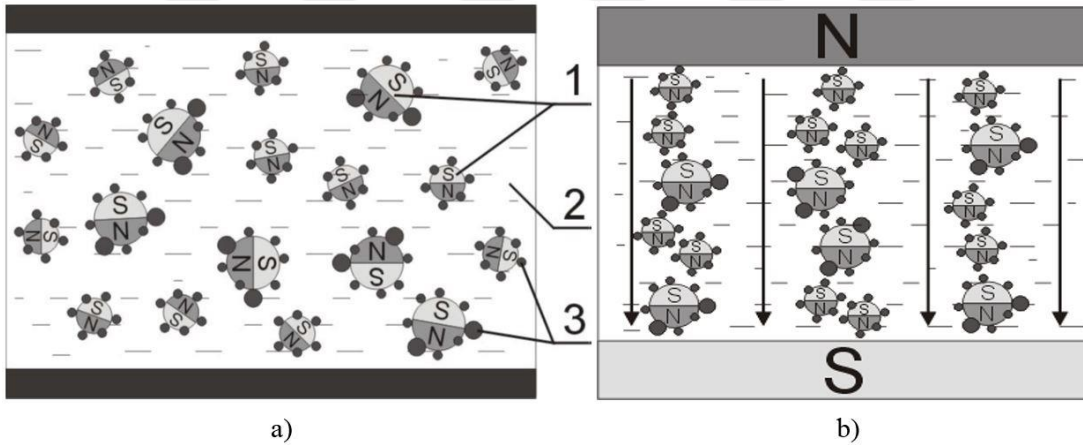
Aktif eyleyiciler ile oluşturulan haptik sistemde kararlılığı ve performansı artırmak adına geliştirilen pasiflik tabanlı kontrol metotlarının yerine doğrudan pasif eyleyiciler kullanılabilir. Reolojik frenler, hidrolik sönümleyiciler veya manyetik tozlu frenler bu tip eyleyicilerdendir [22]. Pasif eyleyiciler doğası gereği kararlı ve güvenilir eyleyicilerdir. Pasif eyleyici olarak kullanılan MR sıvılı fren doğru akım motoruyla karşılaştırıldığında daha az güç kullanımıyla daha yüksek tork-kütle oranına sahiptir. Ayrıca motorlarla kıyaslandığında statik olarak daha yüksek empedans değerlerine ulaşılabilir [16]. Ancak pasif eyleyiciler kullanıcıya enerji iletmedikleri için haptik geri bildirim performansları düşüktür [23]. Pasif eyleyici olarak kullanılan MR sıvılı fren Resim 1.5'te verilmiştir [24].



Resim 1.5 : Pasif eyleyici – LORD MR sıvılı fren [21]

MR sıvılı frenler

Manyetoreolojik(MR) sıvı ferromanyetik parçacıklar ve bu parçacıkları taşıyan sıvıdan oluşur. Bu sıvının özellikleri dışarıdan uygulanan manyetik alan içerisinde değişmektedir. Manyetik alan etkisiyle MR sıvının kıvamı yoğun akışkandan katıya doğru değişir. Manyetik alan uygulandığında ferromanyetik parçacıklar manyetik alan çizgileriyle aynı doğrultuda dizilerek zincirler oluştururlar. Manyetik alan ortadan kalktığında ise MR sıvı yine başlangıç özelliklerine geri döner. Bu etkileşim mikro saniyeler içinde gerçekleşir. Daha güçlü manyetik alan uygulanması daha güçlü ferromanyetik zincirler oluşmasını sağlar böylece daha yüksek sıvı viskozitesi elde edilecektir. Bu sayede ferromanyetik parçacık içeren sıvının viskozitesi dışarıdan uygulanan manyetik alan ile kontrol edilmiştir. Manyetik alan uygulanan MR sıvının davranışı Resim 1.6 verilmiştir[25].



Resim 1.6 : MR sıvı a) sıvının yapısı 1-ferromanyetik parçacıklar, 2-taşıyıcı sıvı, 3-manyetik olmayan katman; b) homojen manyetik alan etkisindeki form [22]

MR sıvı viskozitesinin manyetik alan etkisiyle değişimi Denklem 1.1'de verilen Bingham denklemi ile açıklanmıştır[26].

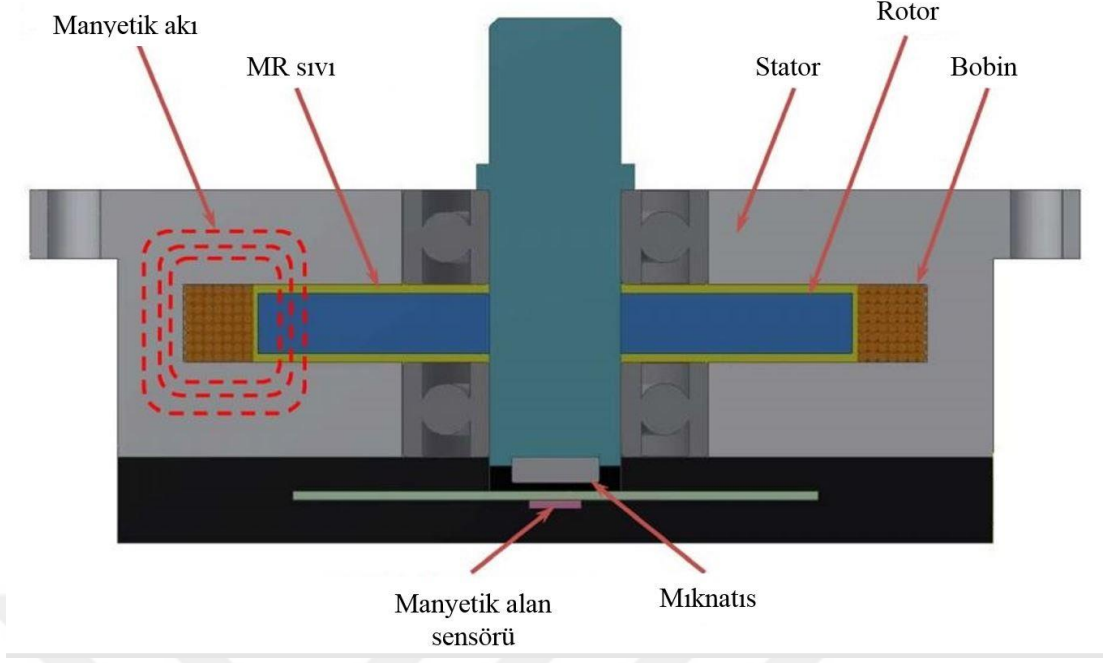
$$\tau = \tau_0(B) + \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1.1)$$

τ : kesme kuvveti

$\tau_0(B)$: uygulanan B manyetik alanı etkisiyle oluşan akma kuvveti

μ : plastik viskozite

γ : kesme gerinimi



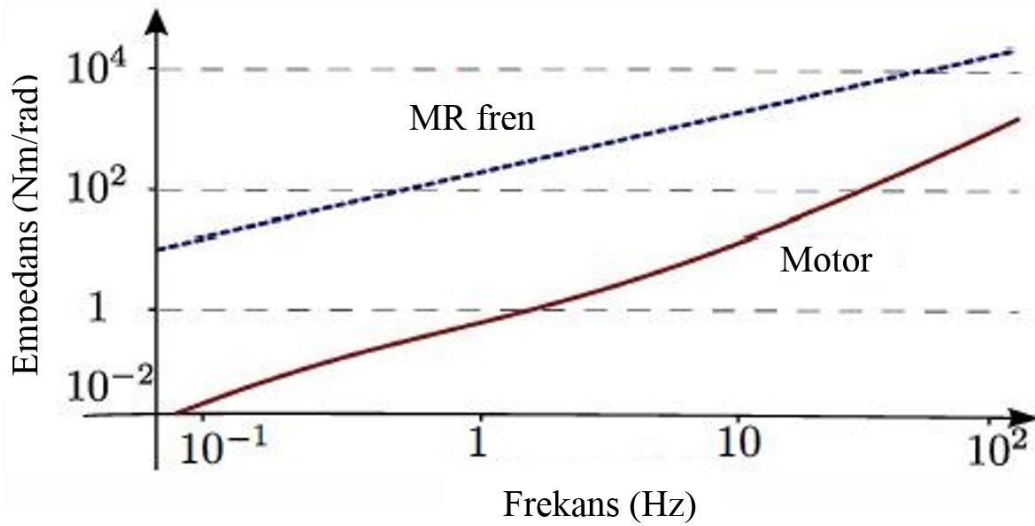
Resim 1.7 : MR sıvılı fren [21]

Resim 1.7’de [24] görülen fren yapısında sabit olan stator ile çıkış milinin bağlı rotor arasında bir kanal bulunur. Bu kanalda MR sıvı bulunur. Rotorun etrafındaki bobinler ile manyetik alan oluşturulmaktadır. Manyetik alanın oluşturacak akım kontrol edildiği için viskozite, dolayısıyla frenin torku kontrol edilmiş olacaktır.

1.3.4. Hibrit haptik sistemler

Önceki bölümde bahsedilen eyleyici tiplerinin özellikleri göz önüne alındığında aktif ve pasif eyleyicileri bir arada barındıran hibrit sistem yaklaşımı eyleyicilerin ayrı ayrı kullanıldığı durumlarda karşılaşılan erişilebilir maksimum dinamik empedans bandı ve kararlılık problemlerine çözüm olabilmektedir [22]. Fauteux ve arkadaşlarının [27] yaptıkları çalışmaya göre eyleyicilerin paralel bağlandıkları durumda, yüksek tork kapasiteli pasif eyleyici düşük tork kapasiteli aktif eyleyici kullanılabilmesine imkan sağladığı için haptik simülasyonun şeffaflığı arttırabilmiştir.

Rossa ve Lozada [16] MR sıvılı fren ve doğru akım motorundan oluşturulmuş hibrit haptik cihazdaki eyleyicilerin empedans üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için yapılan bir çalışmanın sonuçlarını incelemişlerdir. Bu çalışma MR frenin doğru akım motoruna göre daha düşük güç tüketimi ile daha yüksek tork-hacim oranı sağladığını göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu Resim 1.8’de verilmiştir.



Resim 1.8 : MR fren ve DC motor empedans karşılaştırması [13]

Rossa ve Lozada [16] yaptıkları çalışmada aktif ve pasif eyleyicilerden oluşan hibrit haptik cihaz için geliştirilen istikrarlı kontrol metodu sonuçlarına göre frenler doğası gereği kararlıyken aktif cihazların empedans özellikleri sınırlıdır. Frenin fiziksel sönümü simüle edilebildiği durumda kararlılık artmıştır. Sonuçlara göre aktif ve pasif eyleyiciler dinamik empedans ve pasiflik elde etmek için birlikte kullandıklarında sertlik artmıştır. Geliştirdikleri enerji bağlayıcı algoritma ile sistemin kararlılığını garanti altına alınmıştır. Bu algoritmayı 1-serbestlik dereceli hibrit haptik cihazda kararsız ve aktif sanal bir ortamda test ederek sergilenebilir sertliğin kullandıkları kontrol metoduyla geliştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca bu algoritma sanal ortam modelinden bağımsız olduğu için doğrusal olmayan dengesiz sanal ortamı da modelleyebilmiştir.

Rossa ve Micaelli [22] yaptıkları başka bir çalışmada MR fren ve DC motordan oluşan sistemde eyleyiciler birbirine serbest tekerlek kavraması (overrunning clutch) ile bağlanmıştır. Bu sayede motor ve fren birbirlerini etkilemeden empedans oluşturabilmiştir. Yani fren seçilen yönde devamlı olarak empedans oluştururken motorun oluşturacağı empedans fren tarafından sönümlenmeden aktarılabilir. Sonuç olarak kuvvetli bir fren ile küçük bir motor birlikte kullanılmış ve bu sayede güç tüketimi azalırken daha geniş bantta dinamik empedans elde edilebilmiştir. Kararlılık ve kullanıcı güvenliği garanti altına alınmış, ayrıca bağımsız kontrol edilebilirliği eyleyicilerin farklı haptik uygulamalar için kullanıma açık olmasını sağlamıştır.

Kwon ve An [28] yaptıkları çalışmada haptik çıktının pasifliği için sönüm ve motoru birlikte kullanmıştır. Ancak sabit sönüm kullanıldığında serbest hareketin sağlanabilmesi için motor önce sönüm iptali için kullanılmak zorunda kalmaktadır. Kontrol edilebilir sönüm yaklaşımı ile motor sönüm iptali için kullanılmadığından kararlılık ve performans gelişmiştir. Kontrol edilebilir fiziksel sönüm yaklaşımının sergilenebilen empedans performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir, bu yaklaşım ve motor birlikte kullanıldığı haptik çıktının daha kararlı olduğu ve sergilenebilir dinamik empedans bandının geliştiği görülmüştür.

Rossa ve Anastassova [29] yaptıkları çalışmada fren ve motordan oluşan hibrit haptik ara yüzler enerji yayarken ya da depolarken farklı tork ve sertlik özellikleri göstermiştir. Bu cihazların simüle ettiği elastiklik algısındaki değişime neden olacak asimetri eşik değerlerini belirlemek için çalışmışlardır. Bunun için kullanıcılar kontrol edilebilir sertlik veya asimetrik torklu sanal yaylarla etkileşime girmişlerdir. Kullanıcılardan yayalardaki simetriyi ve asimetriyi tanımlamaları istenmiştir. Sonuçlara göre açılma kuvveti sıkışma kuvvetinin %80'inden küçük, tork ise %60'ından küçük olduğunda deneklerin %80'inden fazlası asimetriyi fark etmemiştir. Yani hibrit cihazdaki asimetrik aktif-pasif tork ya da sertlik özellikleri esneklik algısında bozulmaya neden olmamıştır.

Rossa ve arkadaşları [30] geliştirdikleri kontrol metodunda paralel bağlı DC motor ve MR frenden oluşan cihazı kontrol etmek için anlık etkileşim enerjisi kullanmıştır. Bu metot ile etkileşim kuvvetlerinin sayısal analizini birlikte kullanarak iki kontrol değişkeni elde etmişlerdir. Bu kontrol değişkenleri sayesinde aktif ve pasif eyleyicilerin optimal yük dağılımları hesaplanmıştır. Geliştirdikleri metodun tek serbestlik dereceli kuvvet geri besleme cihazı üzerinde yapılan testi metodun sistemi daha reaktif hale getirdiği tespit edilmiştir.

An ve Kwon [31] aktif ve pasif eyleyici içeren haptik ara yüzlerin kararlılık ve performansı hakkında yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalarda, üç farklı haptik ara yüzden bahsedilmektedir. İlki motor içeren aktif sistem, ikincisi fren içeren pasif sistem, üçüncü ise fren ve motor içeren hibrit sistemdir. Çalışmada ilk olarak pasiflik ve Z-bandı konsepti üzerinden hibrit sistemin aktif sistemden kararlılık ve performans olarak daha iyi olduğunu göstermek amaçlanmıştır, sonrasında mutlak kararlılık teoremini kullanarak statik sürtünme sırasında haptik arayüzün asimptotik kararlılık durumlarını gösterilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında önerilen

alternatif haptik arayüzün çok daha kararlı ve yüksek haptik etkileşime sahip olduğu tespit edilmiştir.

An ve Kwon [32] daha sonra yaptıkları bir çalışmada tek serbestlik dereceli motor ve frenlerden oluşan hibrit haptik cihaz tasarımı ve uygulamasında, fren ve motor kullanımının kararlılık ve performans problemi yaşanmadan çeşitli objelerin simüle edilmesine olanak sağladığını tespit etmiştir. Performans çeşitli objeleri simüle edebilme kapasitesinin ölçümüyle belirlenmiştir. Çeşitli sanal ortamlar için kuvvet geri bildirim özelliği olan cihaz hibrit cihazın etkililiğini göstermektedir. Analizlere göre hibrit eyleyicilerin kullanılması iki serbestlik derecesi olduğu durumda da katı gövde modelinin simüle edilmesini mümkün kılmaktadır.

Nam ve Park [33] çok çeşitli haptik çıktıya sahip tek serbestlik dereceli hibrit haptik cihazda şeffaflığın geliştirilmesini incelemiştir. Aktif ve pasif eyleyiciden oluşan ideal hibrit haptik cihazın iki temel özelliği bulunmaktadır. İlki sürtünmeye neden olan parçaların niteliksel ve niceliksel olarak telafi edilerek şeffaflığın geliştirilmesi. İkinci özelliği ise çok çeşitli kuvvet ve torkun geniş çalışma alanına yansıtılabilmesi. Önerilen tasarımın asıl eyleyicisi pasif eyleyici olacaktır çünkü doğası gereği sahip olduğu pasifliği ile eş zamanlı olarak güvenli etkileşim ve kararlı haptik kontrolü mümkün kılmaktadır. Aktif eyleyici ise geri çağırıcı kuvvetleri sağlayacak ve frenin kapasitesini aşan durumlarda ek kuvvet ihtiyacını karşılayacaktır.

Hannaford ve Ryu [20] çeşitli çalışma koşulları altında işleyen haptik arayüzün kararlı temasından emin olmak için enerji tabanlı kontrol metodu geliştirmişlerdir. Sistemin kararlılığı pasifliğin zaman alanı tanımıyla analiz edilmiştir. Gerçek zamanlı yazılımla enerji çıkışı ölçülmektedir. Aktif davranış her zaman pasiflik gözlemcisinin negatif değeri ile belirtilmektedir. Adaptif yutucu eleman olarak tanımlanan pasiflik kontrolcüsü ise pasiflik gözlemcisi tarafından her örnekleme anında ölçülen net enerji çıkışını absorbe etmektedir[20].

Gupta ve Malley'e [34] göre kullanıcı gerçek dinamik sistemle etkileşim sırasında istenen hareketi elde etmek için gerçek zamanlı olarak görsel ve haptik geri bildirimlere güvenmektedir. Hareketsiz bir dinamik sistem üzerinde Fitts tipi hedefleme görevindeki insan performansı incelenmiştir. Simüle edilen sistemin dinamik davranışından gelen haptik geri bildirim ile çeşitli aktif ve pasif kontrol modları aynı zamanda sergilenirken, kullanıcı performansı vuruş sayısı ve hedefler

arası vuruş zamanı ölçülerek hesaplanmıştır. Sonuçlara göre dinamik sistem manipülasyonu sırasında uygulanan aktif ve pasif yardımcı modlar rehabilitasyon uygulamaları için faydalı olmuştur. Kullanıcı performansı aktif ve pasif yardım modları ile geliştirilebilecektir.

Gosline ve arkadaşları [35] geliştirdikleri yöntem ile programlanabilir sönüm elemanı kullanarak minimum enerji yayılımı olan haptik cihaza ulaşmıştır. Haptik arayüzden kullanıcıya istenmeyen enerji aktarımını önlemek için programlanabilir Eddy akımlı viskoz sönüm kullanılmıştır. Bu metot ile zaman ekseninde pasiflik kontrol edilmiştir. Pasiflik gözlemcisi sistemdeki enerji çıkışını takip etmekte ve sönüm elemanı da sanal ortamdan aktarılarak pasifliği bozabilecek fazla enerjiyi sönümlemektedir.

Edward ve Schenkel [15] sürekli çalışan bir düzenek ve ayrık zamanlı kontrolcüden oluşan sistemin pasifliğini incelemiştir. Robot kontrolü ve kuvvet geri bildiren haptik arayüzler için kararlılık şartları ortaya çıkarılmıştır. Pasiflik için önemli şartlar küçük kazanç durumu ile, gerekli şartlar ise Perseval teoreminin uygulanması ve frekans tabanlı bir dizi manipülasyon ile sağlanmıştır. Tek serbestlik dereceli haptik arayüzde sanal duvar uygulaması yüksek fiziksel sönüm oranıyla test edilmiştir[15].

Colgate ve Brown [17] çalışmalarında haptik arayüz performansını incelemiştir. Performansın önemli ölçütünü ulaşılabilen Z-bandı ve bu bandın pasiflik kriterini sağlamaktadır. Z-bandını etkileyen faktörler; örnekleme ve kaydetme, arayüzün iç dinamikleri, konum sensörü örnekleme ve hız verisinin filtrelenmesidir. Yaptıkları deneyler ile Z-bandını etkileyen faktörler incelenmiş, elde edilen sonuçlara göre sistemin iç sönümü Z-bandı üzerinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır.

Cutkosky ve Gillespie [36] titreşimsiz sanal katı duvara uygulamak için etkili bir kontrol algoritması geliştirmiştir. Kontrolcü, haptik cihaz ve kullanıcının kuvvetine göre tasarlanmış duvar modelinden oluşmaktadır. Deneysel eklemli yapı dinamikleri ve temas olarak kararsızlığı ile istemli kontrol arasındaki gözlemlenen uyumsuzluğu temel olarak parmağı ikinci derece empedans olarak modellemiştir. Kararsızlığa neden olan asenkron duvar açık/kapalı değişim zamanları ve örnekleme süreleri kontrol edilerek elimine edilmiştir[36].

Zaad ve Salcudean [37] çalışmalarında empedans modelleri için tasarlanmış alışılmış dört kanallı iki yönlü kontrol mimarisi admitans ve empedans tipi efendi-köle tele operasyon manipülatörlerine uyarlanmıştır. Her iki tip içinde ideal koşullar altında

mükemmel şeffaflığı sağlayacak kontrol parametreleri bulunmuştur. Kararlılık, performans ve dayanıklılık analizleri genel mimari ve 2 kanallı mimari için yapılmıştır. Analizler pasiflik tabanlı Llewellyn iki kapılı ağ mutlak kararlılık kriterine ve kullanıcıya aktarılan empedans bandına bağlı olarak yapılmıştır. Bu incelemeden elde ettikleri sonuçlar, kontrol mimarisi ve parametre seçimi için kılavuz niteliği taşımaktadır.

Hannaford'un [38] çalışmasına göre kullanıcının etkileşim halindeyken manipülatörden alacağı geri bildirim gerçeklik algısını artırmaktadır. Kuvvet ve hız algılanan tele operatöre hibrit iki kapılı model uygulanmıştır. Operatör ile efendi, köle ile çevre arasındaki arayüzler operatör ile çevre arasında enerji transferi için tasarlanmış ağ modelinin kapılarını oluşturmaktadır. Bu iki kapılı model bu ağın iki ucundaki girdi ve çıktıları ölçüp hesaplamaktadır. Bu sonuçlar hibrit iki kapılı modelin teleoperatör performansını geliştirmiştir. Bu sayede ideal sisteme ulaşılmasına çalışılmıştır.

Hogan [39] çalışmasında ilk olarak fiziksel sistemlerle etkileşim mekanikleri incelenmiştir. Pozisyon ve kuvvet kontrolü tek başına yetersiz olduğu için dinamik davranış kontrolü de incelenmiştir. Manipülasyon atalet objeleri içeriyorsa temelinde doğrusal olmayacağı için empedans/admitans ayrımı öne çıkmış ve empedans tipi seçilmiştir. Norton eşdeğer ağı kullanılmıştır bu sayede hareket kontrolü empedans kontrolünden ayrılabilmiştir. Tasarlanan geri bildirim kontrol algoritması ile robot hareketinin ters kinematik çözümüne ihtiyaç duyulmamıştır. Son olarak yapılacak uygulamaya göre empedans optimize edilmiştir. Empedans çevresel koşullara göre kuvvet ve hareket hatalarını ortadan kaldırmıştır.

Jinung ve An [40] sanal Coulomb sürtünmesi sergileyen hibrit haptik geri bildirim arayüzünün kararlılığını incelemiştir. Öncelikle tanım fonksiyonu metodu ve mutlak kararlılık teorisi kullanılarak sürtünmenin kararlılığını nasıl etkilediği incelenmiştir. Daha sonra teorik analizleri doğrulamak için sanal coulomb sürtünmesinin deneysel sonuçları kullanılmış ve sonuçlara göre hibrit cihaz kararlılıkla beraber Coulomb sürtünmesini gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır.

Hulin ve arkadaşları [41] yay ve sönüm olarak modellenmiş sistemle çarpışan fiziksel sönümlü tek serbestlik dereceli cihaz için normalize edilmiş kararlılık sınırları türetilmektedir. Bu sınırlar haptik cihazın ağırlığı ve örnekleme zamanından bağımsız

olacaktır. Sistemin maksimum kararlı sanal empedansı incelenmiştir. Colgate'in pasiflik şartına göre pasif bölge kararlı bölgenin içinde kalmaktadır. Bu durum gecikmesiz sistemler için geçerli olacaktır.

Baser ve Konukseven [42], [43] şeffaflığı geliştirmek için motor akım tabanlı tork geri bildirim düzenleyici kapalı çevrim empedans kontrol algoritmasını kullanmışlardır. Önermiş oldukları kontrol yöntemi akım sensörü içeren iki serbestlik dereceli eldiven tipi haptik cihazda test edilerek yöntemin çok serbestlik dereceli sistemler için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Serbest hareket, sanal yük ve sanal duvar testleri yapılmış alternatif kontrol yöntemleriyle kıyaslanmıştır.

Vlachos ve Papadopoulos [44] şeffaflık optimizasyonu için bir metot geliştirmişlerdir. Bu metot ile mekanizma boyutları, tasarım parametreleri, cihaz konumu, motor aktarım oranları, rotor ataleti ve motor boyutu optimize edilmiştir. Geliştirdikleri metot 5 serbestlik dereceli haptik cihaza uygulanmıştır. Çok değişkenli optimizasyon yaklaşımı; tork-kuvvet, motor ve transmisyon parametrelerini içeren objektif fonksiyonu kullanılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen yöntemle 5 serbestlik dereceli haptik mekanizma inşa edilmiştir.

Colgate'in [45] bu çalışmasında geliştirdiği empedans düzenleyici iki yönlü kontrol metodu, güç ölçekli iki yönlü kontrolcü ve gerçek zamanlı interaktif görev simülasyonu içermektedir. Bu metoda göre tasarlanan bir kontrolcünün önemli bir özelliği de dayanıklı olmasıdır. Bu sayede kullanıcının, manipülatörün ve görev sisteminin kararlılığı garanti altına alınmış olacaktır.

Lawrence [46] çalışmasında teleoperasyon işlemi sırasında kullanıcı komutu ve robot eylemi arasında iletişim gecikmelerinin mümkün olduğunu belirtmiştir. Geliştirdiği yöntemle gecikmeler mevcutken sistemin performansı ve kararlılığı ölçülmüştür. Bu yöntemde iki yönlü hız-kuvvet verilerini kullanan sistem mimarisi oluşturulmuştur. Bu sayede yüksek performans ve isabetli empedans çıktıları kullanıcıya aktarılmıştır.

Fite ve arkadaşları [47] iki kanallı mimari ve tasarım yaklaşımı ile iki yönlü teleoperasyon sisteminde şeffaflık ve pasiflik kararlılığında eşzamanlı iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca kullanıcı ve çevre dinamiklerindeki kararsızlıklara karşı şeffaflık kararlılığı sağlanmıştır. Döngü şekillendirme filtresi ile ilk durum, bölgesel geri bildirim döngüleriyle ise ikinci durum sağlanmaktadır.

Gil ve Sanchez [48] geliştirdikleri haptik etkileşimi simüle eden kontrol algoritması ile mekanik arayüzün dinamik davranışını düzenlemiştir. İlk olarak kullanıcının sanal ortamda etkileşime geçtiği objeden alacağı kuvvet geri bildirimini haptik cihaz aracılığıyla oluşturmuştur. Böylece sanal ortamın sınırları belirlenmiştir. Daha sonra ise kullanıcının sadece sanal ortamda etkileşime girdiği objeyi hissedebilmesi haptik cihazın ataleti azaltılarak şeffaflık optimize edilmiştir. Bu sayede kullanıcı cihazın ataletinden daha az etkilenip sanal ortam algısı artırılmıştır.

Bernstein ve arkadaşları [49] haptik arayüzlerdeki sürtünme etkisinin azaltılması için sürtünme iptali ve yüksek kazançlı kuvvet geri bildiriminin göreceli faydalarını incelemiştir. Çalışmalarına göre tahmini sürtünme iptali ve değişken kazançlı düşük bantlı kuvvet geri bildirimini ile mükemmel sürtünme düşümü ve güvenilir sistem elde edilmiştir. Bu sayede haptik hissiyat gelişmiştir. Ayrıca arayüz dinamikleri önemli ölçüde doğrusal hale getirildiği için daha isabetli model tabanlı kontrol yapılabilmektedir.

Kwon ve Woo [50] iki serbestlik dereceli beş çubuk mekanizmalı haptik arayüzün kontrol ve performansını incelemiştir. Bu sistemde sürtünme ve motor vuruşu gibi empedansı bozan doğrusal olmayan etkiler mevcuttur. Eklem torkunu ve müdahalelerini izleyerek ileri beslemeli sürtünme sönümü içeren kuvvet geri bildirim kontrol stratejisi ve empedans kalitesi test edilmiştir. Akabinde devamsızlık algısı test edilmiş ve haptik simülasyon üst limiti ölçülmüştür.

Peshkin, Colgate ve arkadaşları [51], [52] elektriksel sönümün haptik performansı geliştirme etkisi incelenmiştir. Elektriksel sönüm mekanik fren gibi çalışacağından yüksek empedans gerektiren limitlerde salınım azaltıcı etki gösterecektir. Ayrıca tasarımının kolay olması ve frekansa bağlı olarak kolay kontrolü ile düşük empedans bandının performansını da etkilememektedir. Çalışmanın teorik davranışı ve frekansa bağlı eş sönüm içeren haptik düzenekteki pratik sonuçları incelendiğinde sanal duvar davranış özelliğinin geliştiğini görülmüştür.

Lim, Ahn ve Ryu [53] yaptıkları çalışmada yüksek frekanslı girdilerin sert objelerle etkileşim sırasında oluşup sistemi kararsızlaştırabildiğini tespit etmiştir. Önerilen analog girdi şekillendirme metodu temelde doğrusal olmayan alçak geçiren filtre gibi çalışarak ve istenmeyen yüksek frekans girdilerini elimine ederek haptik arayüze

ulaşmalarına engel olmuştur. Ayrıca sinyal aşamasında devreye girdiği için motor parametrelerinden bağımsız tasarlanmış ve serbest hareket şeffaflığını etkilememiştir. Franken ve arkadaşlarının [54] yaptıkları çalışma farklı bir tele manipölasyon uygulamasıyla ayırık zamanlı çeşitli gecikmeleri olan sistemin pasifliğini ve maksimum şeffaflığını korumuştur. Bunu yapmak için iletişimi iki kanala ayırmıştır. İlki pasifliği korumak için enerji dengesi kullanırken diğer usta köle arasındaki haptik bilgi transferi için kullanılıp şeffaflığı belirlemiştir.

1.4.Literatür Sonuçları ve çalışmada İzlenecek Yol

İdeal haptik sistemlerin özellikleri ve tasarlanırken dikkat edilmesi kriterler yapılan literatür çalışmaları ile tespit edilmiştir. Bu tip sistemlerde kullanıcı, haptik arayüz ile etkileşime girdiğinde kullanıcıda gerçek ortam algısı maksimum düzeyde oluşturulabilmelidir. Haptik algıyı geliştirmek için gerekli tasarım kriterleri özetlenecek olursa sergilenebilir maksimum dinamik empedans bandı diğer adıyla “Z-width” simüle edilebilmelidir. Yani tamamen serbest hareket ve katı cisim teması arasındaki bütün empedans erişilebilir olmalıdır. Bu sırada kullanıcı etkileşime girdiği haptik cihazın ataletinden ve sürtünme kuvvetlerinden bağımsız olmalıdır yani bu da bir diğer tasarım kriteri olan şeffaflıktır. Diğer bir kriter ise bütün sistemin kararlılığıdır. Bu kriterlerin maksimum düzeyde sağlandığı durumda ise kullanıcıda oluşacak haptik hissiyat ideale yaklaşacaktır.

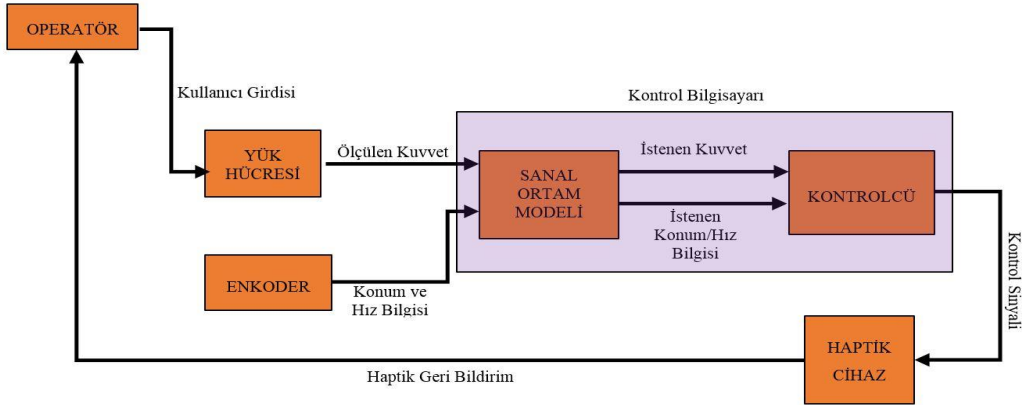
Literatürde yapılan incelemeler ideal haptik ortam simölasyonu için gerekli kriterlerin aktif ve pasif eyleyicinin birlikte kullanılacağı hibrit haptik cihaz tasarımı ile optimum düzeyde elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında tasarımı yapılıp üzerinde haptik simölasyon modellerinin uygulanacağı ve deneyler yapılacak sistem hibrit haptik sistem olarak belirlenmiştir.

2. TEK SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT HAPTİK ARAYÜZ MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE ANALATİK OLARAK İNCELENMESİ

Bu bölümde tek serbestlik dereceli hibrit haptik arayüz bileşenleri ile kullanıcıda haptik deneyim oluşturmak için tasarlanan sanal ortam modeli anlatılmıştır. Bu model oluşturulurken simüle edilecek fiziksel ortamın karakteristik özelliklerine göre sistem bileşenleri arasındaki veri iletim şeması gösterilmiştir. Bu veriler ile kullanıcıya gerçekçi bir haptik deneyim için gerekli çıktıların hesaplanmasını sağlayan analitik sistem modelleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

2.1.Haptik Arayüz Modeli



Şekil 2.1 : Haptik çevrim modelinin şematik gösterimi

Şekil 2.1’de kullanıcı ile haptik cihaz arasındaki etkileşim döngüsünün genel görünümü basit bir şema ile verilmiştir. Kullanıcı haptik cihaz ile etkileşime geçtiği zaman simüle edilmek istenen ortam modeline göre kullanıcı girdisi ölçülür. Sanal ortamda işlenen kullanıcı girdisi ile eyleyicileri harekete geçirecek sinyal oluşturulur. Bu sinyaller kontrolçüden eyleyicilere gönderilir. Eyleyiciler haptik cihazı aktifleştirdiği durumda kullanıcıya haptik geri bildirim iletilir, aynı zamanda enkoderden alınan bilgi ve yük hücresinden alınan kuvvet ölçümü sanal ortama gönderilerek istenen ve gerçekteki konum, hız ve kuvvet arasındaki hata

Bölüm 1’de yapılan literatür çalışmalarında görüldüğü üzere tasarlanan haptik cihaz elemanları yüksek atalet ve sürtünmeye sahip olduklarından empedans tipi haptik simülasyon için elverişli değildir. Çünkü aktif eyleyiciye bağlı 50:1 oranındaki redüktörün yüksek atalete sahip olması ve kullanıcıdan gelecek konum girdisine göre kuvvet kontrolü yapılmasını imkansız hale getirdiği için ortam modeli oluşturulurken admitans tipi kontrol yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntemde ilk olarak sanal ortam karakteri belirlenmiştir. Ortam yay ve sönümden kuvvetleri olarak modellendiğinde;

$$F = b\dot{\theta} + k\theta \quad (2.1)$$

Bu denkleme göre kullanıcı serbest hareket edeceği zaman yay ve sönüm katsayıları sıfır olarak ayarlanacaktır. Sonrasında kullanıcının sisteme uyguladığı kuvvet ölçülecektir. Sonrasında bu kuvvet sanal ortam modeli ile referans hız değerine dönüştürülür. Bu hız değeri kullanıcının hareket etmek istediği hız değeridir. Eş zamanlı olarak sistemin hızı enkoderden ölçülür. Sanal ortamda bu iki hız değeri kullanılarak eyleyiciye gönderilecek kontrol sinyali hesaplanmıştır. İzleyen kısımda kontrolcünün ilk girdisi olan referans hız değerinin hesaplanması incelenmiştir.

$$T_K = m_{YH}gR_KN \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ile yük hücresinden kg cinsinden alınan veri yerçekimi ivmesi, kuvvet kolunun uzunluğu ve redüktör oranı ile çarpılarak motor mili üzerine etkiyen tork değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan T_K (kullanıcının uyguladığı tork) değerinin pasif eyleyicinin durağan hal tork değerini de denkleme dahil ettiği unutulmamalıdır.

Ancak hız hesabı için yalnız kullanıcı tork değeri yeterli değildir. Sistemdeki diğer değişkenlerde toplam tork hesabı için denkleme eklenmelidir. Bunlardan ilki motorun iç sürtünme torku, açısal hız ile orantılı elektro motor kuvveti, yerçekimi.

$$\ddot{\theta}_{ref} = (T_k - T_s - T_{emk} - T_{so}) \frac{1}{J_{toplam}} \quad (2.3)$$

$$\dot{\theta}_{ref} = \int \ddot{\theta}_{ref} \quad (2.4)$$

Denklem 2.3 ve 2.4 kullanılarak referans hız değeri hesaplanmıştır. Haptik cihazı harekete geçirebilmek için gerekli ikinci hız değeri enkoderden alınmıştır. Bu aşamadan sonra iki hız değerinin farkını girdi olarak alan kontrolcü kullanıcının girdilerine göre sürekli döngü halinde aktif eyleyiciye kontrol sinyali göndererek serbest hareketi mümkün kılacaktır.

Katı duvar modellemesi

Bu bölümde empedans değerinin maksimum olacağı katı duvar modeli üzerinde çalışılmıştır. Haptik cihaz, kullanıcı belirlenen açısız konum sınırları arasında hareket ederken önceki bölümde anlatılan serbest hareket modeline göre çalışır. Bu bölümde belirlenmiş olan sınırlara geldiğinde ise sistem kullanıcıda katı yüzeye temas ettiğinde hissetmesi gereken haptik geri bildirimini oluşturacak şekilde çalışmalıdır. Serbest hareket modelinde kullandığımız yay-sönüm ortam modeli katı duvar içinde geçerlidir. Belirlen yay ve sönüm sabitleri ile farklı duvar özellikleri incelenecektir.

Bu bölümde oluşturulacak haptik geri bildirim kullanıcının o andaki konum, hız ve ivme değerlerine göre hesaplanacağı için enkoderden alınan veri sistem girdisi olarak kullanılacaktır.

Serbest hareket modelinde kullanıcıya iletilmek istenen kuvvetin minimum olması istendiği için pasif eyleyici sistem hareket halindeyken sadece aktif eyleyici tarafından kompanse edilmesi gereken bir sönüm elemanıydı. Bu modelde ise haptik performans kalitesini artırmak için hibrit sistemin etkisi incelenmiştir. Belirlenen katı duvar konumlarına ulaşıldığında aktif eyleyici ve pasif eyleyici birlikte çalışarak istenen haptik geri bildirim oluşturulmasını sağlar.

Kullanıcı arayüz ile etkileşime geçip sanal ortamda belirlediğimiz duvar konumuna geldiğinde serbest hareket için sıfır seçilen yay ve sönüm sabitleri değişecektir. Denklem 2.3'te T_{SO} bileşeni serbest hareket sırasında sıfır iken duvara ulaşıldığında değişen yay ve sönüm sabitlerinin etkisiyle harekete ters yönde bir tork değişkenini denkleme dahil eder. Böylece referans hız değeri hesabı değişecek, uygun sabitler seçildiğinde duvar simüle edilmiş olacaktır. Modellenen duvarın sertlik ve sönüm özellikleri bizim belirlediğimiz yay ve sönüm sabitlerine göre değişecektir. Bu da farklı yay ve sönüm sabiti seçimlerine göre oluşturulmuş duvar modellerinde kullanıcıya iletilecek haptik geri bildiriminde değişeceğini gösterir. Farklı duvar modelleri deneysel çalışmalar bölümünde daha detaylı bir şekilde incelenmiş ve sonuçları gösterilmiştir. Aynı zamanda aktif ve pasif eyleyicinin birlikte kullanıldığı sistemin sonuçları sadece frenin ya da sadece motorun kullanıldığı sistemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Böylece hibrit haptik arayüzün haptik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir.

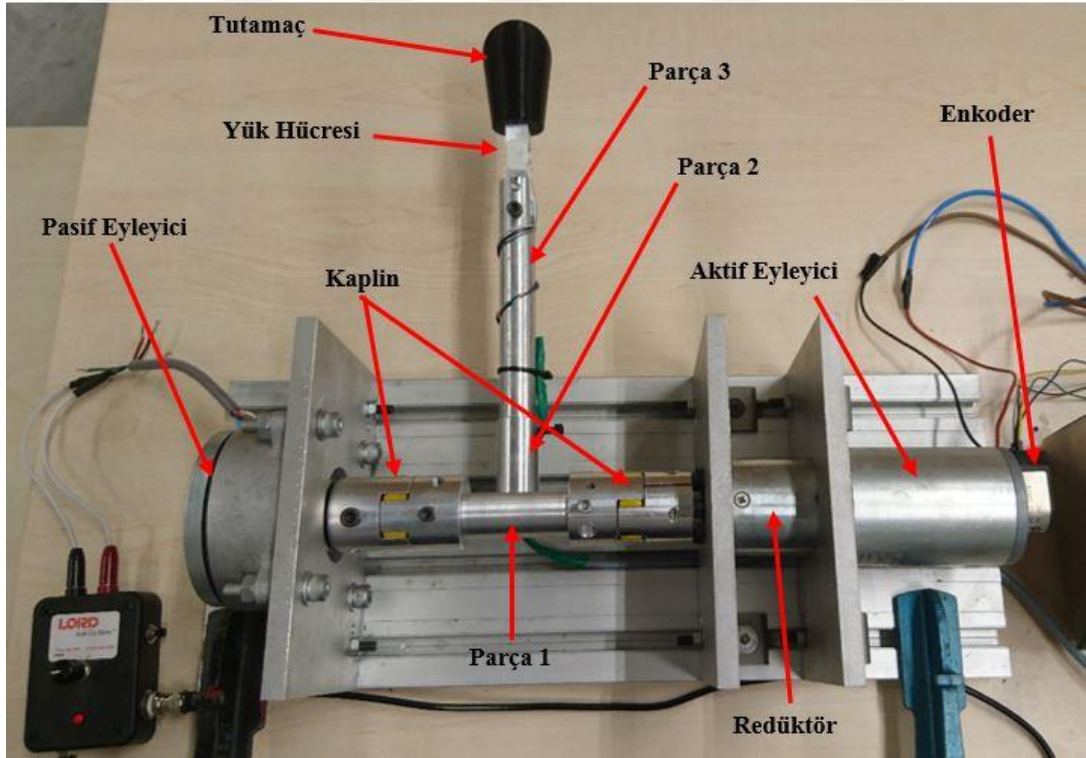


3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY METODU

Bu bölümde Bölüm 2’de sanal ortam modelleri ve analitik incelemesi yapılan hibrit haptik arayüzün simülasyonunun yapılacağı tek serbestlik dereceli deney düzeneğinin oluşturulması, deney düzeneğinin bileşenleri ve deney metodu anlatılmıştır.

3.1.Deney Düzeneği ve Bileşenleri

Deneyler sırasında kullanılacak tek serbestlik dereceli hibrit haptik arayüz bir aktif ve bir pasif olmak üzere iki adet eyleyiciden ve bu eyleyicilerin kontrolünde kullanılacak ölçüm elemanları, güç aktarma elemanları ve sanal ortam modelini ve kontrol kartını bulunduran bilgisayardan oluşmaktadır. İzleyen bölümlerde bu bileşenlerin özellikleri ve çalışma prensipleri detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Haptik arayüz resmi Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 : Hibrit haptik arayüz ve sistem bileşenleri

3.1.1. Aktif eyleyici

Aktif eyleyici olarak Dunkermotoren GR 63x25 doğru akım motoru kullanılmıştır. Motor sürücü olarak ESCON 70110 kullanılmıştır. Motordan çıkış miline bağlanmış 50:1 oranındaki redüktör ile 50 Nm' ye kadar tork çıktısı alınabilmektedir. Motor ve sürücünün özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Aktif eyleyicinin özellikleri

| Dunkermotoren GR 63x25 | |
|-------------------------------|----------------------|
| Çalışma Gerilimi | 40 V |
| Yüksüz Sürtünme Torku | 1,5 Ncm |
| Tork Sabiti | 9,8 Ncm/A |
| Terminal Direnci | 3,33 Ohm |
| Terminal İndüktansı | 7,3 mH |
| Rotor Ataleti | 400 gcm ² |
| Nominal Tork | 13,3 Ncm |
| Peak Stall Tork | 118 Ncm |
| Redüktör Oranı | 50:1 |

Çizelge 3.2 : Sürücü özellikleri

| ESCON 70/10 Kontrolcü | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Çalışma Aralığı | 10...70 VDC |
| Analog Çıktı | 12 bit çözünürlük ± 4 V |
| Analog Girdi | 12 bit çözünürlük ± 10 |
| Dijital Çıktı | 2,4 ... 36 VDC |
| Dijital Girdi | 2,4 ... 36 VDC |

Çizelge 3.3 : Redüktör özellikleri

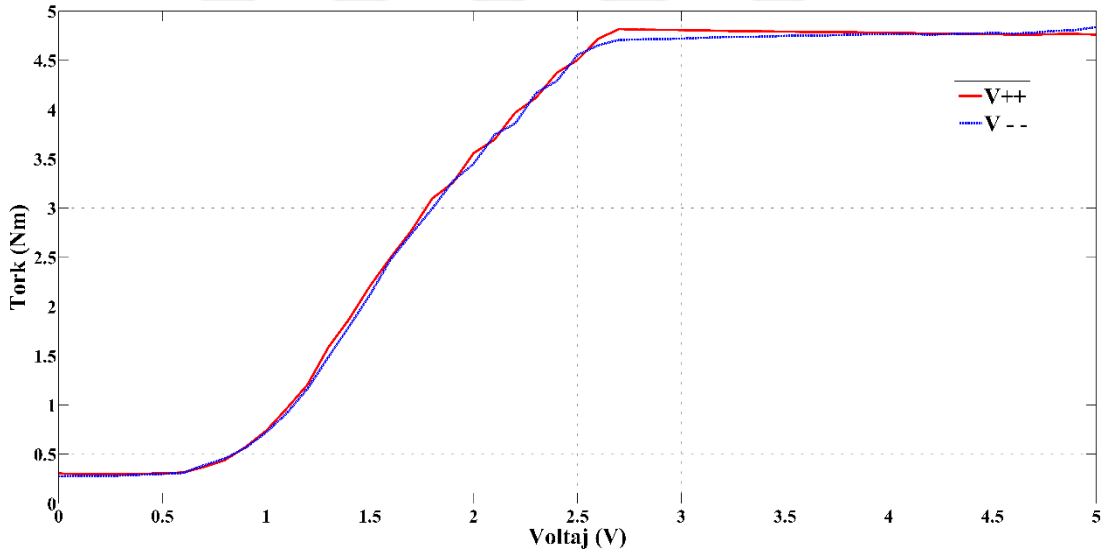
| PLG 52, 50:1 | |
|---------------------|------|
| Dişli oranı | 50:1 |
| Aşama sayısı | 2 |
| Maksimum verim | %81 |

3.1.2. Pasif eyleyici

Sistemde kullanılacak pasif eyleyici olarak LORD RD-8191 TFD MR sıvılı fren seçilmiştir. Bu fren fabrika çıkış bilgilerine göre 0-5 V aralığında çalışmakta ve maksimum 5 Nm tork değerine sahiptir. Ancak deneyler öncesi yapılan ölçümlere göre 0-5 V arasındaki tork çıkışı ileri ve geri yönde tarandığında gerçek çalışma aralığının 0,6 – 2,7 V olduğu tespit edilmiştir. Yüksüz haldeki tork değeri 0,4 Nm, maksimum tork değeri ise 4,8 Nm olarak ölçülmüştür. Kullanılan pasif eyleyicinin özellikleri Çizelge 3.3'te, ölçüm verileri ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Pasif eyleyici özellikleri

| RD-8191 TFD DEVICE – MR FLUID BRAKE | |
|-------------------------------------|----------|
| Maksimum Tork | 5 Nm max |
| Minimum Tork | 0,5 Nm |
| Çalışma Gerlimi | 12 VDC |
| Çözünürlük | 12 Bit |



Şekil 3.1 : MR sıvılı frenin 0-5 aralığı ölçümü

3.1.3. Enkoder

Artımlı optik enkoderden alınan verinin sistem modelinde kullanılabilmesi için konum ve konum türevlerine çevrilmesi gerekmektedir. Enkoder tur başına 2000 vuruş hassasiyetindedir ve motor miline bağlıdır. Motorun çıkış milinde 50:1 oranında redüktör takılıdır.

$$\theta = 2\pi * \frac{vs}{2000*50} \quad (rad) \quad (3.1)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{t_{sf}} * \frac{1}{60} \quad \left(\frac{rad}{s}\right) \quad (3.2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\dot{\theta}_n - \dot{\theta}_{n-1}}{t_{sf}} \quad \left(\frac{rad}{s^2}\right) \quad (3.3)$$

Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3 kullanılarak motor çıkış milinin gerçek konum, hız ve ivme değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler izleyen bölümlerde anlatılacak haptik arayüz sanal ortam modeli ile sistemin kapalı çevrim kontrolünde kullanılacaktır. Kullanılan enkoderin özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kullanılan enkoder özellikleri

| RE 30-3-500 Artımlı Optik Enkoder | |
|--|-------|
| Kanal Sayısı | 3 |
| Enkoder PPR | 500 |
| Çalışma Gerilimi | 5 V |
| Çıkış Gerilimi | 2.4 V |

3.1.4. Yük hücresi

Hibrit haptik cihazda aktif ve pasif eyleyici arasındaki güç aktarıcı elemanlardan birisi de kullanıcının sisteme dahil edildiği kontrol koludur. Bu kolun uç kısmında bulunan yük hücresi ile kullanıcının uyguladığı kuvvet ölçülmektedir. Başlangıçta bu ölçülen kuvvet sistemi aktifleştirmeye devamında ise simüle edilen ortam ile kullanıcıya iletilen haptik geri bildirim kıyaslanmasına olanak sağlamaktadır.

Yük hücresinden alınan veri işlenmemiş haldeyken kuvvet ya da tork cinsinden değildir. Bu veri mV cinsindedir ve yükseltici ile V cinsine çevrilip modele dahil edilir. Sonrasında kullanılan referans ağırlıklar ile V cinsinden elde edilen verinin kg karşılıkları hesaplanarak yük hücresi kalibrasyonu tamamlanır. Sanal ortam modelinde kullanılacak sensör verisi;

$$1 V = 1 kg \quad (3.4)$$

Olacak şekilde kalibre edilmiştir. Kullanılan yük hücresi 20 kg'a kadar ölçüm yapabilmektedir.

3.1.5. Güç iletim elemanları

Haptik arayüz ile kullanıcı arasında etkileşimi sağlamak için aktif ve pasif eyleyici arasında güç iletimini sağlayacak elemanlar bulunmaktadır. Gerçekçi haptik simülasyonun sağlanması için bütün elemanların ataletlerinin sistem modeline dahil edilmesi gerekmektedir. Güç iletim elemanlarının geometrik özellikleri ve dönme eksenine göre konumları farklı olduğu için ataletleri;

$$J_K = \frac{1}{2}m(r_i^2 + r_d^2) \quad (2.5)$$

$$J_{P_1} = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2.6)$$

$$J_{P_2, P_3, T} = \frac{1}{12}mL^2 + mR^2 \quad (2.7)$$

$$J_{YH} = \frac{1}{12}m(a^2 + h^2) + mR^2 \quad (2.8)$$

Denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu elemanların kütleleri, dönme yarıçapları ve yukarıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Parça 1'in yüzeyi bağlantı yapılacak şekilde işlendiği için silindir geometrisi bozulmuştur. Ancak işlenen parçanın sistemin toplam ataleti üzerindeki etkisi çok küçük olduğu için geometrik fark ihmal edilmiş ve silindir geometrisine göre hesaplama yapılmıştır. Atalet momentleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Güç iletim elemanları ve özellikleri

| Güç İletim Elemanı | m(gr) | R(mm) | J(kgm ²) |
|--------------------|-------|---------------|-------------------------|
| Kaplin | 190 | 7(iç)-20(dış) | 4,2655*10 ⁻⁵ |
| Parça-1 | 113,5 | 14,5 | 1,1931*10 ⁻⁵ |
| Parça-2 | 50 | 29,5 | 5,0179*10 ⁻⁵ |
| Parça-3 | 106 | 117 | 1,6120*10 ⁻³ |
| Yük Hücresi | 30 | 200 | 1,2163*10 ⁻³ |
| Tutamaç | 25 | 250 | 1,57*10 ⁻³ |
| Motor | - | - | 4*10 ⁻⁵ |

Yukarıdaki çizelgede her bir parçanın atalet momenti verilmiştir ancak hareket denkleminde kullanmak için toplam atalet momenti gereklidir. Ancak güç iletim elemanları ile motor arasında 50:1 oranında redüktör bulunduğu için toplam atalet hesaplanırken bu oranda denkleme dahil edilecektir. Denklem 2.10 kullanılarak toplam atalet hesaplanmıştır.

$$J_{toplam} = \left(\frac{1}{50}\right)^2 (2 * J_{Kaplın} + J_1 + J_2 + J_3 + J_{YükHücre} + J_{Tutamach}) + J_{Motor} \quad (2.10)$$

$$J_{Toplam} = 4,1818 * 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

Görüldüğü üzere redüktör etkisi sebebiyle güç iletim elemanlarının toplam atalet üzerindeki etkisi %4,3 kadardır.

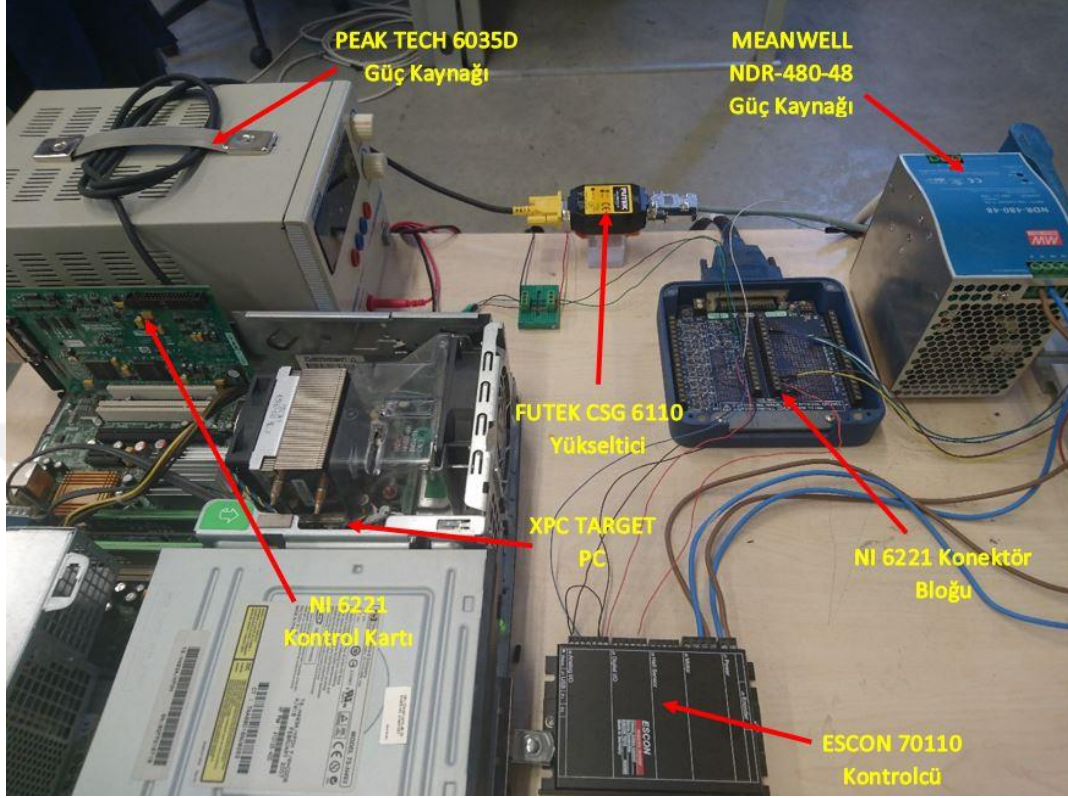
3.2.Deney Düzeneginin Oluşturulması

Seçilen aktif ve pasif eyleyicinin özellikleri Bölüm 2’de detaylı bir şekilde anlatılmıştı. Hibrit haptik simülasyonun yapılacağı deney düzeneği oluşturulurken motor ve freni eş eksenli olarak sigma profile monte etmek için; DC motor ve MR frenin geometrilerine uygun olacak şekilde tasarlanan bağlantı parçaları alüminyum plakadan su jeti ile kesilerek üretildi. 20x180x450mm boyutlarındaki alüminyum sigma profile L tipi köşebentlerle karşılıklı olarak monte edildi. DC motor ve MR fren alüminyum plakalara montaj deliklerinden vidalandı.

Eyleyiciler arasında güç aktarımını sağlamak için iki adet GS-19 kaplin ve kontrol kolu kullanıldı. Kaplinlerin montaj delikleri takılacakları eyleyiciye göre işlendi. Diğer montaj delikleri ise 14 mm olacak şekilde işlendi. Daha sonra fren ve motor montajı yapılan kaplinler üzerlerinde bulunan ayar vidaları ile mil üzerinde kaymayacak şekilde konumları sabitlendi. Beş parçadan oluşan kontrol kolunun ilk parçası, kaplinler arasına monte edilecek şekilde 30mm çaplı alüminyum milden iki ucu 14mm çapa tornada işlendi; bir yüzeyi de ikinci parçanın monte edileceği şekilde frezeyle işlendi ve bu yüzeye M8 vida deliği açıldı. Sonrasında iki kaplin arasına takılarak yine ayar vidaları ile sabitlendi. Böylece eyleyiciler birbirine bağlanmış oldu. Kullanıcının sisteme dahil olabilmesi için kontrol kolunu diğer parçaları birinci parçanın frezelenmiş yüzeyine dik olacak şekilde konumlandırıldı. İkinci parça ise 23mm çaplı alüminyum milden; bir ucu ilk parçaya bağlanacak biçimde M8 vida deliği olarak diğer ucuna ise M10 montaj deliği ve delik eksenine dik eksenden açılmış ayar vidası deliği olacak şekilde işlendi. M8 vida ile ilk parçaya montajı yapıldı. Üçüncü parça 20mm çaplı alüminyum milden; bir ucu 10mm çapa diğer ucu ise yük hücresinin montajı için bir kanal olarak işlendi ve yük hücresinin montaj deliklerine uygun vida delikleri açıldı.

Kullanıcının uyguladığı kuvveti ölçebilmek amacıyla düzeneğe eklenen yük hücresi alüminyum milden işlenmiş kontrol kolunun uç kısmına montaj deliklerinden

vidalandı. Yük hücresinin ölçüm yönü kontrol kolunun hareket yönüne paralel olacak şekilde ayarlamak için 3. parça 2. parçaya takıldıktan sonra ayar vidası ile konumu sabitlendi. Kullanımı kolaylaştırmak için ise yük hücresinin uç kısmına PLA malzeme



Resim 3.2 : Haptik deney düzeneğini kontrol etmek için kullanılan elektronik donanım elemanları

ile üç boyutlu yazıcıdan üretilen kulp sıkı geçme yöntemiyle monte edildi. Bu kol aynı zamanda farklı ortam modellemelerinde kullanıcıya ortamdaki kuvveti aktarıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan deney düzeneği Resim 2.1’de verilmişti. Bu deney düzeneğini kontrol etmek için kullanılan elektronik donanım ise Resim 3.2’de verilmiştir.

Aktif eyleyici olarak seçilen doğru akım motorunun güç kaynağı olarak MEAN WELL NDR-480-48 kullanıldı. Kullanılan motor nominal 40 V kullandığı için bu güç kaynağından motora gidecek voltajı düzenlemek için ESCON marka 70110 model sürücü kullanıldı. Sürücüyü aktif hale getirmek için NI 6221 dijital çıkış pininden ESCON dijital giriş pinine 5V gönderildi. Daha sonra güç kaynağından gelen 48 V gerilim, NI 6221 analog çıkış pininden gelen kontrol sinyaline göre 0-40 V aralığına regüle edilerek ESCON J2 pinlerinden motora gönderilmektedir. Pasif eyleyici olarak seçilen MR sıvılı fren için ise 12V’luk doğru akım güç kaynağı ve LORD RD 3002

WONDER BOX model kontrol kiti kullanıldı. Güç kaynağı ve LORD Wonder Box ile ilgili bilgiler çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Alternatif akım güç kaynağı ve MR fren kontrol kiti

| | NDR-480-48 | LORD Wonder Box |
|-----------------|------------|-----------------|
| Voltaj Girişi | 100-240 V | 12 V |
| Voltaj Çıkışı | 48 V | 0-5 V |
| Akım Çıkışı | 10 A | 0-1,3 A |
| Kontrol Sinyali | | 1 kHz'e kadar |

Bu kontrol kiti BNC terminali vasıtasıyla NI 6221’den aldığı analog girdi değerine göre güç kaynağından frene gidecek gerilim değerini kontrol etmemize olanak sağlamaktadır.

Deneyler sırasında en ideal haptik deneyim hedeflendiği için deney düzeneğindeki motor ve fren arasındaki güç iletimini sağlayan bağlantı parçalarının ağırlıkları ve geometrik ölçümleri alınarak atalet momentleri hesaplandı. Bölüm 2.2.5’te hesaplanan atalet değerleri çizelge 2.5’te verilmiştir.

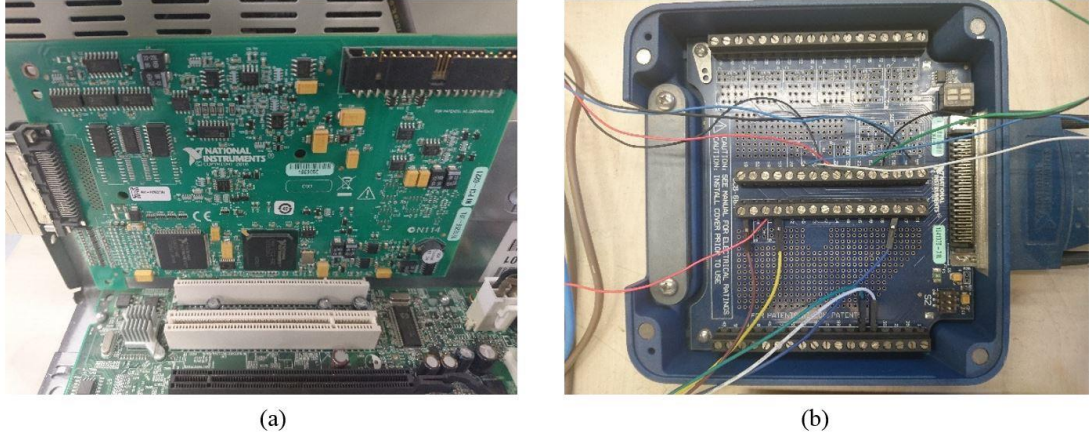
Eyleyicilerin kontrolü için gerekli ölçümlerde 20 kg’lık yük hücresi ve doğru akım motoruna bağlı Dunkermotoren RE 30-3-500 artımlı optik enkoder kullanıldı.

Yük hücresinden alınan ölçümler PEAK TECH 6035D güç kaynağına bağlı FUTEK CS 6110 yükseltip NI 6221 analog girişinden kontrol modeline aktarıldı. Farklı ağırlıklar kullanılarak yük hücresi kalibre edildi. Böylece kullanıcı tarafından uygulanan kuvvet MATLAB Simulink modeline doğrudan kg cinsinden iletildi. Yük hücresi ve yükselticinin teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Yükseltici ve yük hücresinin teknik özellikleri

| | FUTEK CSG110 | HX711 Yük Hücresi |
|----------------|---------------|-------------------|
| Voltaj Girişi | 10-24 V | 5-15 V |
| Voltaj Çıkışı | ± 10 mV/V | $1 \pm 0,15$ mV/V |
| Örnekleme Hızı | 1-25 Khz | - |
| Kapasite | - | 20 Kg |

Gerçek zamanlı olarak konum, hız ve kuvvet kontrolü yapılabilmesi için sensörlerden ve enkoderden alınan verinin yüksek frekansta örneklenip işlenerek deney düzeneğine



Resim 3.3 : (a)-NI 6221 kontrol kartı (b)-NI 6221 konektör bloğu

kontrol sinyallerinin gönderilmesi gereklidir. Bunun için MATLAB R2014a yazılımının kurulduğu bir bilgisayardaki SIMULINK modeli ve NI-6221 M serisi kontrol kartının takılı olduğu iki farklı bilgisayar kullanıldı. İki bilgisayar arasındaki iletişim bir Matlab Simulink'te bulunan XPC Target Computer modülü ile sağlandı. Veri aktarımı için ise Ethernet bağlantısı kullanıldı. Deney düzeneğinin kontrol etmek için kullanılan NI-6221 kontrol kartı ve konektör bloğu resim 3.1'de verilmiştir.

Kullanılan NI 6221 kontrol kartının teknik özellikleri çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.9 : NI 6221 kontrol kartının teknik özellikleri

| Model | İşlev | Kanal Sayısı | Veri Hızı | Analog Çözünürlük | Sinyal Türü | Çalışma Aralığı |
|---------|---------------|--------------|----------------|-------------------|-------------|-----------------|
| NI 6221 | Analog Çıktı | 2 | 740 kS/s kanal | 16 bit | Voltaj | ± 10 V |
| NI 6221 | Analog Girdi | 16 | 250 kS/s | 16 bit | Voltaj | ± 11 V |
| NI 6221 | Dijital Çıktı | 24 | | | Akım | ± 16 mA |
| NI 6221 | Dijital Girdi | 24 | | | Voltaj | ± 20 V |

3.3. Deney Metodu

Oluşturulan haptik deney düzeneği ile Bölüm 2 de anlatılan sanal ortam modellerinin simüle edilebilmesi için haptik cihaz oluşturan eyleyicileri gerçek zamanlı olarak yüksek hassasiyetle kontrol etmemiz gerekmektedir. Eyleyicileri kontrol etmek için kullanılacak sanal ortam modelleri MATLAB Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Kontrol kalitesinin yüksek olması ve gerçek zamanlı

çalıştırılabilmesi için Simulink Real Time modülü kullanılmıştır. Bu modül ile XPC Target bilgisayara takılan NI 6221 kontrol kartı sayesinde haptik deney düzeneği ile kontrol modeli arasında yüksek örnekleme hızlarında iletişim sağlanabilmektedir. Bu sayede gerçek zamanlı kontrol performansı artarken aynı zamanda haptik geri bildirim performansı da artmaktadır.

Simulinkte oluşturulan sanal ortam modelleri 10kHz örnekleme frekansında çalıştırılmıştır. Model sistem girdisi olarak sensörlerden alınan veriler kullanılmıştır. Bu verileri alabilmek için NI 6221 kontrol kartının Simulink kütüphanesindeki model blokları kullanılır. Sensörlerin NI 6221 konektör bloğunda alınacak sinyal türüne göre bağlı olduğu analog veya dijital pin çıkışlarını temsil eden bloklar seçilir ve o pinler aktifleştirilir. Aktifleştirilen pinlerden alınan sensör verilerine sanal ortam modeline aktarılmış olur. Bu veriler enkoderden alınan anlık konum bilgisi ve yükseltici aracılığıyla alınan yük hücresinden gelen kuvvet verileridir.

Bölüm 2.3'te anlatılan sanal ortam modellerine göre sensörlerden alınan veri işlenir. Enkoderden alınan verinin konum, hız ve ivme verisine dönüşümü bölüm 2.2.3'te verilmişti. Tasarlanan iki ortam modeli arasındaki seçim enkoderden gelen konum bilgisine göre yapılır. Ortam modeli seçildikten sonra seçilen ortam özelliğine göre haptik cihazdan almak istediğimiz çıktı hesaplanır.

Bu aşamadan sonra referans çıktı değerine göre sistemin kontrol edilmesi, yani eyleycilere gönderilecek kontrol sinyalinin belirlenmesi ve sistemin aktif hale gelmesi gerekir. Bunun için Simulink kütüphanesindeki PID kontrol blokları kullanılır.

PID kontrol bloklarından kontrol sinyali oluşturmak için hesaplanan referans çıktıları ile sensörlerden alınan gerçek ortam verileri sürekli olarak kıyaslanır yani hata hesaplanmış olur. Hata PID kontrolcüye gönderilir ve kontrolcü sistemdeki hatayı sıfırlayacak kontrol sinyalini eyleycilere gönderir. Tasarlanan sistem doğrusal olmadığı için PID kontrolcü kazançları deneme yanılma yöntemiyle tespit edilmiştir.

PID kontrol sinyaline göre eyleycilere gönderilecek kontrol sinyalleri için yine Simulink kütüphanesindeki NI 6221 kontrol kartı için tanımlanmış analog ve dijital çıkış blokları kullanılır. Konektör bloğuna bağlı olan ESCON motor kontrolcü dijital çıkış pininden aldığı 5V sinyal ile aktif hale gelir. Sonrasında analog çıkış pininden

aldığı hesaplanmış kontrol sinyaline göre NDR-480-48 güç kaynağından gelen 48 V'u regüle ederek kendi üzerindeki J2 motor pinlerinden aktif eyleyiciye gönderir.

Pasif eyleyici ise 12V'luk güç kaynağı adaptöre bağlı LORD Wonder Box kontrol kitinin BNC terminaline simulink modelindeki NI 6221 analog çıkış bloğundan gelen kontrol sinyali ile kontrol edilir.





4. TEK SERBESTLİK DERECELİ HİBRİT HAPTİK ARAYÜZÜN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Daha önceki bölümlerde tek serbestlik dereceli hibrit haptik arayüz için sanal ortam modelleri ve bu modelleri gerçekleyebilmek için oluşturduğumuz deney düzeneği anlatılmıştı. Bu bölümde ise haptik deney düzeneği üzerinde 2. bölümde oluşturduğumuz sanal ortam modeli farklı parametreler altında deneylere tabi tutulması ve deneylerden elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Bu bölümde yapılan deneylerin amacı hibrit eyleyicili sistem ile tek tip eyleyicili sistemin haptik performans üzerine etkisi simüle edilebilen Z-bandı içinde karşılaştırılması olacaktır.

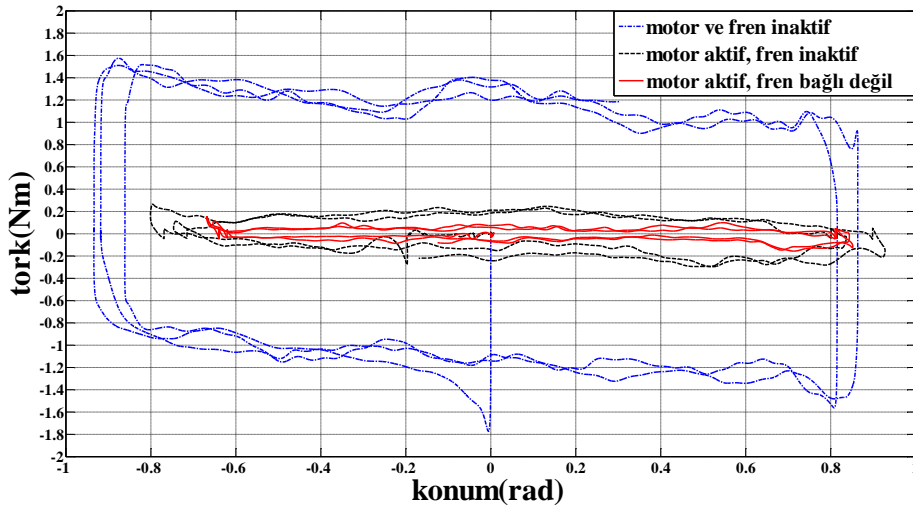
İlk olarak serbest hareket modeli incelenmiştir.

4.1.Serbest Hareket Modelinin Haptik Cihaz Üzerinde Simüle Edilmesi

Bölüm 2.3.1’de anlatılan serbest hareket modellemesi oluşturulan haptik cihaz üzerinde simüle edilmiştir. Simülasyonun çalıştırmak için sanal ortam modelinde kullanılan PID kontrolcü ile hız kontrolü yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşıma göre kullanıcı haptik cihaz ile etkileşime girdiğinde yük hücresinden alınan veri sistemin ilk girdisi olacak şekilde ayarlanmıştır. Simüle edilmek istenen ortamda kullanıcıda boşlukta hareket ediyormuş hissi oluşturmak amaçlanmıştır. Bunu sağlayabilmek için ortam değişkenleri olan yay ve sönüm sabitleri sıfır olarak seçilmiştir. Yük hücresinden alınan veriye göre kullanıcının hareket etmek istediği hız hesaplanacak ve kontrolcüler sistemi istenen hızda hareket ettirecektir. Yani haptik cihaz kullanıcının o hızda ilerlemek için uygulayacağı kuvveti kullanıcı yerine uygulayacak böylece kullanıcı sıfır empedans deneyimine yaklaşacaktır. Ancak sıfır empedans teorik olarak mümkün görünmesine rağmen pratik uygulaması imkansızdır. O yüzden amaç sıfır empedansa olabildiğince yaklaşmak olmuştur.

Serbest hareket modeli ile elde edilen haptik performansın incelenebilmesi için üç farklı deney durumu yapılmıştır.

İlk durumda motor ve fren inaktif durumda tutulmuş kullanıcıdan haptik cihazın kontrol kolunu belirlenen yörüngede hareket ettirmesi istenmiştir. İkinci durumda ise fren inaktif durumda kalmış, motor aktif duruma getirilerek serbest hareket modeli çalıştırılmıştır. Üçüncü durumda ise fren sistem çıkarılarak sadece motor kullanılmıştır. Her üç simülasyonda yük hücresi ve enkoderden alınan veriler kaydedilmiştir. Verilerden Matlab kodu kullanılarak konum-tork grafiği ve hız kontrolü grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan tork grafiği Şekil 4.1’de, hız-zaman grafiği ise Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Serbest hareket modeli haptik performans grafiği

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere motorun ve frenin inaktif olduğu birinci durumda kullanıcı istenen yörüngede hareket edebilmek için sistemdeki bütün ataleti ve sürtünmeleri kendisi yenmek durumunda kalmıştır. Hareketi sağlayabilmek için ortalama 1,2 Nm civarın bir tork uygulaması gerekmiştir. İkinci durumda ise sistem uygulanması gereken torku aktif eyleyici aracılığı ile kullanıcı yerine uygulayarak kullanıcı torkunu ortalama 0,2 Nm bandına düşürebilmiştir. Ancak fren inaktif haldeyken minimum tork değeri olduğundan. Motor kullanıcıya yardım ederken aynı anda freninin kapalı hal torkunu da kompanse etmiştir. Üçüncü durumda ise freni sistemden çıkarmak için fren miline bağlı kaplin üzerindeki sabitleme vidası çıkarıldı. Yani frenin çıkış mili sadece yataklama görevi yaptı. Fren mili ile kaplin arasındaki sürtünmeyi azaltmak için makine yağı kullanıldı. Böylece fren etkisi minimuma indirilmiştir. Üçüncü durum sonucu incelendiğinde kullanıcının belirlenen yörüngede hareket etmesi için gerekli tork 0.05 Nm civarına çekilmiştir.

4.2.Katı Duvar Modelinin Haptik Cihaz Üzerinde Simüle Edilmesi

Bölüm 2.2’de anlatılan katı duvar modellemesi oluşturulan haptik cihaz üzerinde simüle edilmiştir. Serbest hareket modelinde kullanılan hız kontrolü yaklaşımı bu durumda da kullanılmıştır. Sanal ortam modelinde kullanıcının serbest hareket edebileceği bölge olarak ± 1 rad aralığı seçilmiştir.

Serbest hareket bölgesinde ortam yay ve sönüm katsayıları sıfır olacak, ± 1 rad değerlerine ulaşıldığında ise ortam parametreleri değişerek duvar simülasyonu için seçilen değerler geçerli olacaktır.

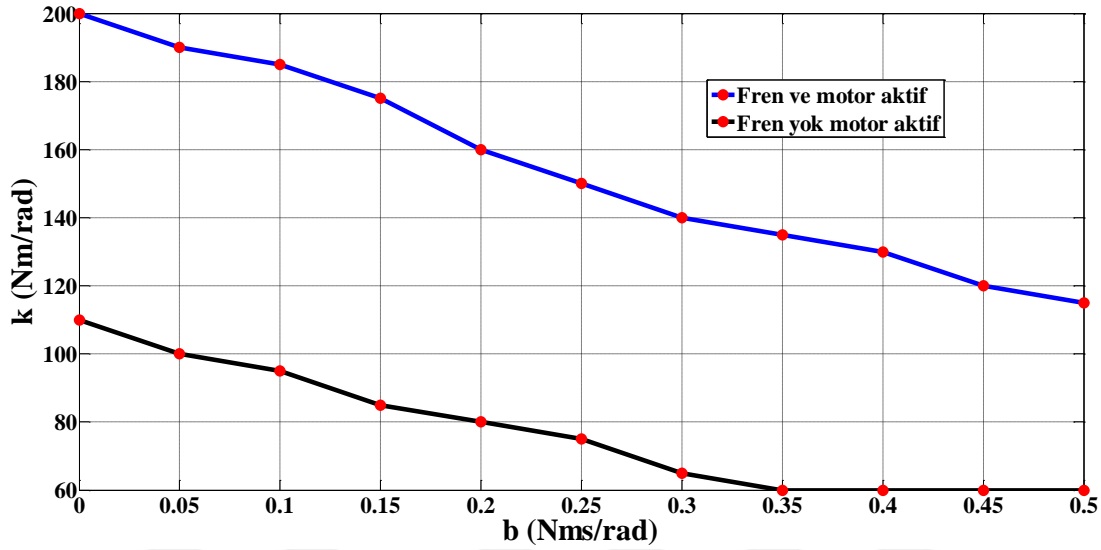
Seçilen farklı ortam parametreleri ile deneyler yapılarak haptik cihazın katı duvar performansı incelenirken aynı zamanda bu performans üzerinde hibrit eyleyici yönteminin etkisi incelenmiştir.

Kullanılan aktif ve pasif eyleyicilerin özelliklerine göre Z-bandı hesabı yapılmıştır. Pasif eyleyicinin deneysel olarak tork verileri incelendiğinde uygulayabileceği maksimum tork değeri 4.7 Nm olarak ölçülmüştü. Aktif eyleyicinin maksimum tork değeri ise motorun teknik özelliklerinden 6,65 Nm olarak hesaplanmıştır. Bu bilgiler ve %81 verim ile çalışan redüktör etkisi göz önüne alındığında hibrit eyleyicili haptik cihazın Z-bandının üst sınırı aktif ve pasif eyleyicinin tork değerlerinin toplamı 10 Nm olarak hesaplanmıştır. Ancak hesaplanan bu üst limit teoriktir. Duvar modeli kararlı bir şekilde simüle edildiğinde oluşacak Z-bandının üst limiti deneysel olarak çalışılmıştır.

4.2.1. Z-Bandı inceleme

Şekil 4.2’de hibrit eyleyicili haptik cihaz için Z-bandı üst limiti deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneyler sırasında Weir, Colgate ve Peshkin [52]’in kullandığı yöntemler kullanılmıştır. Duvar modelindeki atalet elemanı sıfır kabul edilmiştir. Devamında belirlenen eşit aralıklı sönüm değerleri için sistemin stabil olduğu yay sabiti değerleri üst limit tespit edilene kadar test edilmiştir. Bir sönüm değeri için üst limit bulunduğu bir sonraki sönüm değeri için aynı test aşaması tekrarlanarak

belirlenen sönüm değerlerinin tamamı için deneyler yapılmış ve Z-bandı üst limitini temsil eden grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.2 : Z-bandı deneysel incelemesi

Aynı zamanda hibrit eyleyicili sistem kullanıldığında sadece aktif eyleyicili sisteme göre katı duvar simülasyonunun için Z-bandının üst sınırının geliştiği görülmektedir. Hibrit eyleyicili deneyler sırasında fren tamamen açık durumda kullanılmıştır motor frene yardımcı olacak şekilde kontrol edilmiştir. İki sistemin Z-bandı performansı karşılaştırıldığında kararlı katı duvar simülasyonu için aktif eyleyicili sistemin Z-bandı performansının hibrit eyleyicili sistemin yaklaşık %50'si kadar olduğu görülmektedir.

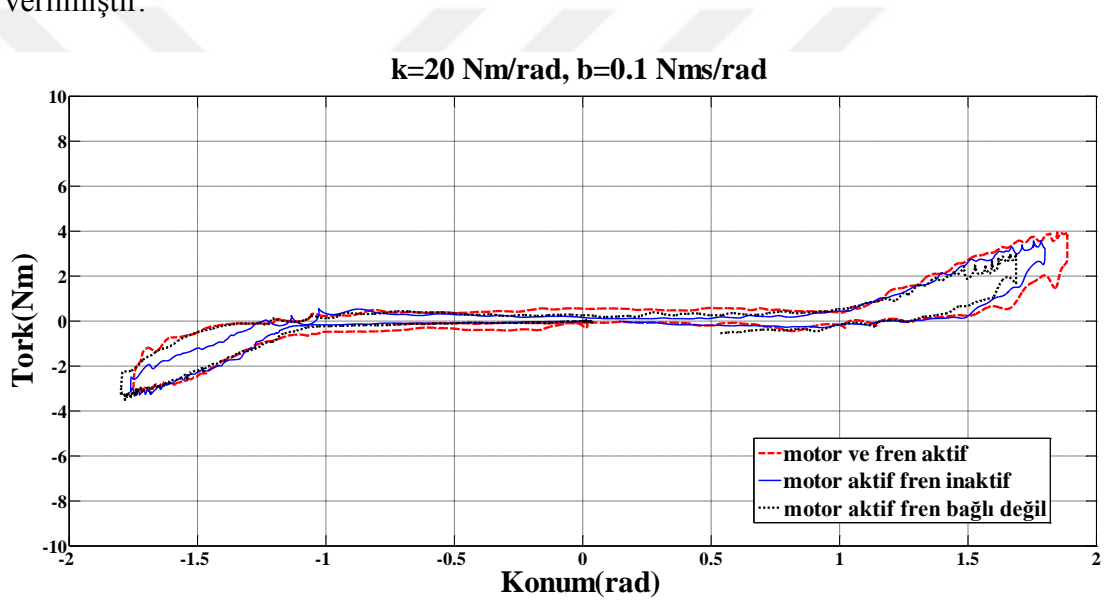
Grafiğin altın kalan sistemin kararlı bir şekilde çalışabileceği bölgeyi temsil etmektedir. Z-bandının alt limiti bölüm 4.1'de serbest hareket simülasyonunda tespit edildiği için kullanılan hibrit eyleyicili haptik sistemin kararlı şekilde çalışabileceği Z-bandı belirlenmiştir.

Hibrit haptik sistemin performansını inceleyebilmek için üç farklı yay-sönüm parametre seti seçildi. Her yay-sönüm seti için de üç farklı deney yapılmıştır. İlk olarak aktif ve pasif eyleyici birlikte kullanılarak hibrit sistem incelenmiştir. İkinci durumda motor ve inaktif halde fren, son durumda ise sadece motor kullanılmıştır. Simüle edilen durumların hepsinde haptik cihazın kontrolü için kullanılan PID kontrolcü kazançları Ziegler-Nichols metodu ile belirlenmiştir. İlk olarak bütün kazançlar sıfır olacak şekilde ayarlanmış ve sistem salınma gelene kadar oransal kazanç artırılmış, sonrasında türevsel kazanç belirlenmiş ve son olarak sistemdeki kararlı hal hatasını giderecek integral kazancı belirlenmiştir.

4.2.2. $k=20$ Nm/rad, $b=0.1$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi

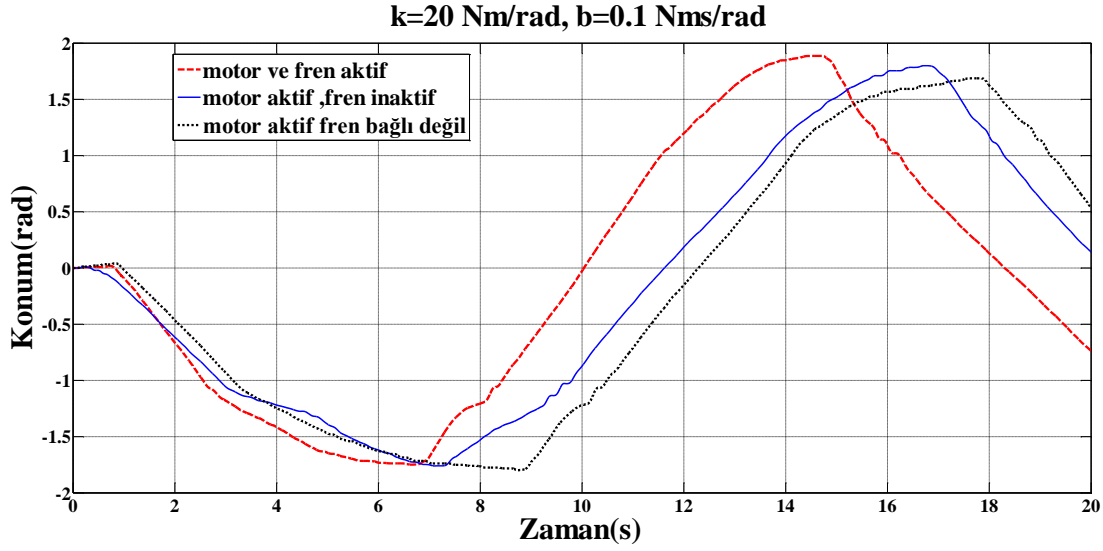
Sanal ortam ± 1 rad olarak konumlandırığımız duvarı simüle etmek için $k=20$ Nm/rad ve $b=0.1$ Nms/rad katsayıları seçildi. Sonrasında yukarıda anlatılmış olan 3 farklı durum için aynı değerler ile deney yapıldı. Deneysel olarak modellenmiş duvarın haptik performansını incelemek için kullanıcıdan serbest hareket deneylerinde izlediği yörüngeyi izlemesi ve ± 1 konumuna ulaştığında duvara kuvvet uygulaması istendi. Deneysel sonuçlardan haptik performans değerlendirilmesi yapılacağı için bütün deneyler boyunca yük hücresinden alınan değerler kaydedilmiştir.

Veri kaybı olmaması için kullanıcıdan deney boyunca haptik cihaz ile kontakt halinde olması istendi. İlk duvar parametreleri için yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.3 : $k=20$ Nm/rad, $b=0.1$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-tork grafiği

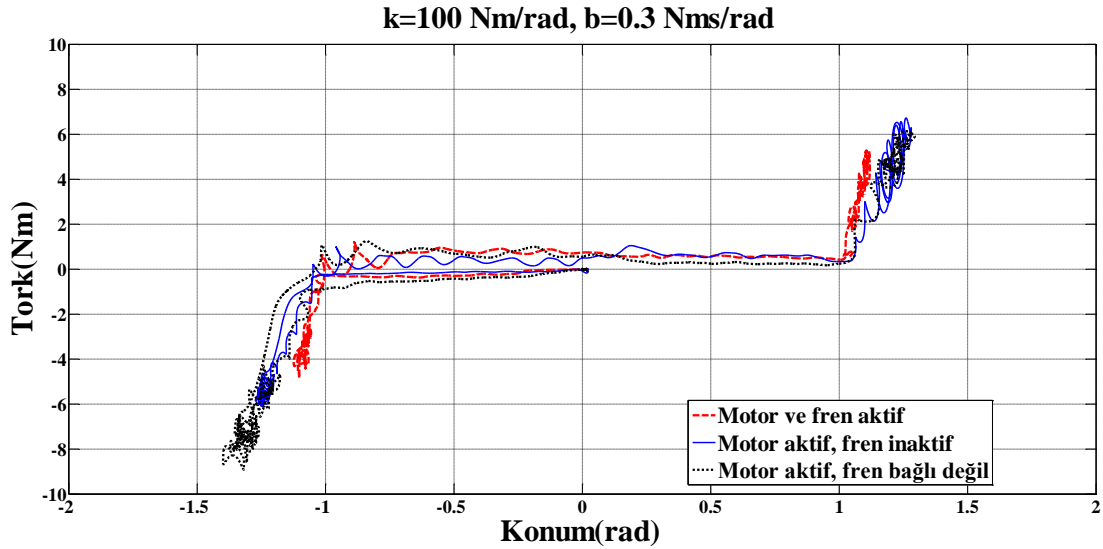
Modellenen duvarın sönüm ve yay katsayıları çok küçük olduğu için kullanıcı ± 1 rad konumlarına geldiğinde bir dirençle karşılaşmıştır ancak ilerlemeye devam edebilmiştir. Duvar direnci kullanıcı ilerledikçe yükselmiştir. Sert bir duvar olmadığı için eyleyici karakteristiği sonuçlar üzerinde çok küçük etkiler göstermiştir. Şekil 4.3’te ise yapılan deneyin konum zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.4 : $k=20$ Nm/rad, $b=0,1$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği

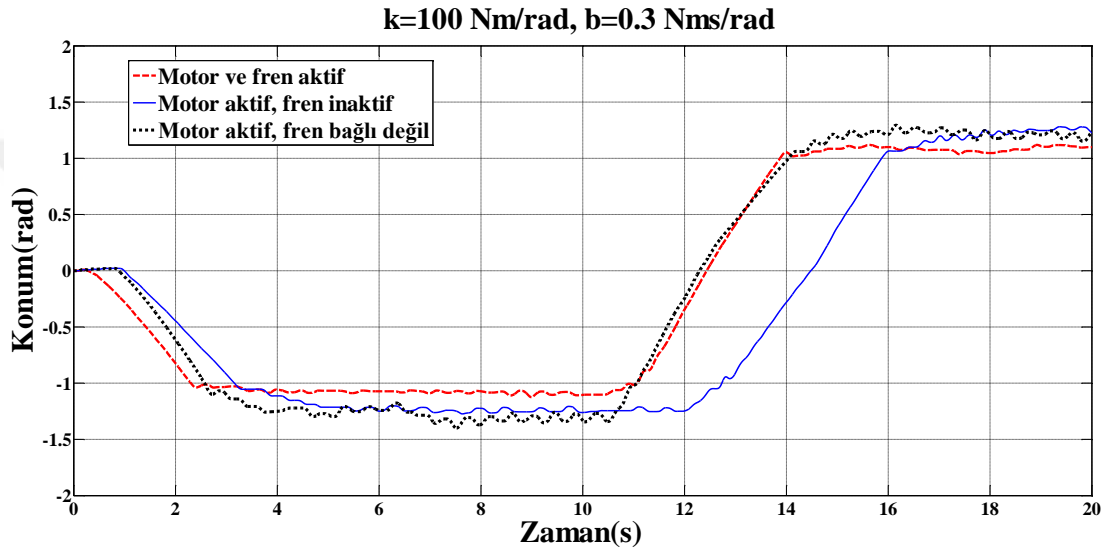
4.2.3. $k=100$ Nm/rad, $b=0,3$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi

Önceki deneyde uygulanan prosedür aynı şekilde uygulandı. Duvar parametreleri $k=100$ Nm/rad , $b=0,3$ Nms/rad olarak değiştirildi. Kullanıcı yine 3 farklı eyleyici kombinasyonu için yapılan deneylerde belirlenen yörüngede hareket ederek duvarı test etmiştir. Deneyler sırasında kaydedilen ölçümlerden çıkan sonuçlar Şekil 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : $k=100$ Nm/rad, $b=0,3$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği

Şekil 4.4 teki sonuçlara göre duvar sertliği arttıkça duvarı simüle eden eyleyici özellikleri daha belirginleşiyor. Kullanıcı önceki deneydeki kadar sanal duvarın içine girmiştir. Ancak duvarın tepkisi aynı konumda ilk duvara göre 2 katına çıkmıştır. Bu durumda eyleyiciler kullanıcıya daha fazla kuvvet uygulamıştır. Frenin kullanılmadığı veya kapalı olduğu durumlarda sistem duvar konumunda kararsızlaşmaya başlamış ve salınma girmiştir. Şekil 4.5'te ise sistemin konum-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde üç farklı durum ile simüle edilen katı duvar modelinde frenin sistemin performansı üzerindeki etkisi görülmektedir.

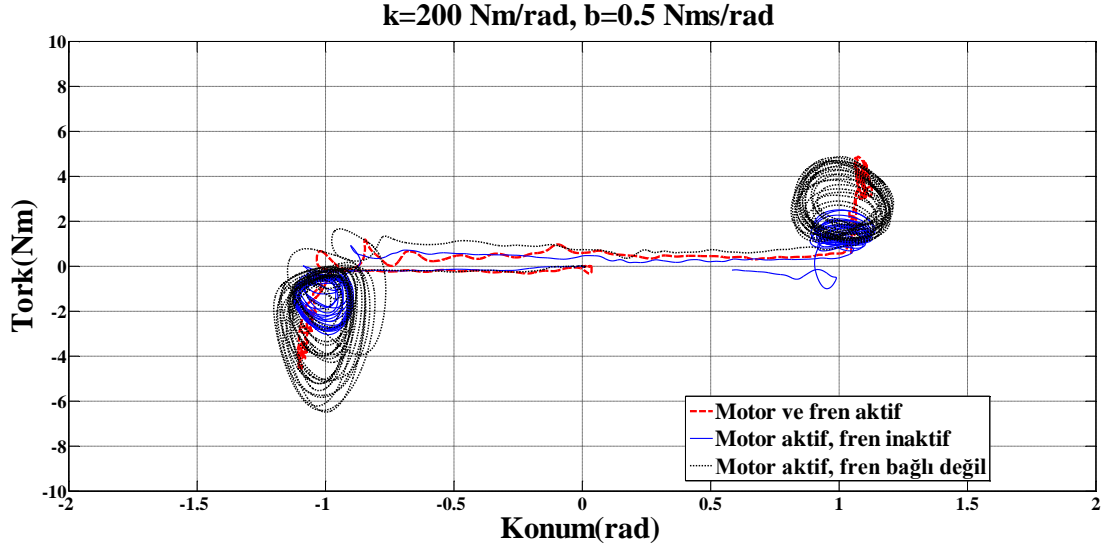


Şekil 4.6 : $k=100$ Nm/rad, $b=0,3$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği

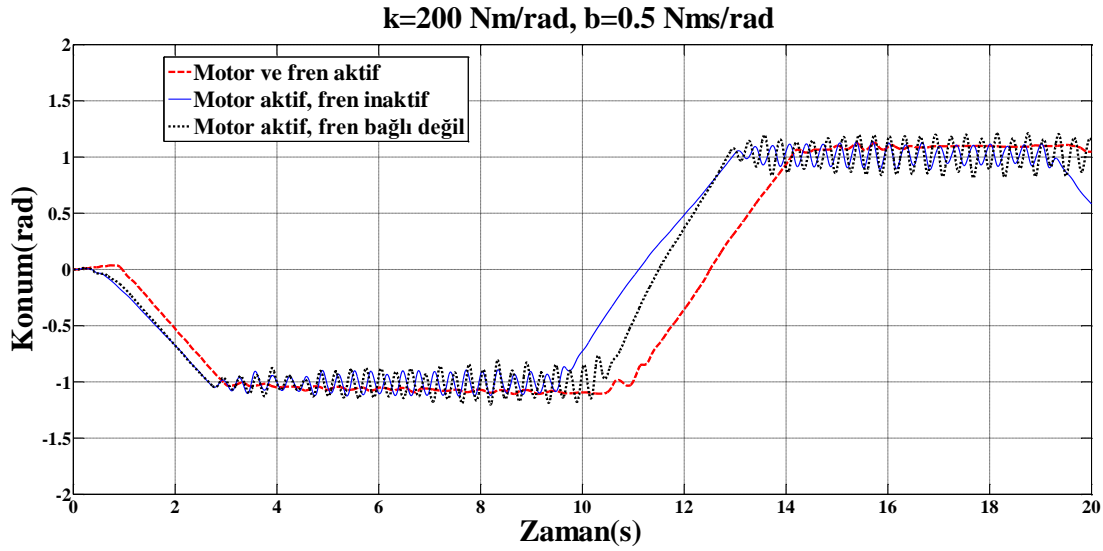
4.2.4. $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad katsayılarının deneysel olarak incelenmesi

Katı duvar modelinin simüle edildiği son durumda $k=200$ Nm/rad ve $b=0,5$ Nms/rad olarak seçilmiştir. Kullanıcı yine üç durum için sistemi test etmiştir. Bu deney serisi hibrit haptik cihaz performansını incelemek için yeterli sonuçları vermiştir. Son deney serisi için kaydedilen veriler aşağıdaki Şekil 4.6 ve 4.7 de verilmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde yeni duvar parametre seti ile duvar simülasyon performansının geliştiği görülmektedir. Kullanıcı duvar konumuna gelip devam etmek istediğinde çok sert bir tepki ile karşılaşmaktadır. Ancak pasif eyleyicinin olmadığı ya da zayıf olduğu durumda sistemde önceki durumda gözlemlediğimiz kararsızlığın arttığı görülmektedir. Öte yandan hibrit eyleyicili sistemin kararsızlığa girmeden artan k ve b değer ile orantılı duvar performansının artışı görülmektedir.



Şekil 4.7 : $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-tork grafiği



Şekil 4.8 : $k=200$ Nm/rad, $b=0,5$ Nms/rad değerleri ve üç farklı durum için konum-zaman grafiği

Şekil 4.7'de ± 1 'deki duvar konumuna dikkat edildiğinde, eyleyici seçiminin duvar performansı üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada aktif ve pasif eyleyiciler kullanılarak tek serbestlik dereceli hibrit haptik arayüz geliştirilmiş ve bu arayüzün oluşturulan deney düzeneği üzerinden simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar ile sanal ortamda modellenen sistemlerin haptik performansı incelenmiştir. Simülasyonların yapılacağı deney düzeneği literatür çalışmalarından yola çıkılarak hibrit eyleyicili yöntemine uygun olarak oluşturulmuştur.

Bölüm 2’de oluşturulacak haptik cihazda simüle edilecek ortam için kullanıcı ile haptik cihazın etkileşimini temsil eden sanal ortam modeli oluşturulmuştur. Model oluşturulurken ideal haptik performansın gereklilikleri incelenmiştir. Akabinde arayüzü oluşturacak sistem bileşenleri Bölüm 3’te detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Sanal ortam modelinin optimum şekilde çalışabilmesi için haptik cihaz üzerindeki ölçüm elemanlarının kalibrasyonları yapılmıştır. Sistemdeki atalet elemanlarının ölçümleri yapılmış ve atalet hesapları Bölüm 3.1.5’te anlatılmıştır.

Bölüm 2.2’de haptik simülasyonu yapılacak ortamların Simulink üzerinde oluşturulan modelleri anlatılmıştır. Bu modellerde ortam parametrelerinden oluşan hareket denklemleri ve kütle yay sönüm sistemi analitik olarak incelenmiştir. Sonrasında ideal haptik performans simülasyonunu inceleyebilmek empedans bandının iki uç noktası hedef olarak belirlendi. İlk olarak serbest hareketi simüle etmek için sanal ortam modeli oluşturuldu. Kullanıcı kuvvetini sıfıra indirebilmek için yük hücresinden alınan ölçüm sistemin ilk girdisini oluşturacak ve bu girdeye göre model çalıştırılarak hız kontrol algoritması devreye girecektir. Bu sayede kontrol modeli sisteminin hareket etmek istediği hız çalıştırır ve kullanıcı bu hareket sırasında sıfır kuvvete yakın ortam simüle edilmiştir. Akabinde maksimum empedansı temsil eden katı duvarı simüle edecek katı ortam modeli oluşturulmuştur. Bu modele göre çalışacak haptik sistemde kullanıcı sanal modelde sınırları belirlenen duvar konumuna ulaştığında haptik çıktı maksimum empedans olacak şekilde ayarlanmıştır.

Bölüm 2’de oluşturulan sanal ortam modelini simüle edebilecek fiziksel sistemim tasarımı, tasarım için gerekli parçaların üretimleri, bu parçalar ile haptik çıktıyı

oluşturmak için kullanılacak eyleyiciler ve ölçüm elemanlarının birleştirilerek haptik cihazın oluşturulması Bölüm 3'te anlatılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinde sanal ortam modellerini simüle ederken uygulanacak deney metodu bölüm 3.3'te anlatılmıştır.

Yapılan bütün çalışmaların amacı haptik cihaz tasarımlarında kullanılan eyleyicilerin aktiflik ve pasiflik özellikleri ile bu özelliklerin haptik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Ve bu çalışmada da hibrit eyleyicili haptik cihazın tek tip eyleyicili haptik cihazlar ile kıyaslandığında daha başarılı haptik geri bildirim oluşturduğunu doğrulamak için deneyler yapılmıştır.

Bölüm 4'te daha önceki bölümlerde fiziksel ve sanal ortamda tasarımı yapılan modellerin deneyleri yapılmış ve sonuçları anlatılmıştır. İlk olarak serbest hareket modeli simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları hibrit haptik cihaz desteği ile yapıldığında hareket için gerekli tork ihtiyacını %95 civarında azaltılabildiğini göstermiştir. İkinci deney serisinde ise katı duvar modeli sadece farklı duvar parametrelili için; aktif eyleyici, aktif eyleyici ve kapalı pasif eyleyici, son olarak hibrit eyleyicili sistemler ile ayrı ayrı simüle edilmiştir.

Sadece aktif eyleyicili duvar modelinde duvarın yay ve sönüm katsayıları yükseldikçe kullanıcı duvara ulaştığında model istenen duvar karakterini yansıtmıştır ancak aktif eyleyici doğası gereği agresif olduğu için duvar konumunda gözle görülür kararsızlıklar oluşmuştur.

Aktif eyleyici ile beraber kapalı halde kullanılan pasif eyleyicinin olduğu durumlarda ise duvar tepkileri sadece aktif eyleyicili duruma göre daha sönümlüdür. Ancak pasif eyleyicinin kapalı hal torku düşük olduğu için duvar parametreleri arttıkça pasif eyleyicinin sağladığı düşük sönüm etkisiz kalmış ve sistem yine kararsızlaşmaya başlamıştır.

Son durumda aktif ve pasif eyleyicili hibrit sistem simülasyonlarında motor duvar konumunda enerji yansıtılma özelliği ile duvar konumunu empedansı daha güzel yansıtırken pasif eyleyici sistemin kararlılığını artırmıştır.

Aktif eyleyiciye bağlı redüktör %81 verimle çalıştığı için motordan alınacak tork çıkışı da aynı oranda etkilenmiştir. Bu etki Z-bandı üst sınırı üzerinde de etkiye neden olmuştur. Ayrıca redüktör içindeki dişli boşlukları serbest ortam simülasyonu ile Z-bandı alt sınırı simüle edilirken tork dalgalanmalarına sebep olmuştur. Farklı deneysel

çalışmlarda daha düşük redüksiyon oranına sahip veya dişli boşluğu daha az olan redüktörler kullanılarak redüktörün Z-bandı performansı üzerindeki negatif etkileri minimuma indirilerek daha kaliteli haptik çıktı elde edilebilir.

Ayrıca kullanılan pasif eyleyicinin tek tarafında çıkış mili bulunduğu için yapılan deneylerde hareket alanı kısıtlı kalmıştır. Aynı sebepten kullanılacak yük hücresi kullanıcı kuvveti torkunu ölçebilmek için kontrol kolunun uç kısmına takılmak zorunda kalmıştır. Tek tarafında çıkış mili bulunan pasif eyleyici yerine iki tarafında da çıkış mili olan pasfi eyleyici kullanıldığı durumda yük hücresi yerine dönel tork sensörü kullanılarak benzer deneyler daha serbest çalışma ortamında tekrarlanabilir.

Z-bandı incelendiğinde seçilen yay ve sönüm katsayılarını daha fazla artırmak kullanılan mevcut kontrolcü değerleri ile mantıklı sonuçlar vermeyeceği için ve alınan sonuçlar ile hibrit eyleyicili sistemin haptik performansını göstermek için yeterli görülmüştür.

Bu çalışmada empedans bandının iki uç noktası hibrit haptik cihaz ile simüle edilmesi üzerine çalışılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı kontrolcüler ve farklı eyleyici modelleri ile bu tez çalışmasında yapılan serbest hareket ve katı duvar simülasyonları yapılarak daha iyi sonuçlar alınmaya çalışılabilir. Z bandının iki ucu simüle edilebildiği gibi farklı karakterdeki bölgeleri de simüle edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] B. Hannaford and A. M. Okamura, "Haptics," pp. 719–739, 2008.
- [2] K. B. Shimoga, W. M. Hands, and W. D. Masters, "of Perceptual Feedback," *Director*, pp. 263–270, 1993.
- [3] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, "Haptic classification of common objects: Knowledge-driven exploration," *Cogn. Psychol.*, vol. 22, no. 4, pp. 421–459, 1990.
- [4] R. L. Klatzky, S. J. Lederman, and V. A. Metzger, "Identifying objects by touch: An 'expert system,'" *Percept. Psychophys.*, vol. 37, no. 4, pp. 299–302, 1985.
- [5] Lederman SJ and K. RL, "Hand movements: A window into haptic object recognition," *Cognitive Psychology*, vol. 19, no. 19. pp. 342–368, 1987.
- [6] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects Three Enabling Observations Three Necessary Criteria for an Effective Interface," 1994.
- [7] D. Feygin and F. Tendick, "A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANTOM T M Haptic Interface and Improvements for High Performance Control so ~," vol. 11, no. 6, 2002.
- [8] S. Phantom, P. Premium, P. Premium, T. Open, and H. Toolkit, "Phantom ® Premium."
- [9] C. S. Ngoo, "Admittance and impedance haptic control for realization of digital clay as an effective human machine interface (HMI) device," no. December, 2009.
- [10] K. Totorkulov and J. H. Ryu, "Stable haptic interaction with admittance type virtual environments based on time-domain passivity approach," *2012 9th Int. Conf. Ubiquitous Robot. Ambient Intell. URAI 2012*, no. 1, pp. 111–113, 2012.
- [11] M. Nabeel, J. Lee, U. Mehmood, A. Jafari, J. H. Hwang, and J. H. Ryu, "Increasing the impedance range of admittance-type haptic interfaces by using Time Domain Passivity Approach," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2015–Decem, pp. 585–590, 2015.
- [12] V. D. L. R. Q, P. Lammertse, E. Frederiksen, and B. Ruiters, "The HapticMaster , a new high-performance haptic interface The HapticMaster , a new high-performance haptic interface," no. January, 2013.
- [13] "e38d1522c179f6fb78fa5ce03aa63f33da6bb2b6 @ www.delfthapticslab.nl." .
- [14] W. Gr and W. Gr, "Dimensions in Mm 1300," p. 1300.
- [15] J. E. Colgate and G. G. Schenkel, "Passivity of a Class of Sampled-Data Systems : Application to Haptic Interfaces," vol. 14, no. 1, pp. 37–47, 1997.
- [16] C. Rossa, J. Lozada, and A. Micaelli, "Stable haptic interaction using passive

- and active actuators,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2386–2392, 2013.
- [17] J. M. Brown, “Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display,” pp. 3205–3210, 1994.
- [18] J. E. Colgate, M. C. Stanley, and J. M. Brown, “Issues in the Haptic Display of Tool Use,” pp. 140–145, 1995.
- [19] R. J. Adams and B. Hannaford, “Stable Haptic Interaction with Virtual Environments,” vol. 15, no. 3, pp. 465–474, 1999.
- [20] B. Hannaford, S. Member, and J. Ryu, “Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces,” vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2002.
- [21] J. Kim, “Stable Haptic Interaction Control Using Energy Bounding Algorithm,” pp. 1210–1217, 2004.
- [22] C. Rossa, J. Lozada, and A. Micaelli, “A new hybrid actuator approach for force-feedback devices,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 4054–4059, 2012.
- [23] O. Khatib, “A New Actuation Approach for Haptic,” vol. 28, no. 6, pp. 834–848, 2009.
- [24] F. O. R. S. Systems, “Steer-by-Wire Systems in Industrial and Off-Highway Equipment.”
- [25] P. Kowol, “From simple experiments to modern mechatronic devices-development of MR fluid applications,” *2015 Sel. Probl. Electr. Eng. Electron. WZEE 2015*, pp. 3–6, 2016.
- [26] X. Zhu, X. Jing, and L. Cheng, “Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 8, pp. 839–873, 2012.
- [27] P. Fauteux, M. Lauria, M. Legault, B. Heintz, and F. Michaud, “Dual differential rheological actuator for robotic interaction tasks,” *2009 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, pp. 47–52, 2009.
- [28] D. Kwon, “In Haptics, the Influence of the Controllable Physical Damping on Stability and Performance,” pp. 1204–1209, 2004.
- [29] C. Rossa, M. Anastassova, and A. Micaelli, “Perceptual Evaluation of the Passive / Active Torque and Stiffness Asymmetry of a Hybrid Haptic Device,” vol. 2, pp. 55–60, 2014.
- [30] C. Rossa, J. Lozada, and A. Micaelli, “Interaction Power Flow Based Control of a 1-DOF Hybrid Haptic Interface,” pp. 151–156, 2012.
- [31] J. An and D. Kwon, “Stability and Performance of Haptic Interfaces with Active / Passive Actuators — Theory,” no. 1994, pp. 1121–1136, 1999.
- [32] J. An and D. Kwon, “Haptic Experimentation on a Hybrid Active / Passive Force Feedback Device,” no. May, 2002.
- [33] M. Park, “A Hybrid Haptic Device for Wide-Ranged Force Reflection and Improved Transparency,” pp. 1015–1020, 2007.
- [34] M. K. O. Malley and A. Gupta, “Passive and Active Assistance for Human

- Performance of a Simulated Underactuated Dynamic Task,” 2003.
- [35] A. H. C. Gosline, V. Hayward, and H. A. Canada, “Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces with Tunable Damping Hardware,” vol. 2007, pp. 164–169, 2007.
 - [36] R. B. Gillespie, “STABLE USER-SPECIFIC HAPTIC RENDERING OF THE VIRTUAL WALL R. Brent Gillespie.”
 - [37] K. Hashtrudi-zaad and S. E. Salcudean, “Analysis of Control Architectures for Teleoperation Systems with Impedance / Admittance Master and Slave Manipulators,” 1999.
 - [38] B. Hannaford, “A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback,” vol. 5, no. 4, pp. 426–434, 1989.
 - [39] N. Hag, “Impedance Control : An Approach to Manipulation ;,” no. March, 1985.
 - [40] J. An, “Virtual Friction Display of Hybrid Force Feedback Interface with Actuators Comprising DC Motor and Magnetorheological Brake,” pp. 3997–4002, 2006.
 - [41] T. Hulin, C. Preusche, and G. Hirzinger, “Stability Boundary for Haptic Rendering : Influence of Physical Damping,” pp. 1570–1575, 2006.
 - [42] O. Baser and E. I. Konukseven, “Utilization of motor current based torque feedback to improve the transparency of haptic interfaces,” *MAMT*, vol. 52, pp. 78–93, 2012.
 - [43] O. Baser, E. I. Konukseven, and H. Gurocak, “Transparency Improvement in Haptic Devices with a Torque Compensator Using Motor Current,” pp. 37–46, 2012.
 - [44] K. Vlachos, E. Papadopoulos, and S. Member, “Transparency Maximization Methodology for Haptic Devices,” vol. 11, no. 3, pp. 249–255, 2006.
 - [45] J. E. Colgate, “Robust Impedance Shaping Telemanipulation,” vol. 9, no. 4, pp. 374–384, 1993.
 - [46] D. A. Lawrence, “Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation,” vol. 9, no. 5, pp. 624–637, 1993.
 - [47] K. B. Fite and J. E. Speich, “Transparency and Stability Robustness in Two-Channel Bilateral Telemanipulation,” vol. 123, no. September, pp. 400–407, 2001.
 - [48] J. J. Gil, E. Sánchez, and J. Juan, “Control Algorithms for Haptic Interaction and Modifying the Dynamical Behavior of the Interface Behavior of the Interface,” no. October 2014.
 - [49] N. L. Bernstein, D. A. Lawrence, and L. Y. Pao, “Friction Modeling and Compensation for Haptic Interfaces *,” 2005.
 - [50] D. Kwon and Y. Woo, “Control of the Haptic Interface with Friction Compensation and Its Performance Evaluation,” pp. 955–960, 2000.
 - [51] J. S. Mehling, J. E. Colgate, and M. A. Peshkin, “Increasing the Impedance Range of a Haptic Display by Adding Electrical Damping,” pp. 0–5, 2005.

- [52] D. W. Weir and M. A. Peshkin, “Measuring and Increasing Z-Width with Active Electrical Damping,” pp. 169–175.
- [53] Y. L. H. A. J. Ryu, “Analogue input shaper for haptic interfaces,” no. June 2008, 2009.
- [54] M. Franken, S. Stramigioli, R. Reilink, C. Secchi, and A. Macchelli, “Bridging the gap between passivity and transparency.”





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhammed Said Yılmaz
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 10/11/1992, Tokat
E-posta : msaidylmz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB ETÜ, Mühendislik Fakóltesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

| Yıl | Yer | Görev |
|-----------|----------|-----------------|
| 2016-2019 | TOBB ETÜ | Eğitim Asistanı |

YABANCI DİL:

- İngilizce
- Almanca (Sınırlı Çalışma Yetkinliği)