

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİREKSİYON SİSTEMİ ÜZERİNDE HAPTİK
GERİ BESLEMELİ KONTROL TASARIMI

AHMET ETHEM DANIŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİREKSİYON SİSTEMİ ÜZERİNDE
HAPTİK
GERİ BESLEMELİ KONTROL TASARIMI

AHMET ETHEM DANIŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

GEBZE
2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND
APPLIED SCIENCES

HAPTIC FEEDBACK CONTROL DESIGN
ON THE STEERING SYSTEM

AHMET ETHEM DANIŞ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

GEBZE

2022



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/01/2022 tarih ve 2022/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/02/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet Ethem Danış'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ÜYE : Doç. Dr. Janset DAŞDEMİR

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada donanım olarak hazırlanmış olan bir direksiyon sistemi üzerinde, sistemin dinamikleri göz önünde bulundurularak haptik (dokunsal) geri beslemeli kontrol tasarımı incelenmiştir. Direksiyon sistemi üzerinde üç farklı kontrolcü tasarlanmıştır ve kontrolcüler arasındaki farklar da çalışmada ortaya konulmuştur. Çalışmadaki amaç, EPAS (Elektrik Destekli Direksiyon) üzerinde bir DC motor yardımı ile uygulanan ve takip edilmesi beklenen bir girdi üzerinden hesaplanacak olan hata değerini oldukça sıfıra yaklaştırmak ve kontrolcü tasarımlarından sonra bir haptik geri beslemeli kontrol algoritması tasarlamaktır. Haptik kontrol algoritması için bir simülasyon ortamı hazırlandıktan sonra sürücüler üzerinde denenmiştir. Simülasyon ortamında, tasarlanan kontrolcülerden biri seçilmiş ve sürücünün yolu takip etmesi beklenmiştir. Algoritma sürücüye destek vermekte ve sürücü yol dışına çıktığında onu uyarmaktadır. Simülasyonu gerçekleştiren sürücüler üzerinde haptik kontrol algoritması için sürüş konforu, tasarım, hissiyat gibi soruları içeren bir anket uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda direksiyonun dinamik modeli, hazırlanmış ve matematiksel olarak ifade edilmiştir. Arzu edilen değeri takip etmesi için PID (oransal-integral-türevsel), gürbüz ve standart adaptif kontrolcüler sistemin üzerine uygulanmıştır. CubeMX, Atollic Truestudio programları ile sistemin gömülü kısmı oluşturulmuş burada sistem döngüsü, frekans ayarları, okuma ve yazma işlemlerinin sırası ayarlanmıştır. MATLAB/Simulink programı kullanılarak sistem üzerinde belirtilen kontrolcüler tasarlanıp sonuçlar tork ve hata bazında 60 saniye için toplanmış ve kıyaslanmıştır. Haptik geri beslemeli kontrol için hazırlanan 120 saniyelik bir sürüş deneyimi sonrası simülasyon ve anket sonuçları sürücülerden toplanmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Haptik geri beslemeli kontrol, EPAS, PID, gürbüz, standart adaptif.

SUMMARY

In this study, on a steering system that is prepared as hardware, the dynamics of this system were taken into consideration the dynamics of the haptic feedback control design. Three different controllers on the steering system are designed and the differences are also tried to be set forth in this study. The goal in this study is to design haptic feedback control algorithm to be calculated on an input via an DC motor assistance on electric power assisted steering (EPAS) and to be calculated via an input expected to be followed. This haptic feedback control has been tried on drivers. One of the controllers designed in this simulation environment has been selected and the driver is expected to follow the path. The algorithm supports the drive and stimulates it when the drive is out of the way. On these simulated drives, a survey was implemented on driving comfort, design, sensations. In this context, the dynamic model of the steering was prepared and mathematically expressed. PID (proportional-integral-derivative), robust and standard adaptive controls are applied on this system. CubeMX, Atollic TruStudio programs, the embedded part of the system is formed here, the order of system cycle, frequency settings, read and write operations are set. The controls indicated on the system using the MATLAB/Simulink program are designed and the results are collected 60 seconds on the torque and error basis. After a 120-second driving experience prepared for haptic part, simulation and survey results were collected from the drivers and interpreted.

Keywords: Haptic feedback control, EPAS, PID, robust, standard adaptive.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU'na,

Tez dönemim boyunca bana elinden gelen desteği veren Arş. Gör. Samet GÜL'e,

Üniversiteden 2021 senesinde ayrılan eski danışmanım olan ve bana mühendislik hayatımda güzel bilgiler ve vizyon katan Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU'na,

Bu çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli kardeşlerim Mehmet Yasin DANIŞ'a, Hatice Kübra TOSUN'a ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Tuğçe DANIŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	5
2. HAPTİK SİSTEMLER	7
3. DİREKSİYON SİSTEMLERİ	10
4. DİNAMİK MODELLEME ve SİMÜLASYON	16
4.1. Enerji Metodu	17
4.2. Newton Metodu	17
4.3. Lagrange Metodu	18
4.4. Sistemlerin Simülasyonu	19
5. KONTROL TEORİSİ	22
5.1. Sistem Kararlılığı ve Sınırlanabilirlik	24
6. DİREKSİYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	26
6.1. Sistemin Tanıtımı	26
6.2. Direksiyon Sisteminin Matematiksel Modellenmesi	29
7. DİREKSİYON SİSTEMİ İÇİN KONTROL ALGORİTMASI	32
7.1. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrol	32
7.2. Gürbüz Kontrol	35
7.2.1. Yüksek Frekans Kontrol	36
7.3. PID Kontrol	38
7.4. Haptik Geri Beslemeli Kontrol	39
8. SİSTEM AYARLARI	41
9. SONUÇLAR	45
9.1. Kontrolcüler Arasındaki Farklara Yönelik Sonuçlar	46

9.2. Haptik Geri Beslemeli Kontrol Sonuçları	51
10. ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	60
EKLER	61



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
$\theta(t)$	: Açı
$\dot{\theta}(t)$	: Açısal hız
$\ddot{\theta}(t)$	: Açısal ivme
b	: Sönüm katsayısı
D	: Sönüm lineer iken enerji dağıtma fonksiyonu
J	: Atalet momenti
M	: Kütle matrisi
N	: Dişli oranı
Q_i	: Sistem üzerine etkiyen genelleştirilmiş dış kuvvet
q_i	: Sistemin pozisyonunu tanımlayan genelleştirilmiş koordinat
r	: Dişli çapı
T	: Sistemin toplam kinetik enerjisi
T_x	: Tork
U	: Sistemin toplam potansiyel enerjisi
u	: Kontrol girdisi
V	: Sistemin hızı ile çarpılan katsayılar matrisi
sn	: Saniye
EPAS	: Elektrik destekli direksiyon sistemleri
HPAS	: Hidrolik yardımcı direksiyon sistemleri
SbW	: Steer-by-Wire

ŞEKİLLER DİZİNİ

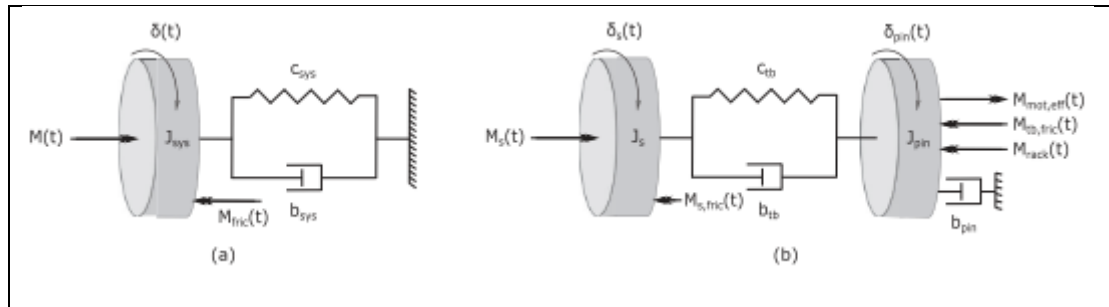
<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: (a) Tipik bir ikinci dereceden mekanik atalet-yay-sönümleyici-sürtünme modeli ve (b) elektrik destekli direksiyon sisteminin basitleştirilmiş 2-DOF modeli.	1
1.2: Johannesson direksiyon sistemi modellemesi.	2
1.3: Nazaruddin tarafından hazırlanan bir direksiyon sistemi modeli.	2
1.4: Sürüş simülatörleri için uyarlanabilir dokunsal geri beslemeli direksiyon donanımı.	3
1.5: Güç yardımcı direksiyon sistemi.	4
1.6: Sürüş simülatörü olarak hazırlanan platform.	4
2.1: FS-Pad.	7
2.2: Cerrahi operasyon simülatörü.	8
2.3: Haptik yardımcı eğitim sistemi.	9
3.1: Direksiyon sistemi.	11
3.2: Mekanik direksiyon sistemi.	12
3.3: Elektrohidrolik direksiyon sistemi.	12
3.4: Hidrolik direksiyon sistemi.	13
3.5: EPAS sistemi.	14
3.6: SbW üzerinde kontrol çalışması.	15
4.1: Segway süren bir insanın gerçek ve mekanik modeli.	16
4.2: Yarış arabasının gerçek ve mekanik modeli.	17
4.3: Sistem modelleme – termal sistemler.	20
4.4: Sistem modelleme – yarım araç modeli.	20
4.5: Uçaktan atlayan bir pilotun simülasyonu.	21
5.1: Bir sistem üzerinde tasarlanmış olan kontrolün blok diyagramı.	22
5.2: Kontrol teori haritası.	23
5.3: Bir sistem üzerinde referans değeri takibi ve hata fonksiyonu.	23
5.4: Sistem kararlılığı.	24
6.1: Mikro-denetleyici STM32F407VET6 kartı.	26
6.2: Debugger (a) ve UART modülü (b).	26
6.3: Güç kaynağı (a) ve RS 775 DC motor (b).	27

6.4:	BTS7960 43A sürücü kartı.	27
6.5:	Enkoder (a) ve kare dalga (b).	28
6.6:	Sistem görünüşü.	29
6.7:	Sistemin oluşturulmuş modeli.	29
6.8:	Sistem parametreleri.	30
7.1:	Uyarlamalı (adaptif) kontrol simulink tasarımı.	35
7.2:	Simulink ortamında gürbüz kontrol tasarımı.	38
7.3:	Simulink ortamında PID kontrol tasarımı.	39
7.4:	Simülasyonu bitiren sürücüler için haptik geri besleme kontrol anketi.	40
8.1:	Sistem donanımı görünüşü.	41
8.2:	Simulink giriş ve çıkış (COM port) ayarları.	42
8.3:	Sistem frekansının ölçümü.	42
8.4:	Osiloskop yardımı ile enkoder verisi okuma.	43
8.5:	UART modülü için COM port ve baud rate seçimi.	44
8.6:	Kontrol çıktısı için satürasyon.	44
9.1:	Yavaşlatılmış sinüs dalgası matematiksel ifadesi.	45
9.2:	Yavaşlatılmış sinüs dalgasının görünümü.	46
9.3:	PID kontrol sonucu oluşan hata çıktısı.	46
9.4:	PID kontrolde kontrol girdisi sonucu.	47
9.5:	Yüksek frekans kontrol sonucu oluşan hata çıktısı.	47
9.6:	Yüksek frekans kontrolde kontrol girdisi sonucu.	48
9.7:	DCAL kontrolcü sonucu oluşan hata çıktısı.	48
9.8:	DCAL kontrolde kontrol girdisi sonucu.	49
9.9:	DCAL kontrolde sistem parametreleri.	49
9.10:	Sürücüler için hazırlanmış haptik sürüş ortamı.	51
9.11:	Örnek bir sürücüden alınmış sürüş sonucu.	52
9.12:	Örnek sürüşten alınan kontrol girdisi sonucu.	52

1. GİRİŞ

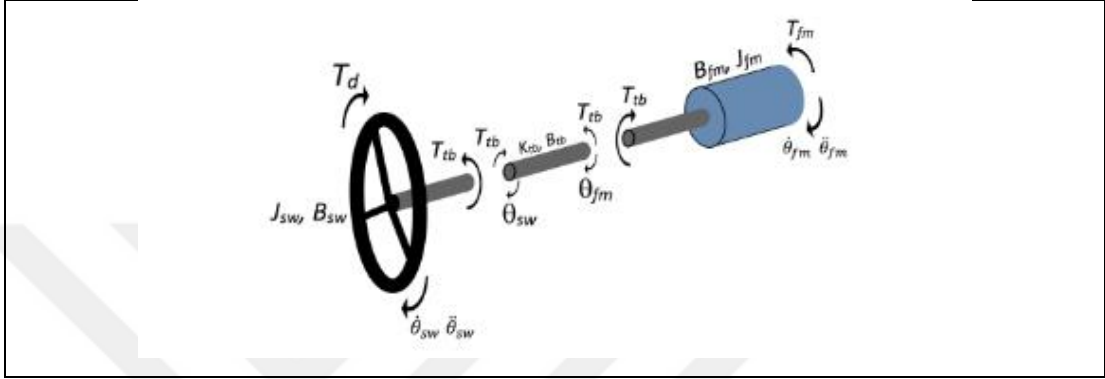
Geçmişten günümüze kullanılan araçlarda, sürüş simülatörlerinde bulunan direksiyon sistemleri için birçok farklı tasarım ve dinamik ortaya sunulmuştur. Bu tasarımlardan en önemlilerinden biri ise EPAS (Elektrik Destekli Direksiyon Sistemleri) 'tır. EPAS'ı diğerlerinden ayıran bir DC motor yardımı ile direksiyonun kontrolünü kolay bir şekilde sağlayabilmektir. EPAS'ta farklı dinamikler için farklı sönüm ve yay katsayıları, farklı atalet momentleri tanımlanmıştır.

Literatürde, haptik sistemler ve kontrolcüler, araç dinamiği, kontrol teorisi, EPAS ve diğer direksiyon sistemleri üzerinde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan kimisi sadece sistemin dinamiğine odaklanırken kimisi ise sistem üzerinde tasarlanabilecek kontrolcülere odaklanmıştır. Araç dinamiği ve kontrolü çok geniş kapsamlı olmakla beraber sürüş konforu, direksiyon sistemleri, hız sabitleme sistemleri vb. birçok konuyu kapsamaktadır. Rajamani kitabında araç dinamiği konusunda birçok farklı konuya değinmiş, araç dinamiğini ve kontrolünü farklı konular ile ele almıştır [Rajamani, 2006]. Barron ise otomotiv sektöründe kullanılan kontrol sistemlerini etkileyen teknoloji olanaklarını incelemiş ve kontrol sistemlerini etkileyen çevresel etkileri, müşteri ve toplumsal sürücülerin isteklerinin etkilerini araştırmıştır [Barron and Powers, 1996]. Chugh EPAS sistemlerini matematiksel olarak modelleyerek bu model üzerinde haptik geri beslemeli kontrolün farklı bir modelini tasarlamıştır. Ardından Şekil 1.1'de verilen modellerin frekans cevapları üzerinden karşılaştırmalar gerçekleştirmiştir [Chugh et al., 2020].



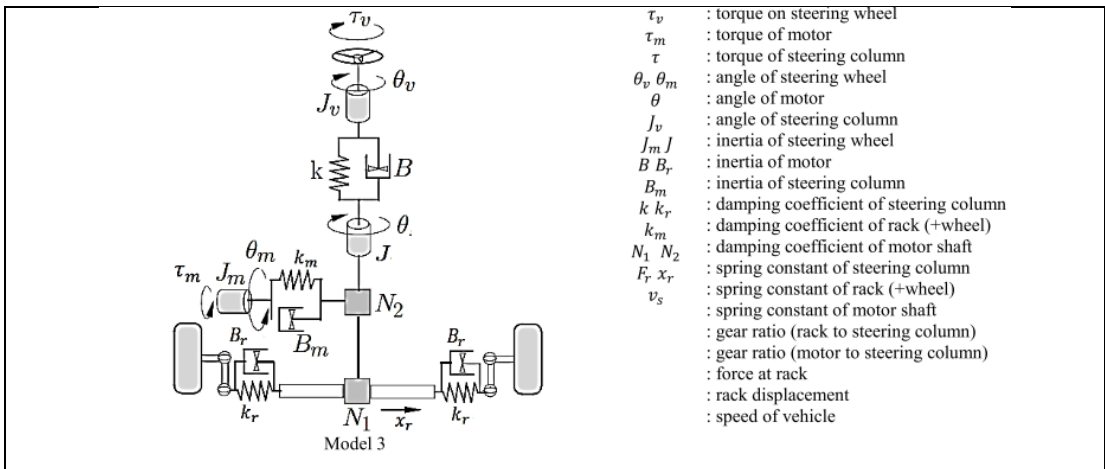
Şekil 1.1: (a) Tipik bir ikinci dereceden mekanik atalet-yay-sönümleyici-sürtünme modeli ve (b) elektrik destekli direksiyon sisteminin basitleştirilmiş 2-DOF modeli.

Genellikle tekerlek sistemiyle birlikte incelenen direksiyon sistemlerinde Johannesson ve Lillberg Şekil 1.2'deki gibi benzer bir sistem üzerinde üç farklı kontrolcü (açık-çevrim, tork-geri besleme, açı geri-besleme) tasarlamıştır. Bu kontrolcileri ise hata, frekans cevapları yönünden kıyaslamış, aynı zamanda kararlılıklarını incelemiştir. Sistemin kararlılığını belirleyen kök dağılımlarını ise pole-zero map üzerinde incelemiştir [Johannesson and Lillberg, 2018].



Şekil 1.2: Johannesson direksiyon sistemi modellemesi.

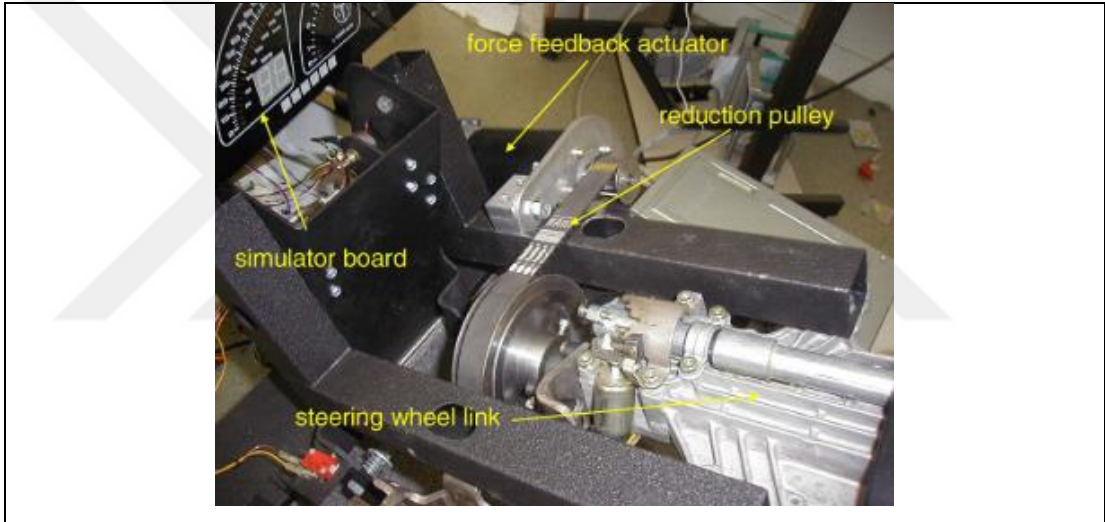
Bilindiği üzere bir sistemi matematiksel olarak modellerken bu sistemi gerçeğe en yakın şekilde modellemenin birçok yöntemi bulunmaktadır. Farklı kabuller yaparak içten yanmalı motora sahip araçların ve elektrikli araçların direksiyon sistemleri üzerine çalışarak 8 farklı model çıkartan Nazaruddin bu dinamik modeller arasında bir kıyaslama yapmıştır ve oluşturduğu modellerden biri Şekil 1.3'teki gibidir [Nazaruddin et al., 2020].



Şekil 1.3: Nazaruddin tarafından hazırlanan bir direksiyon sistemi modeli.

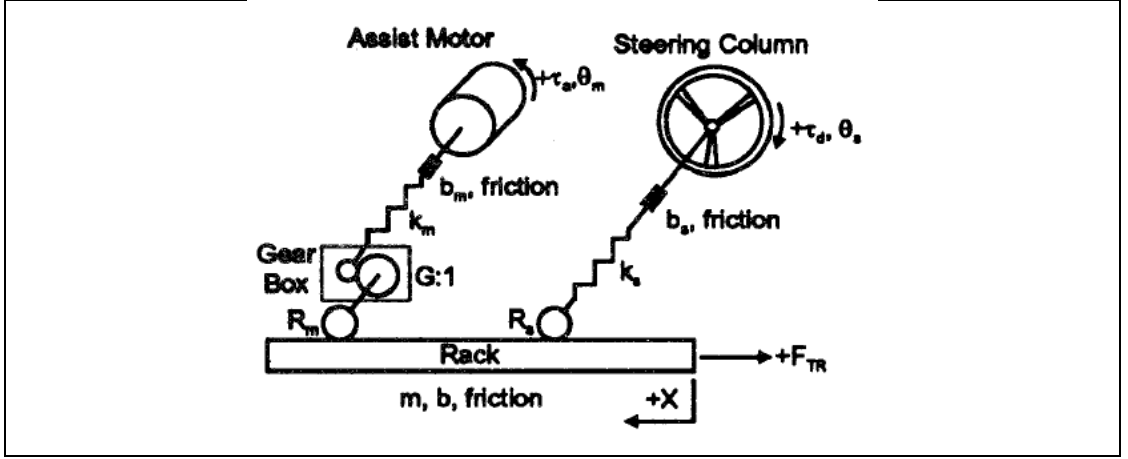
Farklı bir çalışmada ise elektrik destekli direksiyon sisteminin modellenmesi yapılırken, bu sistemlerin normal araçlardan 2-4 kat daha büyük olan geniş araçlarda matematiksel olarak nasıl ifade edildiği, hangi parametrelerin oldukça önemli olduğu sistemin denklemleri çıkartılarak açıkça anlatılmıştır [Nazaruddin et al., 2019].

Özellikle sürücü simülatörlerine çokça uyarlanabilir olan “haptik geri beslemeli kontrol”, sürücülere daha konforlu bir sürüş yaşatmak için birebirdir. Sürüş simülatörleri için uyarlanabilir dokunsal geri beslemeli direksiyon tasarımı gerçekleştirilen bir başka çalışmada yeni bir haptik geri besleme algoritması ele alınmıştır. Şekil 1.4’te görseli verilen sistem ve aracın şeridinin ortasından gitmesini tahmin eden bu algoritma, sürücünün sanal aracı daha iyi kontrol etmesine yardımcı olmuştur [Mohellebi et al., 2009].



Şekil 1.4: Sürüş simülatörleri için uyarlanabilir dokunsal geri beslemeli direksiyon donanımı.

Bir diğer çalışmada sürücüler için bir haptik simülatör ortamı hazırlanmış ve sürücülerin yolun bozucu girdilerini hissetmesi için titreşim koltuğu bu simülatöre entegre edilmiştir. Aynı zamanda direksiyon sisteminde de yolun bozucu girdilerinin hissedilmesi haptik bir kontrol algoritması ile sağlanmıştır [Mohellebi et al., 2001]. Güç destekli bir direksiyon sistemi üzerinde dinamik ve kararlılık analizleri yapan Zaremba ve Davis bir direksiyon sistemini matematiksel olarak modelledikten sonra üzerinde zor koşullar için (düşük hız park, yüksek hız vb.) deneyler gerçekleştirmiştir [Zaremba and Davis, 1995]. Üzerinde çalıştıkları direksiyon sisteminin modeli Şekil 1.5’te gösterilmiştir.



Şekil 1.5: Güç yardımlı direksiyon sistemi.

SbW sistem için haptik sistem tasarımı gerçekleştiren Bajcinca ve arkadaşları, model bazlı (adaptif) iki farklı kontrolcü tasarlayarak bu kontrolcülerin sonuçları üzerinden kıyaslama yapmışlardır [Bajcinca et al., 2004].

Araç simülatörü üzerine yapılan bir çalışmada tam taşıt modeli için direksiyon, teker ve süspansiyon sistemlerinin matematiksel modeli hazırlanmış ve bir platform tasarlanmıştır [Huang and Chen, 2003]. Bu tasarlanan 5 serbestlik dereceli platform Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Sürüş simülatörü olarak hazırlanan platform.

Şerit takip sistemleri günümüzde araçlarda oldukça popüler hâle gelmiş ve üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Kuvvet geribildirimi ile şerit kontrolünü

birleştiren bir çalışmada sistem modellenmiş ve pratiğe entegre edilip sonuçlar “pole-zero map” üzerinde toplanmıştır [Switkes et al., 2006].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Sürüş simülatörleri, direksiyon sistemleri, kontrol algoritmaları ve konuları ile bağdaşmakta ve günümüzde bu konular beraber çokça çalışılmaktadır. Bir sistemde kararlılığı sağlamak amacı ile tasarlanan kontrol algoritmaları pek çok alanda kullanılmaktadır. Bir araç kullanırken sürüş konforu sürücü için en önemli noktalardan biridir. EPAS sistemler ise birçok simülasyon ortamı ve birçok araç için kullanılmaktadır.

Kontrol ile bağlantılı olan sistem modellemesi ise birçok sistem üzerinde kontrol uygulamasını kolaylaştırmakta ve sistemi matematiksel olarak açıklayarak o sistemin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

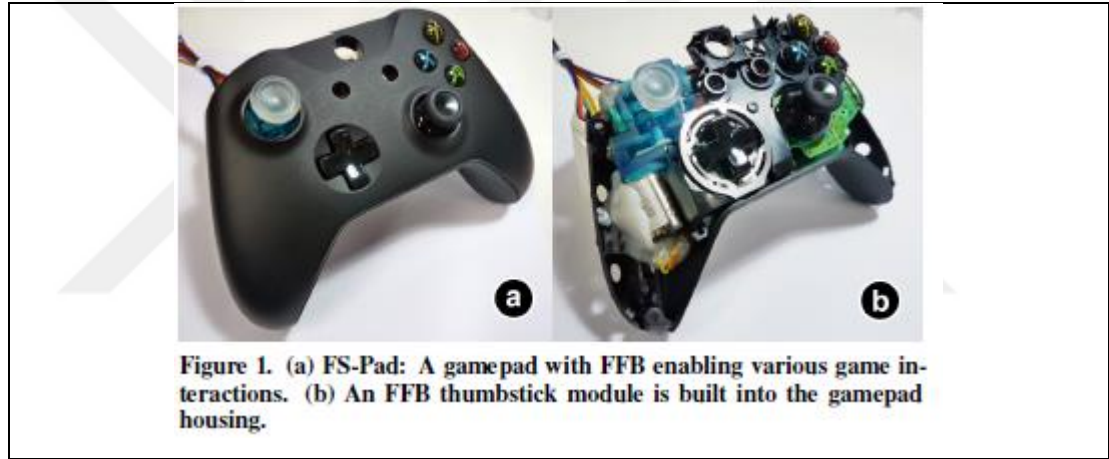
Özellikle günümüzde büyük bir öneme sahip olan haptik kontrol algoritmaları birçok sistemde bulunmakla beraber sistemlerin hepsini gerçek haline yaklaştırmak için kullanılır. Oyun sektöründe başta olmak üzere sürüş, uçuş vb. simülatörlere de uygulanabilen bu uygulamalar, gerçek hayatta olan efektleri kullanıcıya hissettirmektedir.

Bu tez kapsamında, öncelikle ikinci bölümde haptik sistemlerden bahsedilmiş ve haptik sistemlerin günümüzde hangi çalışmalarda yer aldığına değinilmiştir. Üçüncü bölümde direksiyon sistemlerinin tarihi ve türleri detaylı bir şekilde anlatılmış ve EPAS dışındaki direksiyonların avantajlarından dezavantajlarından detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde dinamik sistemlerden, bu dinamik sistemlerin matematikte nasıl ifade edilebileceğinden bahsedilerek birçok örnek gösterilmiştir. Aynı zamanda dinamik modelleme yöntemlerinden bahsedilerek bu matematiksel olarak modellenen sistemlerin simülasyonlarının nasıl yapılabileceği örneklerle beraber anlatılmıştır. Beşinci bölümde kontrol teorisi, mantığı ve sistem kararlılığı anlatılarak kontrol teorisinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Altıncı bölümde tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen direksiyon sisteminin modellemesinin anlatılması hedeflenmiştir. Sistemin parçaları açıkça anlatılmış ve devamında sistem matematiksel olarak, dördüncü bölümdeki yöntemlerden biri kullanılarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede sistem,

üzerinde kontrol algoritması tasarlanmaya hazır hale getirilmiştir. Yedinci bölümde sistem üzerinde tasarlanan kontrol algoritmaları açıklanmıştır. Bu bölüm standart adaptif kontrol, yüksek frekans (gülbüz) kontrol, PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrol algoritmalarının matematiksel ifadelerini ve kararlılık analizlerini içermekte ve bu algoritmaların simülasyon ortamında nasıl hazırlandığını göstermektedir. Aynı zamanda haptik geri beslemeli kontrol mantığı da anlatılmıştır. Sekizinci bölümde sistem üzerinde simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için farklı programlar üzerinde yapılan ayarlamalar ele alınmıştır. Dokuzuncu bölümde ise yapılan ayarlamalardan sonra MATLAB/Simulink programı üzerinde yedinci bölümde tasarlanan kontrolcülerin cevapları toplanmıştır. Aynı zamanda haptik geri beslemeli kontrol için tasarlanan simülasyon ortamı da anlatılmıştır. Yedinci bölümde tasarımları yapılan gülbüz, adaptif ve PID kontrollerin sonuçları hata ve kontrol girdisi yönünden kıyaslanmıştır. Aynı zamanda tezin asıl konusu olan haptik geri beslemeli kontrol tasarımımızın simülasyon ortamında sürücüler üzerinde uygulandıktan sonra toplanan sonuçlarda irdelenmiştir. Onuncu bölüm olan son bölümde ise projenin geliştirilebileceği yönlerinden bahsedilmiştir.

2. HAPTİK SİSTEMLER

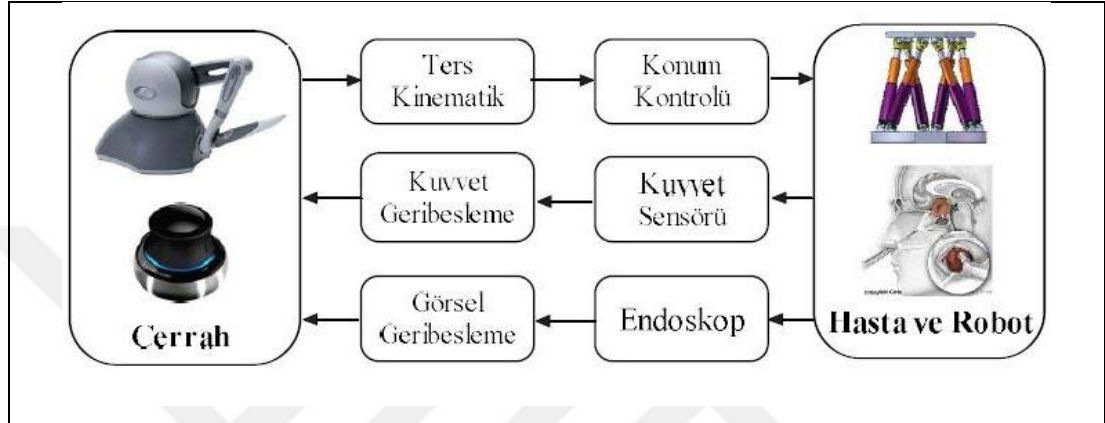
Haptik kelimesi Yunanca “haptikos” sözcüğünden türeyen dokunma ile ilgili demektir. Bu teknoloji 1970’lerde geliştirilmeye başlamış olup kullanıcıların bilgisayar destekli bir sistemle veya uygulamayla etkileşime geçmesini amaçlanmıştır. Tabi ki bu sistemlerin ilk uygulamaları oyun ve eğlence alanlarında gerçekleşmekle beraber çokça ilgi görmüşlerdir. Shim ve arkadaşları FS-Pad olarak adlandırdıkları cihaz üzerinde oyun etkileşimi senaryoları geliştirmiş ve bunları beş temaya ayırmıştır. Şekil 2.1’de görseli verilen aracın bir haptik oyun aracı olarak kullanılmak için yeterli uygunluğa sahip olduğunu göstermişlerdir [Shim et al., 2020].



Şekil 2.1: FS-Pad.

Atari olarak bilinen oyun konsollarında kullanılmış ve oyunlarda bulunan efektleri kullanıcıya ilettiğinden dolayı kullanıcılar tarafından çokça beğeniyi kısa sürede toplamıştır. Bir çalışmada “HaptiCast” adında bir oyunda oyuncular, oyun dünyası ile etkileşim kurmak için kullanabilecekleri, dokunsal olarak etkinleştirilmiş asalardan oluşan cephaneliğe sahip bir sihirbaz rolünü üstlenmektedir. 3D oyun motoru kullanılan bu çalışmada haptik geribildirim entegrasyonu eleştirilmiştir [Andrews et al., 2006]. Günümüzde ise bu sistemler neredeyse her çeşit teknolojik aletin içerisine entegre edilmektedir. Bargerhuff ve arkadaşları geliştirilmiş bir haptik eldiven sistemini tanıtmış ve kullanıcıların, onları haptik eldivenin verimli kullanımı için gerekli beceriler konusunda eğitmek üzere tasarlanmış bir video oyununu nasıl kullandıklarını açıklamıştır [Bargerhuff et al., 2010]. Hemen hemen tüm cep

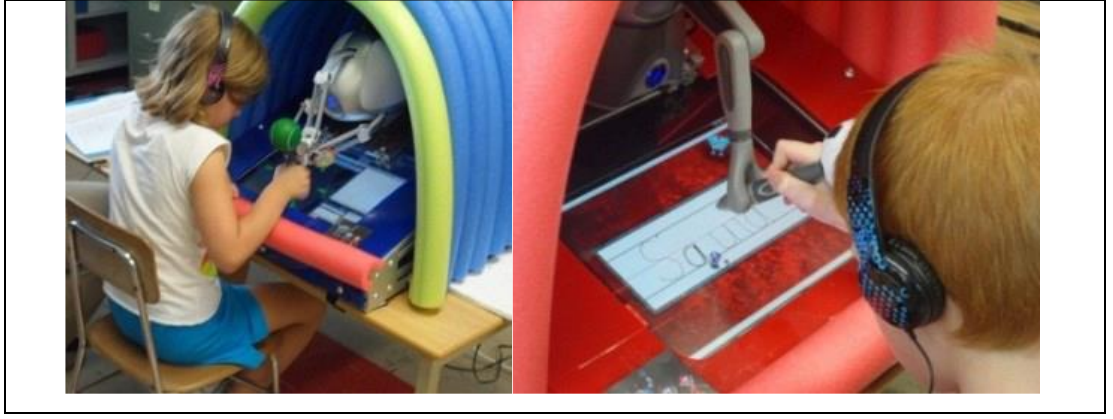
telefonlarında, bilgisayarlarda ve oyun konsollarında bulunan bu sistemler uzaktan ameliyatlarda, cerrahi operasyonlarda da kullanılmaya başlanmıştır [Bozovic, 2008]. Şekil 2.2’de örneği olan çalışmada haptik teknolojisinin cerrah simülatörlerine uygulanabilirliği gösterilmiştir [Almusawi vd., 2016]. Geleceği oldukça açık olan bu sistemler için artırılmış gerçeklik ve benzeri farklı teknolojik alanlar ile kullanımı için çalışmalar devam etmektedir.



Şekil 2.2: Cerrahi operasyon simülatörü.

Tanida ve arkadaşları üç serbestlik dereceli bir robot kol geliştirmiştir. Trokar tek eklemdede 3 dereceye sahiptir ve tendon tahrik sistemi tek eklemdede çok dereceli serbestlik gerçekleştirebilir. Önerilen mekanizmada tendon tahriki uygulanmaktadır ve bu çalışmada yöntemin geçerliliği gösterilmiştir [Tanida et al., 2013].

Bir çalışmada görme engelli kişilerin, bilinmeyen bir alanı keşfetmesi için haptik ve sesli geribildirim sağlayan bir sanal ortam kullanılmıştır. Sanal ortama dayalı uzayın bilişsel haritalanması ve deneğin bu haritayı gerçek uzaydaki görevlerini yerine getirmek için uygulama yeteneği incelenmiştir. Alınan sonuçlarda ise sistemin başarılı bir performans sağladığı görülmüştür [Lahav and Mioduser, 2008]. Benzer bir çalışmada ise ergoterapistlerin rolünü simüle eden haptik yardımcı eğitim (HAT) sistemi, bir uzman veya öğretmen tarafından sunulan referans el yazısının vuruş sırası boyunca kullanıcıların elini yönlendirmektedir. Eğitim verileri çocukların dikkatini çeken 3D oyun ortamı olarak sunulmuştur. Tasarlanan bu ortam 20 kişi üzerine uygulanmış ve sonuçlar rapor edilmiştir [Kim et al., 2013]. Şekil 2.3’te tasarlanan ortam ve uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Haptik yardımcı eğitim sistemi.

Dört serbestlik dereceli robot kol tasarımı yapılan bir çalışmada ATMEGA-328 mikro-denetleyici kullanılarak, bu robotun istenen parçayı istenen yere koyması için haptik teknolojisinden yararlanılmıştır [Rama Krishna et al., 2012].

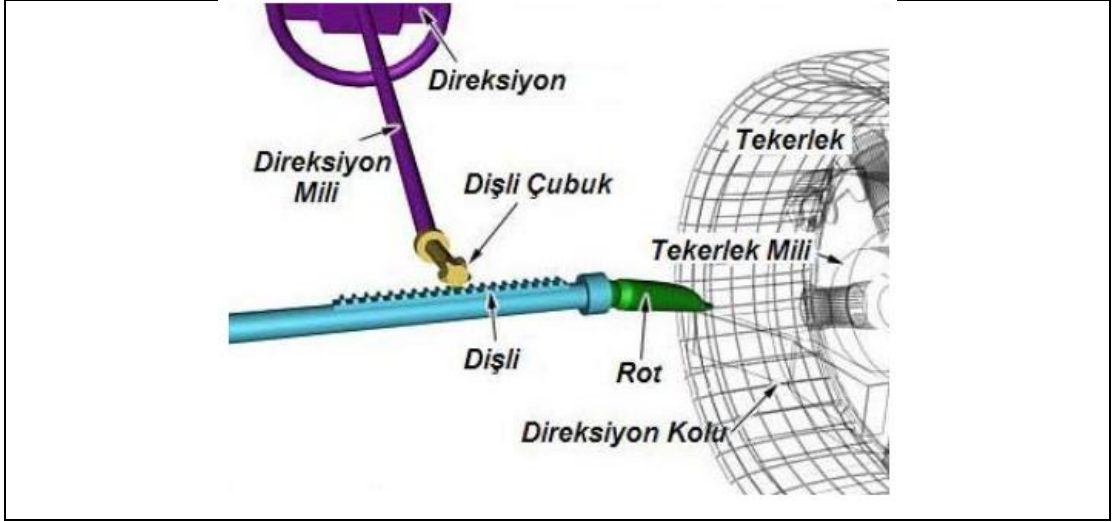
Goodrich ve Quigley yararlı haptik geri bildirimleri öğrenebilen bir öğrenme algoritmasını, makine öğrenmesi yöntemleri ile oluşturmuştur ve bu algoritma otomobil sürücüsüne gerekli olan yol girdilerini iletmeyi öğrenmektedir. Algoritmanın bazı durumlarda faydalı geribildirimleri öğrenebilecek kadar hassas olduğunu, ancak kapsamının insanların hareket etme yetenekleri ile sınırlı olduğunu göstermişlerdir [Goodrich and Quigley, 2005].

SbW sistem üzerinde haptik kontrol algoritması tasarlanan farklı bir çalışmada lastik ve direksiyon simidi dinamik bozukluklarının tahmini için yüksek kazanç genelleştirilmiş orantılı integral (GPI) gözlemciler dikkate alınmıştır. Bu bozulmalar direksiyon simidi ile lastiğin daha iyi çalışması için online olarak iptal edilmiştir. Direksiyon kremayerindeki tahmini bozulmalar tekrar haptik bir arayüz sağlamak amacı ile direksiyon simidine geri beslenmiş ve sonuçlar toplanmıştır [Rodriguez-Angeles et al., 2013].

3. DİREKSİYON SİSTEMLERİ

Günümüzde kullanılan araçların tarihi 1700'lere kadar dayanmakta olup ilk üretilen araçlar sadece 4-5 km yol gidebilmekteydi. Direksiyon sistemlerinin de aynı şekilde bu tarih ile tasarımlarında birçok değişiklik gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sadece küçük bir kol olarak tasarlanan bu direksiyon sistemleri şu an direksiyon simidi şeklini almış ve hala değişime uğramaktadır. Direksiyon sistemi ve otomobil teknolojileri için en önemli konu güvenlik olmuştur ve bu standartlar git gide zorlaştırılmıştır. Direksiyon sistemi ise sürücünün gün boyu sürekli temasta olduğu ve aracı yönlendirdiği bir sistem olduğundan hem konfor hem de emniyet açısından önem arz etmektedir. Aracın idaresini kolaylaştırmak, güvenli bir sürüş sağlamak, sistem parçalarının ömrünü uzatmak ve araçta yol tutuşunu arttırmak için birçok farklı tasarım gerçekleştirilmiştir ve gerçekleştirilmeye devam edilmektedir. Harrer ve Pfeffer direksiyon sistemleri üzerine çalışmalar yaparak direksiyon sistemlerinin tarihini açıkça anlatarak, bu sistemlerin tüm tarzlarına açıklama getirmiş ve matematiksel olarak sistemleri anlatmışlardır [Harrer and Pfeffer, 2017]. Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te görselleri verilen sistemler MEB (Milli Eğitim Bakanlığı) tarafından motorlu araçlar teknolojisi üzerine hazırlanan çalışmada detaylı bir şekilde anlatılmıştır [Web1, 2021].

Sürücü direksiyona bir çevirme kuvveti uygular ve bu çevirme hareketi doğrusal harekete dönüştürülerek tekerlekleri döndürmekte görev yapar. Bu sayede sürücü az iş yaparak aracı kolayca yönlendirebilmektedir. Direksiyon sistemi genel olarak; direksiyon simidi, direksiyon dişli kutusu, rotlar, deveboynu kolları ve tekerlekten meydana gelmektedir ve Şekil 3.1'de bir örneği verilmiştir.

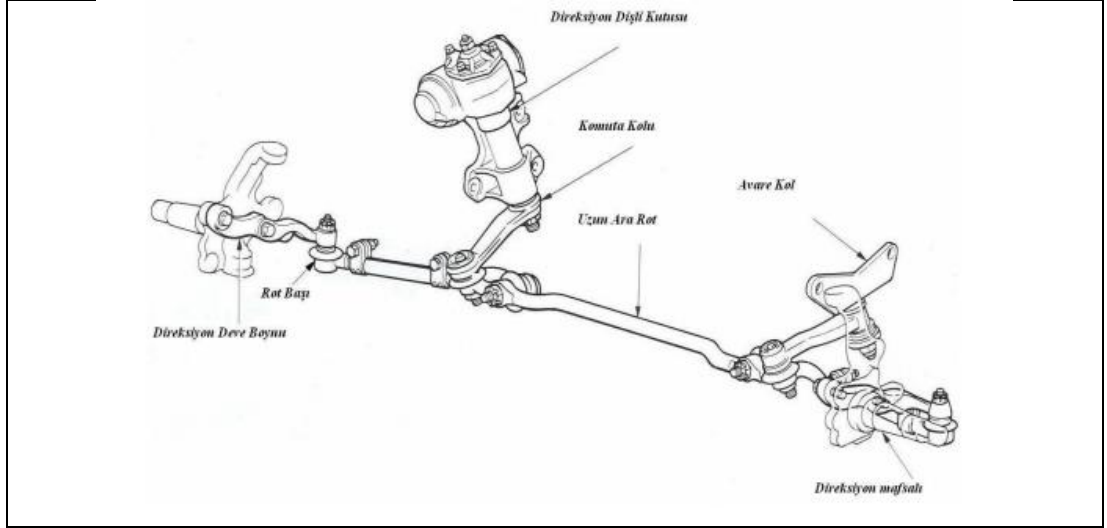


Şekil 3.1: Direksiyon sistemi.

Direksiyon sistemleri üretici tarafından araç hızı, kullanılacağı alan, aracın maksimum yükü ve yol durumlarına göre belirlenir. Direksiyon sistemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilirler.

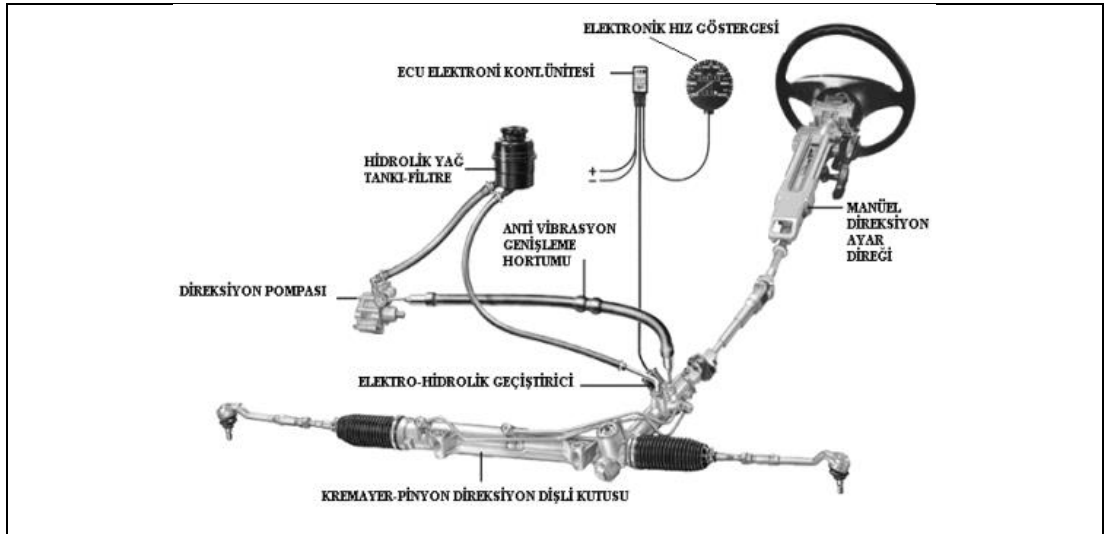
- Mekanik direksiyon sistemleri
- Hidrolik direksiyon sistemleri
- Steer-by-Wire (SbW)
- Yardımcılı mekanik direksiyon sistemleri
 - Hidrolik yardımcı direksiyon sistemleri (HPAS)
 - Elektrik yardımcı direksiyon sistemleri (EPAS)
 - Elektrohidrolik yardımcı direksiyon sistemleri
 - Elektromekanik yardımcı direksiyon sistemleri
 - Dört tekerlek yön kontrol sistemleri

Mekanik direksiyon sistemleri kremayer-pinyon vb. mekanik güç aktarımları ile direksiyondan aldığı tahriki tekerlere iletir ve tekerleri rot başları yardımı ile bu şekilde döndürür. Şekil 3.2’de mekanik direksiyon sistemine bir örnek verilmiştir.

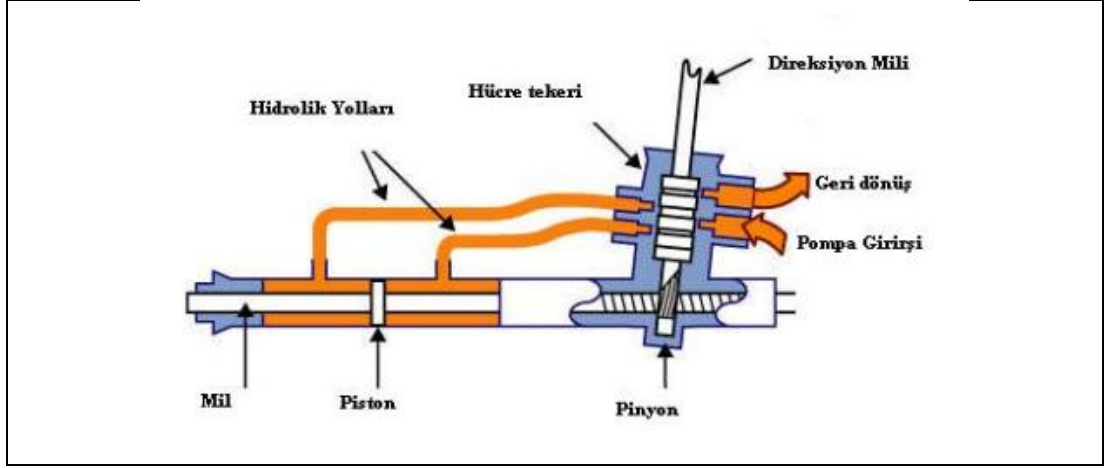


Şekil 3.2: Mekanik direksiyon sistemi.

Elektrohidrolik direksiyon sistemleri ise ECU (elektronik kontrol ünitesi)’dan aldığı komuta göre direksiyon sistemini yumuşatan ve direksiyonu döndüren, sürücüye destek olan yardımcı bir sistemdir. Literatürde de üzerine birçok çalışma gerçekleştirilen HPAS sistemler için sistem modellemeleri ve kontrol çalışmaları yapılmıştır. Sistem üzerinde manevra ve sürüş çalışmaları gerçekleştirilmiştir [Kokotovic et al., 1999]. Şekil 3.3’te bir örneği verilen elektrohidrolik direksiyon sistemleri yerine genelde Şekil 3.4’te verilen hidrolik direksiyon sistemleri tercih edilir.



Şekil 3.3: Elektrohidrolik direksiyon sistemi.

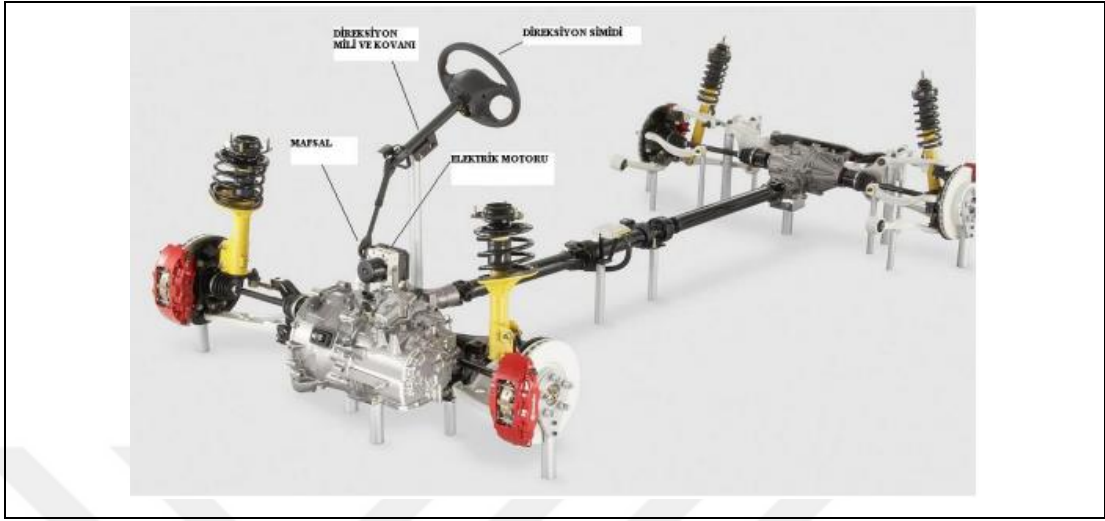


Şekil 3.4: Hidrolik direksiyon sistemi.

Bu tercihin sebebi ise Şekil 3.4'te verilen hidrolik sistemin direkt olarak direksiyon simidinden (sürücünden) alınan girdiye göre sistemi harekete geçirmesi ve tekerlerden direksiyona iletilen bozucu yol girdilerine karşı daha net cevaplar üretebilmesi, daha konforlu bir sürüş sağlamasıdır. Xue ve Watton hidrolik direksiyon sistemini pnömatik yükleme sistemi ile birleştiren bir test donanımı tasarlamış ve deneysel değerler ile simülasyon sonuçlarını kıyaslamıştır [Xue and Watton, 2005].

EPAS sistemlerinde direksiyon sistemine bir elektrik motoru destek olur. Bu elektrik motoru sisteme bir sonsuz dişli yardımı ile bağlı olmakla beraber sürücüye destek amaçlı konumlandırılmıştır. Hidrolik direksiyon pompaları bazı durumlarda yetersiz kalmakla beraber her zaman pompa bütün hızı ile çalışmaktadır (yüksek hızlarda bile). En çok takviye düşük hızlarda gerekmede ve hidrolik pompa gücünü motordan aldığından yetersiz kalmaktadır. EPAS sistemleri yerden tasarruf sağlamakla beraber hareketi elektrik motoru ile sağladığından bu problemler ile karşı karşıya kalmayı engellemekte, düşük hızlarda bile maksimum konforu, minimum güç gerekliliği sağlamakta ve manevraları sağlamlaştırmaktadır. HPAS ile EPAS'ı baz alan çalışmada sistemlerin modelleri hazırlanmış ve simülasyonlar gerçekleştirilerek iki sistem kıyaslanmıştır. EPAS'ın sürücü ve sürüş konforu üzerinde geliştirilmeye daha açık bir sistem olduğu yönünde yorumlar yapılmıştır [Baharom et al., 2013]. Literatürde EPAS sistemleri ile ilgi birçok araştırma bulunmaktadır. Hidrolik sistemlerin EPAS'a göre birçok dezavantajı bulunduğunu söyleyen başka bir çalışmada EPAS için bir model geliştirilmiştir. Kontrol tasarımı gerçekleştirilen sistem üzerinde kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar kıyaslanmış ve bu sistem yardımı

ile sürüşün geliştirilebileceği görülmüştür [Kim and Song, 2002]. Şekil 3.5'te EPAS sistemini oluşturan elemanlar ve sistemin bütünü gösterilmiştir.



Şekil 3.5: EPAS sistemi.

Direksiyon performans endeksleri için bir araç modeli ve direksiyon modelinin beraber önerildiği bir çalışmada, sistemin frekans cevapları üzerinden EPAS'ın her parametresinin sistem üzerindeki etkisi araştırılmış ve bu parametrelerin optimizasyonu için bir optimizasyon modeli sunulmuştur [Liu et al., 2003]. Benzer bir çalışmada kontrol ve hissiyat sorunları ele alınmış, doğrusal olmayan bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolör direksiyon torku ve hissini de içerisinde barındırmış ve sistemin direksiyon hissini arttırmıştır [Zaremba et al., 1998]. EPAS için parametre tahmini, gürbüz kontrol tasarımı ve performans analizi yapılan başka bir çalışmada bu tasarlanan algoritmalar PID kontrol yardımıyla gözlemlenmiş ve referans değeri izleme konusunda performansın arttığı görülmüştür [Nguyen et al., 2019].

SbW sistemler ise günümüz teknolojisine direksiyon sistemlerinin ayak uydurmuş versiyonlarıdır. Direksiyon simidi ile tekerler arasındaki tüm mekanik bağlantıları ortadan kaldıran SbW sistemler, direksiyon simidinden aldığı açısal bilgiye işleyerek bir elektrik motoru yardımı ile tekerlere iletmektedir. Sistem yerden çok yüksek miktarda tasarruf sağlamakla beraber bundan öncesinde ve şu anda birçok akademik çalışmanın ana konusu olmaktadır. Bir çalışmada SbW sistem üzerinde dinamik model oluşturulmuş, model üzerinde kontrol çalışması gerçekleştirilmiş ve bu gerçek bir SbW sistem üzerinde uygulanmıştır. Sistem

modellemesine, motorun iç yapısından kaynaklı olan dinamikte eklenmiştir. Hata sonuçları bilgisayar ortamında toplanmış ve paylaşılmıştır [Rodriguez-Angeles and Garcia-Antonio, 2014]. Bu çalışmada anlatılan SbW sistem görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.

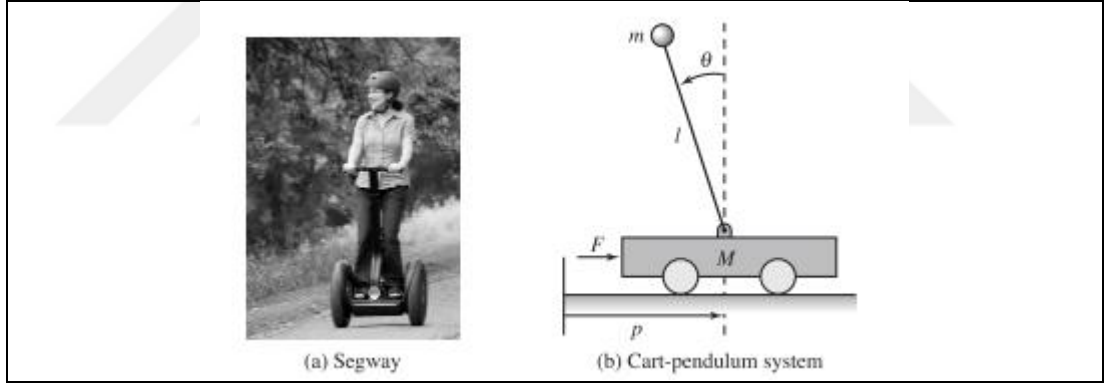


Şekil 3.6: SbW üzerinde kontrol çalışması.

SbW üzerine yapılan ve hesaplanan tork kontrolüne odaklanılan bir çalışmada, test platformu hazırlanmış ve simülasyon ortamı ile desteklenmiştir. Direksiyon torku hesaplamasının modüler yapısı, direksiyon hissinin yüksek derecede özelleştirilebilirliğini sağlama ve böylece her sürücüye çok sezgisel bir şekilde tercih ettiği direksiyon hissinin sağlama amacına sahiptir. Direksiyonun ürettiği tork seviyesi, ne kadar uygun taklit ettiği objektif olarak değerlendirilmiştir [Fankem and Müller, 2014]. SbW sistemi üzerinde empedans kontrolüne odaklanılan bir başka çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak tork sensörü kullanılmadan bir kontrol tasarımı yapılmıştır. Donanım olarak da hazırlanan direksiyon sistemi üzerinde direksiyonun açısal hızı üzerinden bir hata değeri oluşturulmuş ve takibi simülasyonlar yardımı ile sağlanmıştır [Cheon and Nam, 2017].

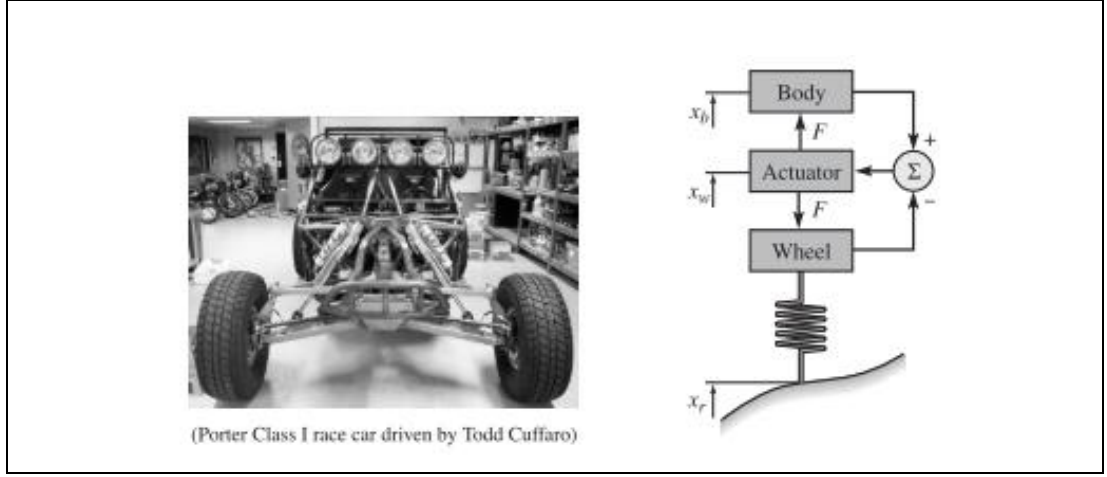
4. DİNAMİK MODELLEME ve SİMÜLASYON

Dünya üzerinde her şey bir hesap üzerine gerçekleşmektedir. Mühendisler ise bu hesabı birçok yönü ile düşünerek mühendislik yapmaktadırlar. Dinamik modeller günümüzde sistemlerin matematiğe yansıtılmış halleridir ve matematiksel yöntemlerin kullanılmadığı bir modelleme düşünülmesi imkansızdır. Gerçek mühendislik sistemleri üzerinde sistem dinamiğini etkileyen birçok farklı tahmin edilmesi zor dış etkenler, parametreler bulunmaktadır. Dolayısı ile mühendislik sistemlerini belirli yaklaşımlar ile modellemenin amacı dış etkenleri, parametreleri analiz etmek ve en optimum tasarım için çözümleri bulmaktır. Bu dinamik modeller mühendislik alanlarında tasarımda, üretimde vb. alanlarda çok büyük avantajlar sağlamaktadırlar. Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de örneği verilen sistemlerin gerçek ve mekanik modelleri açıklanmaya çalışılmıştır [Astrom and Murray, 2008].



Şekil 4.1: Segway süren bir insanın gerçek ve mekanik modeli.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bu tarz matematiksel modeller o sistem üzerine çalışan kişilerin işlerini kolaylaştırmak ile gerçek bir sistemin üzerine gerçekte etki eden faktörlerin anlaşılmasına olanak sağlamakta ve sistemleri basitleştirmektedir. Bu tarz yaklaşımlar özellikle daha karmaşık sistemler üzerinde kontrol çalışmaları konusunda çokça yardımcı olabilmektedir. Farklı bir yaklaşımda Şekil 4.2’de görüldüğü bir yarış arabası matematiksel olarak modellenmiştir.



Şekil 4.2: Yarış arabasının gerçek ve mekanik modeli.

Dinamik modellemenin literatürde birçok yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ikisi; Enerji ve Newton metotlarıdır.

Modellemede, bu metotlardan biri ile elde edilen hareket denklemleri (diferansiyel denklemler), transfer fonksiyonu ve durum uzayı denklemlerine dönüştürülebilir [Baruh, 2015]. Ayrıca sistem denklemlerini elde ederken Lagrange metodu da kullanılabilir. Fakat birçok mühendislik sistemi için analitik çözüm elde etmek mümkün olmayabilir. Değişik yöntemler ile elde edilen nümerik çözümler analizlerde kullanılmaktadır.

4.1. Enerji Metodu

Bir sistemin hareket denklemi enerji metodu yardımıyla oluşturulabilir. Hareket eden bir değişmeyen sistemde toplam mekanik enerji, kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamı ($T + U$) şeklinde ifade edilir.

$$\frac{d}{dt}(T + U) = 0 \quad (4.1)$$

4.2. Newton Metodu

Newton'un ikinci yasası, bir parçacığa bir kuvvet etki ettiği zaman, parçacığın kuvvetle doğru orantılı olacak bir büyüklükle kuvvet yönünde hızlanacağını belirtmektedir. Hareket denkleminin çıkartılmasında Newton kanununa göre kütlenin

ivme ile çarpımı aynı kütle üzerine etki eden toplam kuvvetlere eşittir ve ivmenin yönü kuvvetin etkidiği yöndedir.

Doğrusal hareket yapan sistemler için;

$$m\ddot{x} = \sum(kuvvetler)_x \quad (4.2)$$

açısal hareket yapan sistemler için;

$$J\ddot{\theta} = \sum(momentler)_\theta \quad (4.3)$$

denklemleri kullanılır. Bir çalışmada üzerinde kontrol uygulaması çalışılan bir EPAS için gerekli olan dinamik denklemler Newton yaklaşımı ile çıkartılmış, kontrol tasarımlarında yine bu denklemlerden faydalanılmıştır [De Wit et al., 2001].

4.3. Lagrange Metodu

Lagrange metodu sistemin enerjilerini ifade etmekte ve bununla birlikte hareket denklemlerinin elde edilmesinde kullanılır. Belirli karmaşık fiziksel sistemlerin modellenmesinde Lagrange metodu avantaj sağlamaktadır. Lagrange denklemi q_i genel koordinatlarında aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} \quad (4.4)$$

Sistemde sönüm yoksa denklem şu hali alır:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} \quad (4.5)$$

Lagragian fonksiyonu ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$L = T - U \quad (4.6)$$

Lagragian denklemini de kullanarak Lagrange denklemi (4.7)'deki gibi gösterilebilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (4.7)$$

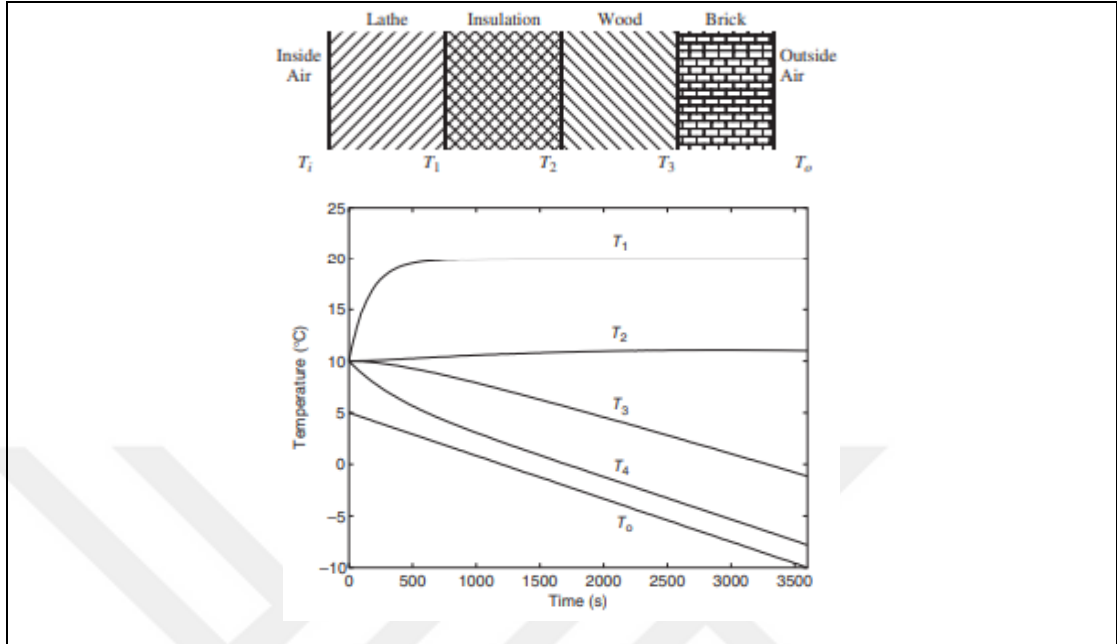
Bu sisteme ve direksiyon sistemlerine örnek olarak çalışmalar mevcut olmakla beraber bir HPAS sisteminin modellenmesi ve gerçek sistem üzerinde simülasyonu, lagrange denklemleri kullanılarak elde edilmiş ve sonuçlar toplanmıştır [Du et al., 2019]. Benzer bir çalışmada ise modelleme ve pozisyon kontrolü yapılan bir EPAS için matematiksel modellerin çıkartılmasında lagrange denklemleri kullanılmış ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir [Govender and Müller, 2016].

4.4. Sistemlerin Simülasyonu

Herhangi bir sistemin denklemleri elde edildikten sonra bu sistem simülasyon için hazır hale gelmiş demektir. Burada önemli olan bu matematiksel denklemleri bir ara yüz ve bilgisayar yardımı ile oluşturmaktır. Devamında ise sistemi üretmeden veya tamamlamadan sistemin gerçeğe çok yakın bir şekilde davranışları izlenebilir ve devamında simülasyonlardan alınan veya alınacak olan sonuçlara göre tasarımlarda, üretimlerde, üretim geliştirmelerde güzel sonuçlar elde edilebilir. Simülasyonlar günümüzde sistemler üzerinde çokça önemli rol oynayarak mühendisler için en önemli olan zamanı kısaltarak sonuca daha kolay ulaşılmasını sağlamaktadır. Fırçasız DC motorların kontrolü ve simülasyonuna odaklanan bir çalışmada motorun dinamik modeli oluşturulduktan sonra MATLAB/Simulink programında motorun simülasyonları gerçekleştirilmiştir [Baldursson, 2005]. Farklı bir çalışmada ise bir DC motor yardımı ile açısız hareketi sağlanan EPAS için dinamik model hazırlanmış, matematiksel olarak ifade edilmiş ve MATLAB/Simulink programına entegre edilerek simülasyonları gerçekleştirilmiştir [Chatterjee et al., 2013].

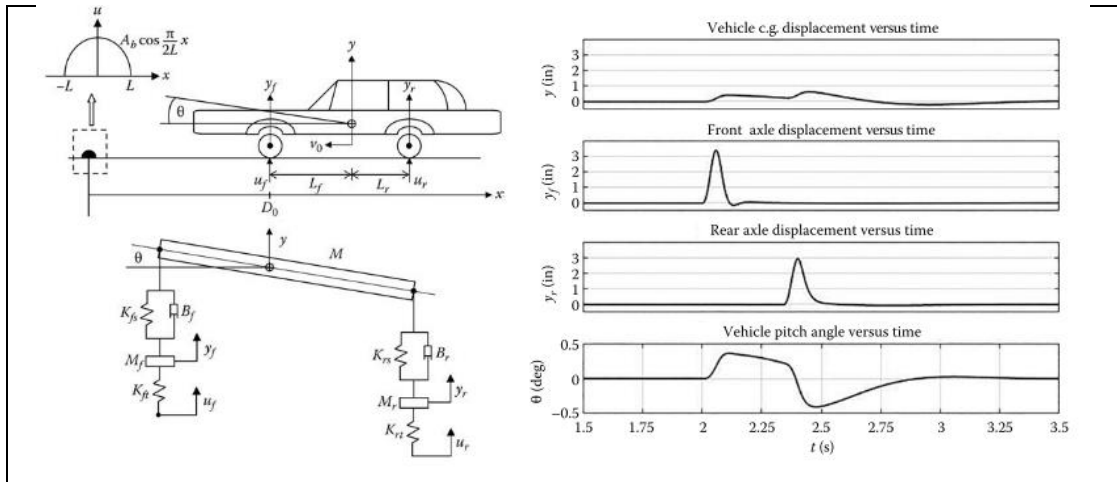
Bir gerçek sistemin simülasyon çeşitleri günümüzde çokça artmakla beraber, mekanik, elektriksel vb. olacak şekilde ana gruplara ayrılabilir. Bu ana grupların altında ise, termal, akış, akustik, mekanik dayanım vb. şeklinde analizler bulunurken bir yanda da kontrol simülasyonları vb. tasarlanan sistemin nasıl çalışacağına dair hazırlanan simülasyonlar mevcuttur. Simülasyonlar için birçok farklı program kullanılırken MATLAB/Simulink programı akademik çalışmalarda çokça

kullanılmakta ve bu programda yapılacak analizler için kullanım kılavuzu niteliği taşıyan birçok eser bulunmaktadır.



Şekil 4.3: Sistem modelleme – termal sistemler.

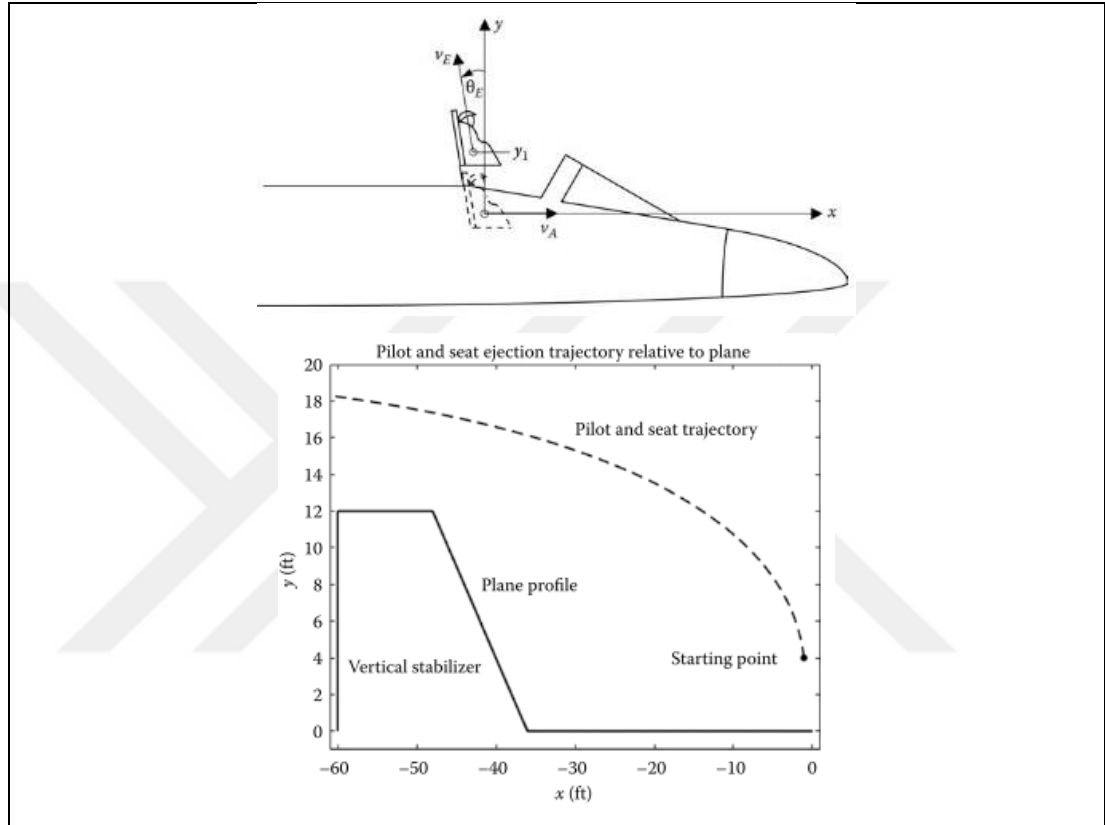
Şekil 4.3’te görüldüğü gibi termal bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve sistemde bulunan farklı sıcaklıklarının zaman içerisindeki değişimi grafikler ile ifade edilmiştir [Palm, 2014].



Şekil 4.4: Sistem modelleme – yarım araç modeli.

Şekil 4.4'te görseli verilen sistemde yarım aracın matematiksel modeli çıkartılıp simülasyonları gerçekleştirilirken Şekil 4.5'te ise bir pilotun uçaktan enjekte edilmesi simüle edilmiştir [Klee and Allen, 2018].

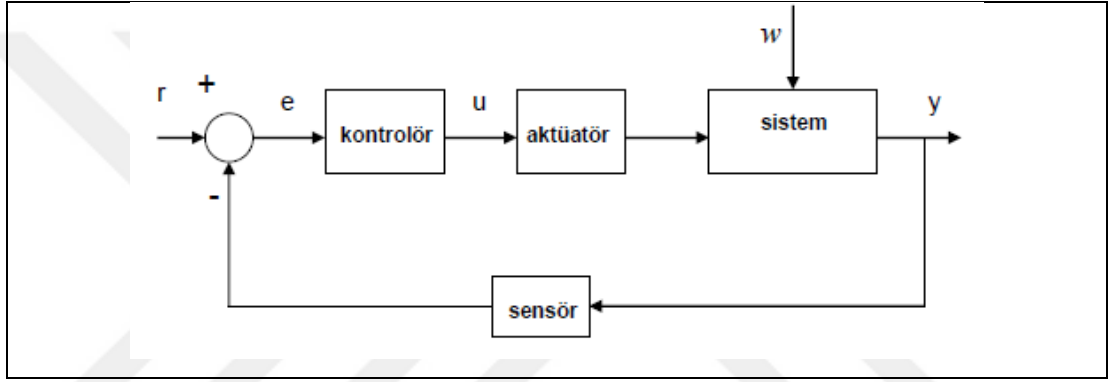
Aynı zamanda bu sistemler gibi sistemlerde simülasyonlar gerçekleştirilirken ve dinamik modeller oluşturulurken birçok lineerleştirme yöntemleri kullanılır.



Şekil 4.5: Uçaktan atlayan bir pilotun simülasyonu.

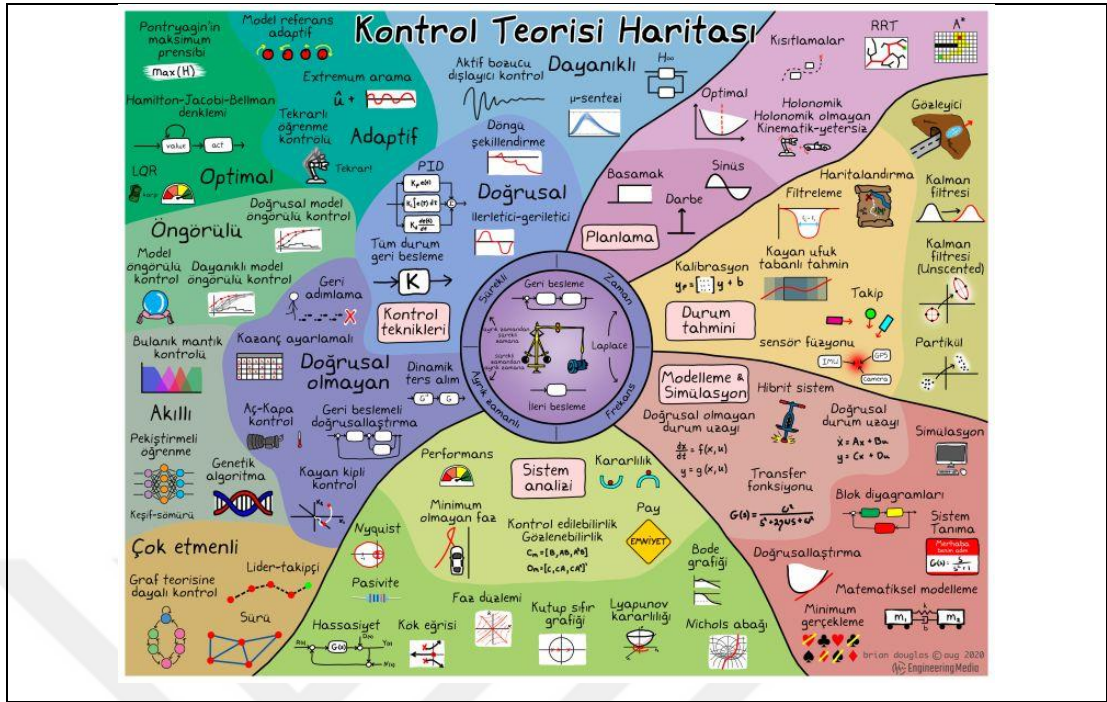
5. KONTROL TEORİSİ

Mühendislik ve matematikte, kontrol teorisi dinamik sistemlerin davranışları ile ilgilenmektedir. Bir kontrolcü tasarlanmadan önce sistem ve sistemin elemanları çok iyi tanımlanmalı ve aynı zamanda bu sistemin dinamik modeli hazırlanmalıdır. Matematiksel olarak ifade edilen bir sistem, üzerinde kontrol teorisi çalışmaları yapılacak hale gelmiş demektir. Kontrol teorisi, kontrol sistemleri mühendisliğinde, mühendislik süreçlerinde ve makinelerde sürekli çalışan dinamik sistemlerin kontrolü ile ilgilenen bir matematik alt alanıdır.



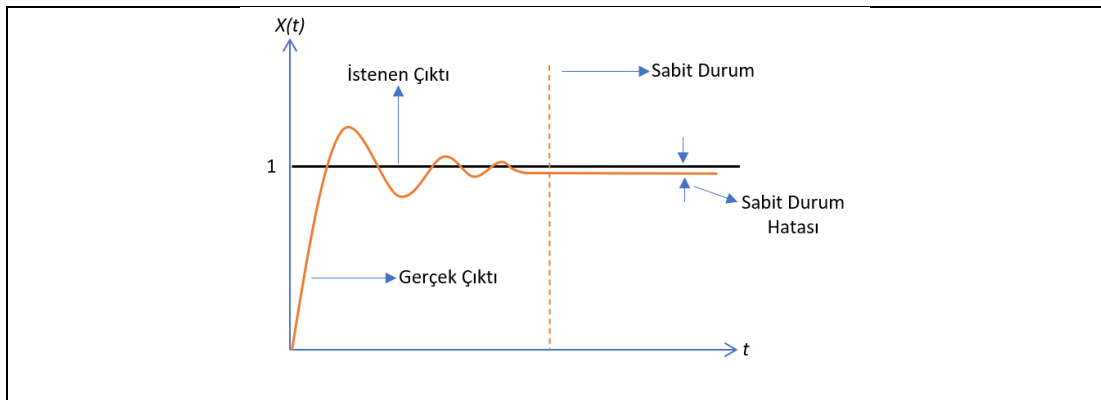
Şekil 5.1: Bir sistem üzerinde tasarlanmış olan kontrolün blok diyagramı.

Şekil 5.1’de bir sistem üzerinde tasarlanan kontrolcünün blok diyagramı anlatılırken burada “r” değeri bir girdiyi temsil etmektedir. “y” değeri ise sistem üzerinden bir sensör yardımı ile okunmaya çalışılan çıktıyı ifade etmektedir. “e” değeri kontrol sisteminde çokça rastlanacak olan hata değeri olarak simgelenmiş ve sistem üzerinden okunan değer ile sistemin ulaşması gereken değer arasındaki fark olarak açıklanabilir. Bu hata fonksiyonu kontrolcü tasarlamamıza yardımcı olarak “u” değerini oluşturur ve sistemde bulunan aktüatörleri harekete geçirerek sisteme karşı etki eden “w” ‘yi (bozucu etkileri) absorbe etmeye ve sistemi kontrol etmeye çalışmaktadır. Amaç, gecikme veya aşma olmadan bir kontrol eylemini kullanarak bu tür sistemleri kontrol etmek ve kontrol stabilitesini sağlamak ve bunun için optimum kontrol tasarımını sağlamaktır. Şekil 5.2’de de görüldüğü üzere bir sistemin kararlılığını sağlamak üzere birçok kontrol teorileri geliştirilmiş ve haritası sunulmuştur [Web2, 2022]. Bu kontrol teorilerinden bazılarının temeli eski dönemlerde atılmış, bazıları ise günümüzce oldukça ilgi duymaktadır.



Şekil 5.2: Kontrol teori haritası.

Bir sistemin istenen çıktısına referans denir. Bir sistemin bir veya birden fazla çıktı değişkeninin zaman içerisinde belirli bir referansı izlemesi gerektiği koşullarda, bir kontrolör, sistemin çıktısı üzerinde istenen etkiyi yapmak için girdileri bu sisteme yönlendirir. Bu girdiler sonucu bir çıktı elde edilir ve bu çıktı ile referans değer arasındaki fark ile “hata” değeri belirlenerek kontrolcünün ne kadar sağlıklı çalıştığı, sistemin bu konuda nasıl cevaplar ürettiği değerlendirilir. Bu Şekil 5.3’te de anlatılmaya çalışılmıştır. Referans değeri olarak 1 değeri seçilen bir sistemin bu değere nasıl yakınsadığını temsil eden şekil aşağıdaki gibidir.

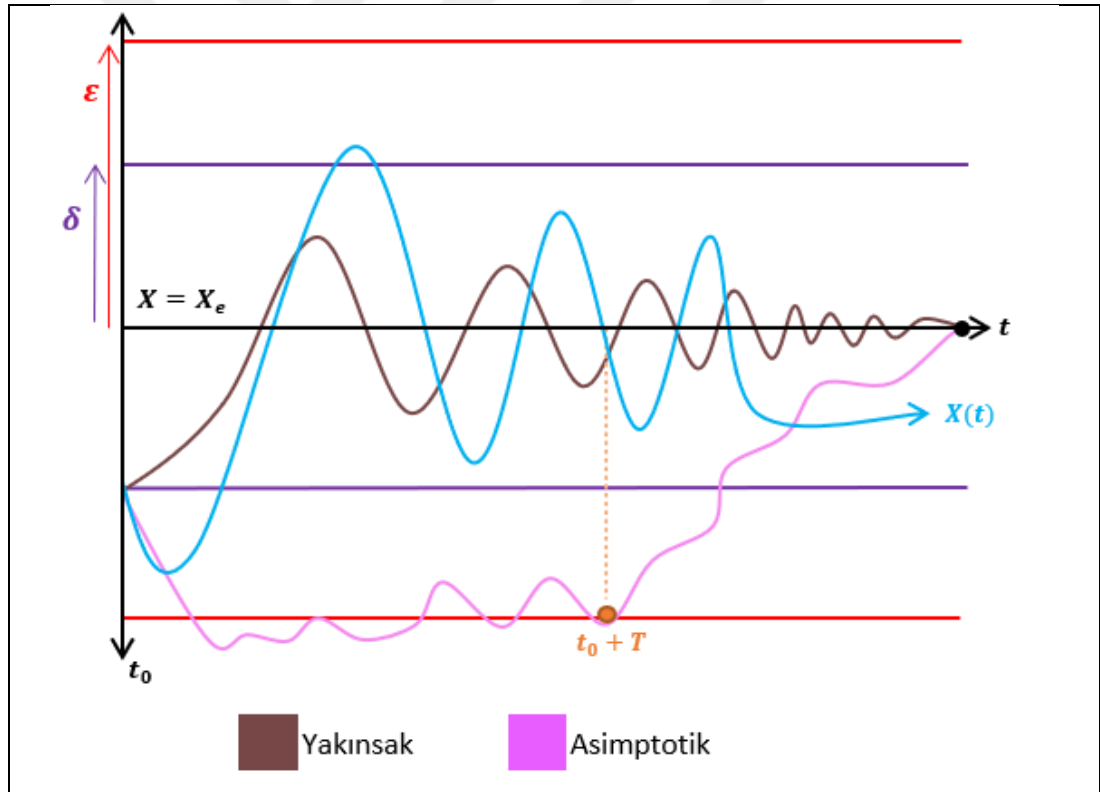


Şekil 5.3: Bir sistem üzerinde referans değeri takibi ve hata fonksiyonu.

5.1. Sistem Kararlılığı ve Sınırlanabilirlik

Bir sistemin kararlılığından birçok farklı şekilde bahsedilebilir. Bir sistem eğer sınırlı olan her girişe sınırlı bir cevap üretiyorsa bu sistem kararlıdır. Kararlılık söz konusu olan durumlarda bir denge noktası da söz konusu olmaktadır. Dolayısı ile kararlılık denge noktasına göre de tanımlanabilir.

Kararlı bir sistem bozucu etkiler karşısında geçici bir durum davranışından sonra yine denge noktasına geri dönen sistemdir. Ayrıca bir sistemin cevabı zaman sonsuza giderken epsilon bandından dışarı çıkmıyor ise bu sistem kararlıdır. Bir başka anlatım ile $||X_0 - X_e|| \leq \delta(\epsilon, t_0)$ iken $||X(t) - X_e|| < \epsilon, t \geq t_0$ olmaktadır [Astrom and Wittenmark, 1997]. Şekil 5.4'teki gibi sistemlerin kararlılığını incelenirken aşağıdaki terimlere ihtiyaç vardır.



Şekil 5.4: Sistem kararlılığı.

Yakınsaklık; eğer sistem durumları (konum, hız, ivme vb.) belli bir zaman sonra denge noktasına yaklaşıyorsa bu sistem yakınsak olarak ifade edilebilir. Şekil 5.4'te de yakınsak sistem için örnek verilmiştir. Bir başka anlatım ile tüm $t \geq t_0 +$

T için $\|X_0 - X_e\| \leq \delta(\varepsilon, t_0)$ ve $\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = X_e$ ise yakınsaktır. Asimptotik kararlı; eğer sistem durumları X_e 'ye yeterince yakın ilerliyor ve sonunda bu değere yakınsıyor ise başka bir değişle sistem kararlı iken aynı zamanda yakınsak ise asimptotik kararlıdır. Küresel asimptotik kararlı; eğer tüm sistem durumları zaman sonsuza giderken X_e 'ye yakınsıyor ve kararlı ise sistem küresel asimptotik kararlıdır. Değişmeyen (uniform) kararlılık (US); sistemin sadece t_0 anında değil herhangi bir anda kararlılığını bozacak bir etki sonrası kararlılığını sürdürmesine verilen isimdir. Değişmeyen (uniform) yakınsaklık (UC); t_0 'dan bağımsız olarak kararlılığını bozacak bir etki karşısında yakınsamasını devam ettirmesine verilen isimdir. Değişmeyen (uniform) asimptotik kararlılık (UAS); bir sistem hem US hem de UC ise bu sistem UAS'dir. Küresel değişmeyen asimptotik kararlılık (GUAS); bir sistem tüm $\delta(\cdot)$ değerleri için US ve UC ise bu sistem GUAS 'dir. Ekspansiyel kararlılık ise bir sistemin durumlarının üstel bir şekilde denge noktasına yaklaşması anlamına gelmektedir.

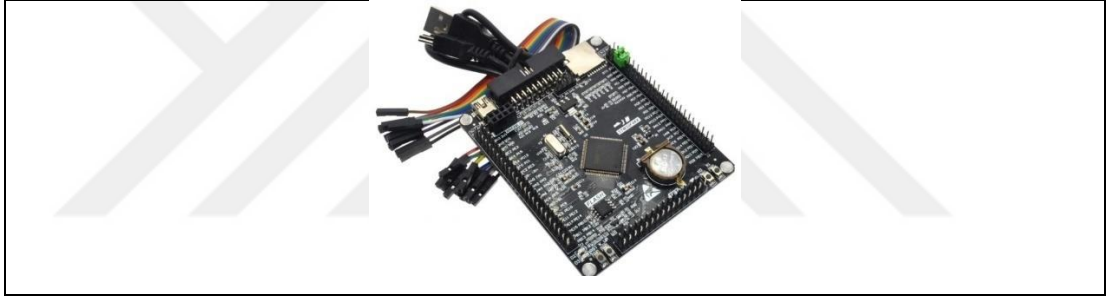
Bazı sistemler için kararlılık elde etmek oldukça zor ve karmaşık olabilir. Bu sistemler için ise sistemin sadece belli bir değer arasında sınırlı kalması yeterlidir. Bu tarz sistemlerde sınırlılık terimi oldukça önemlidir. Sınırlılık sistem durumları eğer X_e 'ye yakın başlıyor ve X_0 'dan hiçbir zaman uzaklaşmıyor ise sisteme verilen ad olarak ifade edilebilir. Aynı zamanda tüm $t \geq t_0$ için $\|X_0 - X_e\| \leq \delta$ ve $\|X(t) - X_e\| \leq \varepsilon(r, t_0)$ şeklinde de ifade edilebilir. Eğer burada $\varepsilon(r, t_0)$ ifadesi t_0 'dan bağımsız ise “değişmeyen sınırlılık (UB)” ismini almaktadır. Kararlılık analizleri için birçok farklı yöntem bulunmakla beraber bu çalışmada Lyapunov kararlılık analizleri kullanılmıştır. Lyapunov kararlılık analizleri kullanılırken “Nonlinear Control Systems Analysis and Design” kitabında bulunan Teorem 3.1 (Lyapunov kararlılık teoremi) kullanılmıştır. Bu bölümde bahsi geçen asimptotik kararlılık için aynı kitapta anlatılan Teorem 3.2 (asimptotik kararlılık teoremi) kullanılmış, Teorem 3.4'te ekspansiyel kararlılık anlatılmıştır [Marquez, 2003]. Teoremlerin kanıtları da göz önünde bulundurulmuş ve 7. bölümdeki kontrol algoritmalarının analizlerinde Lyapunov analizi uygulanmıştır.

6. DİREKSİYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde sistemde kullanılan parçalar ve görevleri, sistemin matematiksel olarak ifade edilmesi ve denklemleri açıklanmıştır.

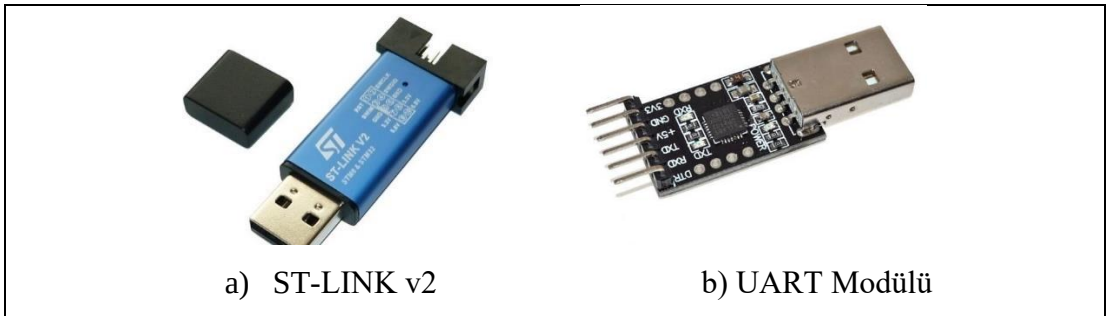
6.1. Sistemin Tanıtımı

Üzerinde kontrol algoritması tasarlanacak olan bir direksiyon sistemi hazırlanırken sistemin temel gereksinimleri belirlenmiş olup sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Solidworks programında tasarlanan sistemde, mikro-denetleyici olarak Şekil 6.1’de gösterilen STM32F407VET6 kartı kullanılmıştır. Hazırlanan algoritma bu sayede entegre edilmiştir.



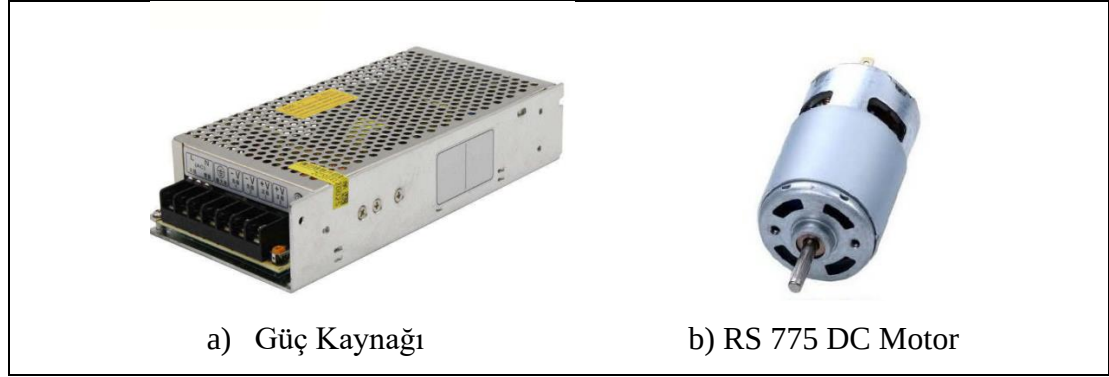
Şekil 6.1: Mikro-denetleyici STM32F407VET6 kartı.

Hazırlanan programı mikro-denetleyicimize gömmek için kullanılan debugger olarak Şekil 6.2’de görseli verilen ST-LINK v2 ve yine aynı görselde verilen sistemin bilgisayar ile mikro-denetleyici arasında seri haberleşmesini sağlamak için UART modülü olan PL2303 kullanılmıştır.



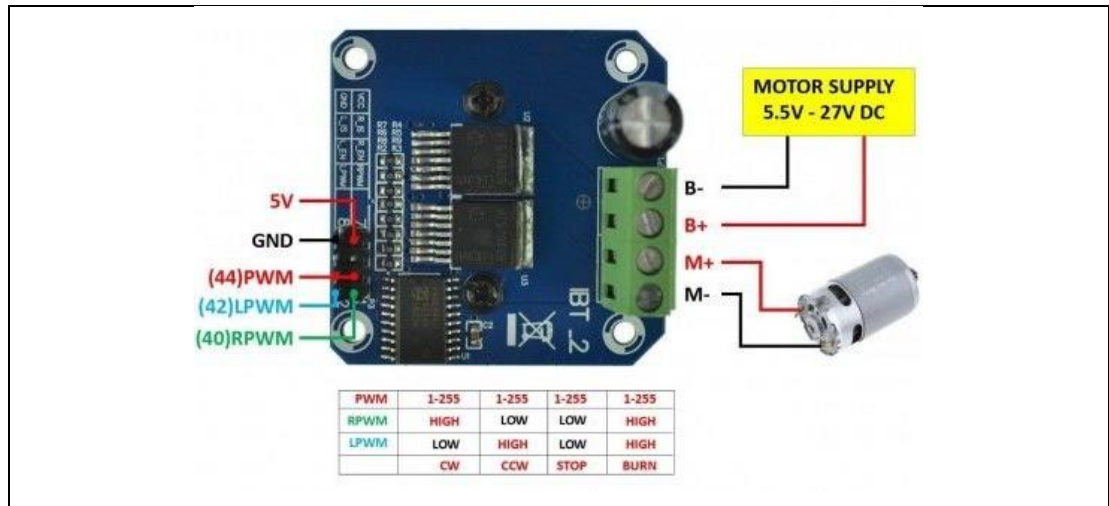
Şekil 6.2: Debugger (a) ve UART modülü (b).

Sistemde tork üretecek olan DC motor olarak RS 775 motor, bu motoru çalıştırabilmek için 24V-20A çıkış alabileceğimiz bir güç kaynağı seçilmiş ve görselleri Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3: Güç kaynağı (a) ve RS 775 DC motor (b).

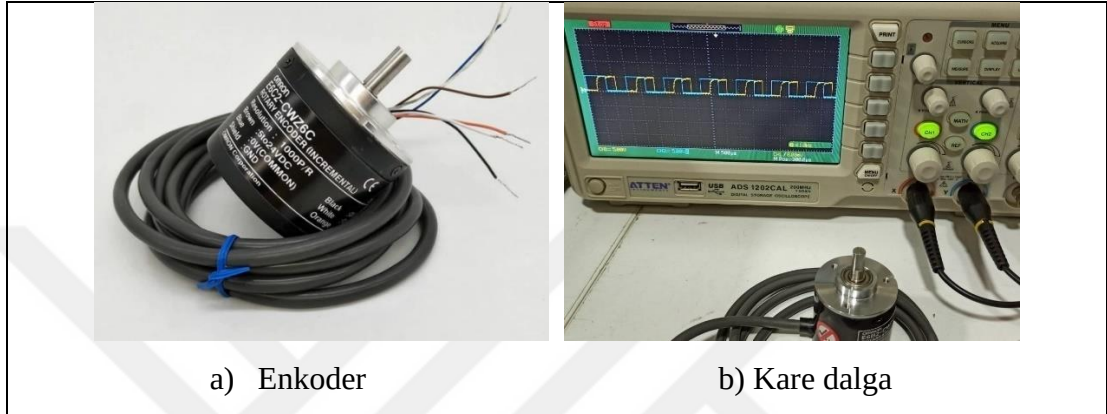
Bu motoru sürmek amaçlı kullanılan sürücü için PWM (Pulse-width modulation) çıkış verebilen BTS7960 43A sürücü seçilmiştir. Sürücü seçimi oldukça önemli olmakla beraber sistemde hesaplanan torku, sisteme iletecek yapıda aynı zamanda sürücüdür. Dolayısı ile motoru sağ ve sol olmak üzere çift taraflı sürebilir olması da gereklidir. Bu sürücü kartı ve pinlerinin tanıtımı Şekil 6.4'te belirtilmiş olup motor bağlantı şeması da aynı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6.4: BTS7960 43A sürücü kartı.

Sistem üzerinden direksiyonun açısal konumunu okumamız amacı ile 1024 ppr (pulses per revolution)'lık iki çıkışlı bir enkoder seçilmiştir. Enkoderler bilindiği

üzere kare dalga üreten cihazlar olmakla beraber farklı tipleri mevcuttur. Dönüş yönünü de kolayca tayin edebileceğimiz bir enkoder olan OMRON E6B2 CWZ6C modeli projemiz için seçilmiş ve Şekil 6.5'te kendisi ve ürettiği kare dalga yapısı verilmiştir. Bu kare dalgalar görüldüğü üzere osiloskop üzerinden izlenmiştir. Kare dalganın net bir şekilde alınması için $4.7\text{ k}\Omega$ 'luk dirençler enkoderin çıkışları ile besleme arasına koyulmuştur.



Şekil 6.5: Enkoder (a) ve kare dalga (b).

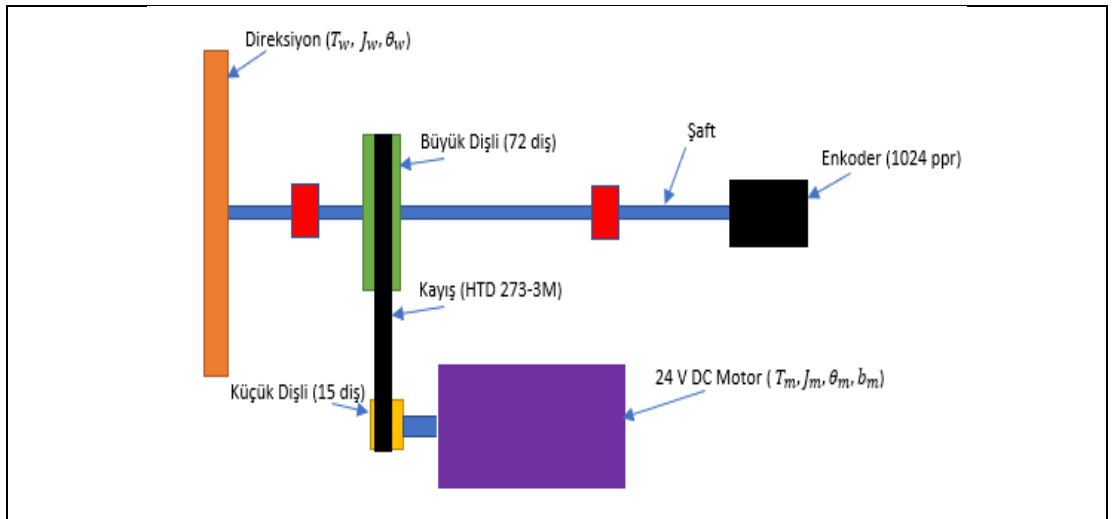
Sistem üzerinde enkoder bir alüminyum kaplin yardımı ile direksiyonun bağlı olduğu şafta bağlanmış olup direkt olarak direksiyonun açısını okumaktadır. Direksiyon şaftı iki yerden rulman ile yataklanmış olup alüminyum kare sigma profiller ile şasesi oluşturulmuştur. Direksiyonu hareket ettirecek olan DC motor ise bir dişli HTD 273-3M kayış yardımı ile direksiyona bağlanmıştır. Kayış direksiyon tarafında 72 dişi, motor tarafında 15 dişi olan dişlileri birbirine bağlamakta ve güç aktarımı sağlamaktadır. Sistemin genel görseli Şekil 6.6'da görüldüğü gibidir.



Şekil 6.6: Sistem görünüşü.

6.2. Direksiyon Sisteminin Matematiksel Modellenmesi

Bir sistemin matematiksel olarak modellenenebilmesi için sistemin parametrelerinin belirlenmesi ve sistemin bir dinamik modelinin oluşturulması gerekmektedir. Sistemin oluşturulmuş modeli Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7: Sistemin oluşturulmuş modeli.

Sistemin matematiksel modelinde kullanılacak olan parametreler ise Şekil 6.8’de belirtilmiştir.

J_m	→	Motorun Atalet Momenti
J_w	→	Direksiyon Sisteminin Atalet Momenti
θ_m	→	Motor Şaftının Açısı
θ_w	→	Direksiyon Sisteminin Açısı
T_m	→	Motorun Torku
T_w	→	Direksiyona Sürücü Tarafından Uygulanan Tork
b_m	→	Sönüm Katsayısı
N	→	Dişli Oranı
r_w	→	Büyük Dişlinin Çapı
r_m	→	Küçük Dişlinin Çapı

Şekil 6.8: Sistem parametreleri.

Sistem dinamiğinden kaynaklı matematiksel denklemler ikinci dereceden denklemler olarak açıklanabilir. Direksiyon ve bağlı olduğu şaft sisteminin ayrı, motor sisteminin kendi eksenlerinde dönmesinden kaynaklı oluşan denklemleri 4.2 bölümünde anlatılan Newton yöntemine göre rahatlıkla çıkartılabilir. Direksiyon ile motor arasında aşağıdaki dişli oranı ilişkisi bulunmaktadır (6.1) ve bu denklemleri sadeleştirmekte önemli bir rol oynamaktadır.

$$N = \frac{r_w}{r_m} = \frac{T_w}{T_m} = \frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_w} = \frac{\ddot{\theta}_m}{\ddot{\theta}_w} \quad (6.1)$$

Sistemimizde direksiyon ve şaftının rotasyonel hareketinden kaynaklı denklemi (6.2)’deki gibidir. Bu denklemde DC motorun ürettiği tork da sisteme etki etmektedir.

$$J_w \ddot{\theta}_w = T_w - \frac{T_m}{N} \quad (6.2)$$

DC motorun rotasyonel hareketinden kaynaklı oluşturulan denklem (6.3)'teki gibidir.

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = T_m \quad (6.3)$$

Denklemlerde dişli oranlarından kaynaklı değişimler yapılırsa ve (6.3) denklemi (6.2) denklemi içerisinde yazılırsa (6.4) denklemi elde edilir.

$$NJ_w \ddot{\theta}_w + J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = NT_w = N^2 T_m \quad (6.4)$$

Burada amaç motorun ürettiği torku yani T_m 'yi hesaplamaktır. Dolayısı ile T_m yalnız bırakılır ve (6.5) denklemi elde edilir.

$$NT_m = J_w \ddot{\theta}_w + J_m \ddot{\theta}_w + b_m \dot{\theta}_w \quad (6.5)$$

(6.5) denkleminde ortak parantez uygulanırsa (6.6) denklemi elde edilir ve burada $\theta = q$ eşitliği de dikkate alınmıştır.

$$T_m = \ddot{q}_w \underbrace{(J_w/N + J_m/N)}_M + \dot{q}_w \underbrace{(b_m/N)}_V \quad (6.6)$$

Farklı hesaplarda kullanılacağından burada direksiyonun açısal ivmesi olan $\ddot{q}_w$ yalnız bırakılmalıdır. Ve (6.7) denklemi elde edilir.

$$\ddot{q}_w = M^{-1}(T_m - V \dot{q}_w) \quad (6.7)$$

7. DİREKSİYON SİSTEMİ İÇİN KONTROL ALGORİTMASI

Genel olarak tüm sistemler ikinci dereceden dinamik sistemler olarak anlatılabilir. Bu sistemlere (7.1)'deki gibi genel bir yaklaşım sunalım.

$$\ddot{x} + f(x, \dot{x}, \theta) = u(t) \quad (7.1)$$

Geri beslememizi bulmaya başlamadan önce bizim için gerekli olan hata fonksiyonunu tanımlamamız gerekmektedir. Sistemimizde pozisyon hatası olarak hesaplanacak hata fonksiyonu (7.2)'deki gibi elde edilir.

$$e = q_d - q \quad (7.2)$$

Bulunan pozisyon hata değerinde tanımlanan q_d referans değer (istenilen değer) olmakla beraber en az ikinci mertebeden türevlenebilir. Tasarlanacak sistemimizde amaç her zaman hatayı sıfıra götürmek olacaktır. Dolayısı ile bize lazım olan “filtrelenmiş” hata sinyalinin aşağıdaki şekilde tanımlamamız gerekmektedir.

$$r = \dot{e} + \alpha e = (\dot{q}_d - \dot{q}) + \alpha(q_d - q) \quad (7.3)$$

7.1. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrol

Uyarlamalı denetim sistem belirsizliklerini içeren $f(x, \dot{x}, \theta)$ fonksiyonunun doğrusal biçimde parametrelerine ayrılabilirdi durumlarda sıklıkla kullanılır. Özellikle lineer olmayan $f(x, \dot{x}, \theta)$ fonksiyonunun p adet bilinmeyen parametre içerdiğini, aynı zamanda bilinen veya ölçülebilen parametrelerin oluşturduğu $W(x, \dot{x}) \in R^{1 \times p}$ matrisi ile bilinmeyen parametrelerin oluşturduğu bir vektörün çarpımı şeklinde ile ifade edilebilir olduğunu varsayalım.

$$f(x, \dot{x}, \theta) = W\theta \quad (7.4)$$

Bu durumda $f(x, \dot{x}, \theta)$ fonksiyonu tam olarak bilinmediği için kontrol formülasyonumuzda direkt olarak kullanılamaz, aynı sebepten dolayı $f(x, \dot{x}, \theta)$ fonksiyonunun tahmini değeri olarak $\hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta})$ fonksiyonunun tanımlanmasına ihtiyaç duyarız. Tahmin fonksiyonumuzun $f(x, \dot{x}, \theta)$ fonksiyonuna yaklaşabilme performansını ise gerçek değeri ile tahmini değeri arasındaki fark olarak tanımlayalım.

$$\tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta}) = f(x, \dot{x}, \theta) - \hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta}) \quad (7.5)$$

(7.5)'te verilen $\tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta})$ ifadesini (7.4) referans alınarak (7.6)'da verilen şekilde yeniden tanımlayabiliriz.

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta}) &= W\tilde{\theta} \\ &= W\theta - W\hat{\theta} \end{aligned} \quad (7.6)$$

Geri besleme ifademiz ise aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$u_o = \hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta}) + kr \quad (7.7)$$

$\hat{f} = W\hat{\theta}$ içinde olan $\hat{\theta}$, $\dot{\hat{\theta}} = \Upsilon W^T r$ integralinden elde edildiğinde [Ozbay et al., 2008], (7.3)'te hata, t sonsuza gittiğinde sıfıra yakınsar; yani hata sinyali için (7.8)'deki denklem geçerli olacaktır. ($\Upsilon \in R^{p \times p}$ pozitif tanımlı simetrik diagonal adaptasyon katsayıları içeren kazanç matrisidir.)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (7.8)$$

(7.8)'de belirtilen şekilde hatayı sıfıra götürebilmek için (7.9)'daki gibi bir pozitif skaler tanımlayalım. ($V(t) \in R$)

$$V = \frac{1}{2}r^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \Upsilon^{-1} \tilde{\theta} \quad (7.9)$$

$$\dot{V} = r\dot{r} + \tilde{\theta}^T \Upsilon^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \quad (7.10)$$

(7.10)'da $\dot{r}$ terimi yerine yazılıp düzenlenir ise (7.11) elde edilir.

$$\dot{V} = r(-kr + W\tilde{\theta}) - \tilde{\theta}^T \Upsilon^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \quad (7.11)$$

(7.11)'de $\dot{\tilde{\theta}}$ yerine yazılır ise (7.12) bulunarak V teriminin sınırlandırılabilir olduğu anlaşılır hale gelmiştir ($V \in L_\infty$).

$$\dot{V} = -kr^2 \quad (7.12)$$

V teriminin sınırlandırılabilir olmasından dolayı r ve $\tilde{\theta}$ fonksiyonları sayesinde $\dot{r}$ 'da sınırlandırılabilir. Dolayısı ile hata fonksiyonu da ve hata fonksiyonunun türevi de sınırlandırılabilir. Ayrıca $r \in L_2$ olduğu görülmektedir (7.5). Böylece Barbalat Lemma'nın direkt uygulanması sonucu r değerinin, $e(t)$, $\dot{e}(t)$ değerlerinin zaman sonsuza gittiğinde sıfıra yakınsadıkları kanıtlanmış olur. (7.4)'te verilen denklemde W ve θ matrislerini bulabilmek için (7.13) denklemi sistem üzerinde tasarlanabilir.

$$M\dot{r} = M(\ddot{q}_d + \alpha\dot{e}) - M\ddot{q} \quad (7.13)$$

Burada $\ddot{q}$ yerine (6.7)'de verilen denklem yazılır ve (7.14) denklemi elde edilir.

$$M\dot{r} = M(\ddot{q}_d + \alpha\dot{e}) - T_m + V(\dot{q}_d + \alpha e) \quad (7.14)$$

Denklem (6.6)'da verilen M ve V eşitlikleri (7.14)'te yerine yazılırsa (7.15) denklemi elde edilir.

$$W\theta = (J_w/N + J_m/N)(\ddot{q}_d + \alpha\dot{e}) + (b_m/N)(\dot{q}_d + \alpha e) \quad (7.15)$$

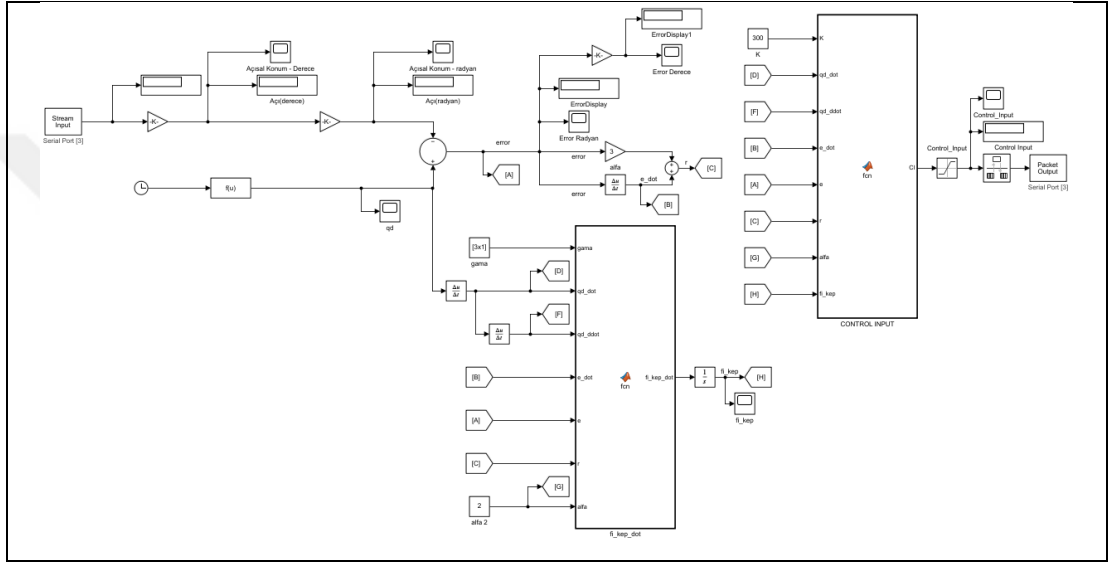
Burada $W_{1 \times 2}$ matrisi sistemin durumlarını içeren matris olacak ve $\theta_{2 \times 1}$ matrisi sistemin parametrelerini içerecek matris olarak seçilir ve (7.16) ve (7.17) denklemlerinde verilmiştir.

$$W = [(\ddot{q}_d + \alpha\dot{e}) \quad (\dot{q}_d + \alpha e)] \quad (7.16)$$

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} (J_w/N + J_m/N) \\ (b_m/N) \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

Bizim sistemimizde ise DCAL(desired compansation adaptation law) adaptif kontrolcümüz (7.18)'de verildiği gibi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü Şekil 7.1'de verildiği gibi Simulink ortamında da oluşturulmuştur.

$$u = \ddot{q}_d - \hat{f}(x_d, \dot{x}_d, \hat{\theta}) - Ke \quad (7.18)$$



Şekil 7.1: Uyarlamalı (adaptif) kontrol simulink tasarımı.

7.2. Gürbüz Kontrol

Gürbüz denetleyici ile diğer denetleyiciler arasındaki fark sistem parametreleri tam olarak bilinmemesi ve seçilen en makul değerlere göre bir ileri besleme tasarlanmasıdır. Diğer denetleyicilerde ise sistemde bulunan belirsizliklerle baş edecek şekilde ileri besleme tasarlanmaktadır. Gürbüz kontrolde geri besleme bölümü, tahmin ile gerçek değer arasında oluşan farkı, sisteme dışarıdan etki eden, gürültü gibi davranan bozucu etmene karşı gürbüz şekilde tasarlanmaktadır. Sistem belirsizlikleri (7.5)'te olduğu gibi fark şeklinde ifade edilmektedir.

$$|\tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta})| = \rho(x, \dot{x}, \theta) \quad (7.19)$$

Bu eşitliğin sağlanması gerekmektedir. $\rho(\cdot)$ fonksiyonu ise bir sınırlama fonksiyonudur. Gürbüz kontrol olarak yüksek frekans kontrolü inceleyeceğiz.

7.2.1. Yüksek Frekans Kontrol

Yüksek frekans gürbüz kontrolcü için geri besleme bölümünü şu şekilde tasarlayalım [Zhang et al., 2019].

$$u_o = \hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta}) + kr + V_R \quad (7.20)$$

$\hat{f}(x, \dot{x}, \hat{\theta})$ sistem parametrelerinin en tutarlı sabit tahminleridir. $V_R \in R$ fonksiyonu ise (7.21)'deki gibi tanımlanabilir.

$$V_R = \frac{\rho^2 r}{|\rho||r| + \varepsilon} \quad (7.21)$$

ε değeri ise sıfır ile küçük bir değer arasında kullanılabilir. Burada filtrelenmiş hatanın türevi ise (7.3)'te hata fonksiyonunun yerine yazılması ile (7.22)'deki şekilde elde edilebilir.

$$\dot{r} = (\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \alpha \dot{e} \quad (7.22)$$

$\ddot{q}$ yerine (7.1)'den elde edilen değer yazılır ise (7.23) elde edilir.

$$\dot{r} = \ddot{q}_d + \alpha \dot{e} - u + f(x, \dot{x}, \theta) \quad (7.23)$$

Aşağıdaki denklemler dikkate alınarak $\dot{r}$ fonksiyonu tekrar düzenlenir ise (7.26) eşitliği elde edilir.

$$u_f = \ddot{q}_d + \alpha \dot{e} \quad (7.24)$$

$$u = u_f + u_o \quad (7.25)$$

$$\dot{r} = -kr - \frac{\rho^2 r}{|\rho||r| + \varepsilon} + \tilde{f}(x, \dot{x}, \tilde{\theta}) \quad (7.26)$$

(7.26) denklemini ise bir sonraki aşamada gerçekleştireceğimiz kararlılık analizinde kullanılmaktadır.

Teorem 1; sistem denklemi (7.1) ile verilen denetim sistemi için, geri besleme ifadesi (7.20) ve (7.21)'de belirtildiği gibi gürbüz olarak tasarlanırsa filtrelenmiş hata değeri (7.27)'deki şekilde bulunur.

$$|r(t)| \leq \sqrt{A + Be^{-2kt}} \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (7.27)$$

Eşitsizliğini sağlayarak, $A = \frac{e}{k}$ ve $B = |r(t)|^2 - \frac{e}{k}$ olacak şekilde üstel bir zarf eşliğinde düzenli olarak boyu ayarlanabilen mutlak bir sınıra yakınsar. Kararlılık analizi yaparken pozitif tanımlı bir skaler fonksiyon tanımlayalım, $V_r(t) \in R$.

$$V_r = \frac{1}{2}r^2 \quad (7.28)$$

Fonksiyonun türevi alınır (7.29) eşitliği elde edilir.

$$\dot{V}_r = r\dot{r} \quad (7.29)$$

(7.29) ise (7.19)'da verilen sınırlayıcı fonksiyonu kullanarak aynı zamanda $\dot{r}$ değerini yazarak (7.30) eşitliğini elde ederiz. Bu ifade de düzenlenirse (7.31) eşitliği elde edilir.

$$\dot{V}_r \leq -kr^2 + |r|\rho - \frac{\rho^2 r^2}{\rho|r| + \varepsilon} \quad (7.30)$$

$$\dot{V}_r \leq -kr^2 + \varepsilon \left[\frac{\rho|r|}{\rho|r| + \varepsilon} \right] \quad (7.31)$$

Burada $\varepsilon \in R$ teriminin küçük ama pozitif bir değer olduğunu kabul edersek ifade (7.32)'deki hali alır. Ve (7.32)'de (7.28) yazılırsa (7.33) eşitliği elde edilir.

$$\dot{V}_r \leq -kr^2 + \varepsilon \quad (7.32)$$

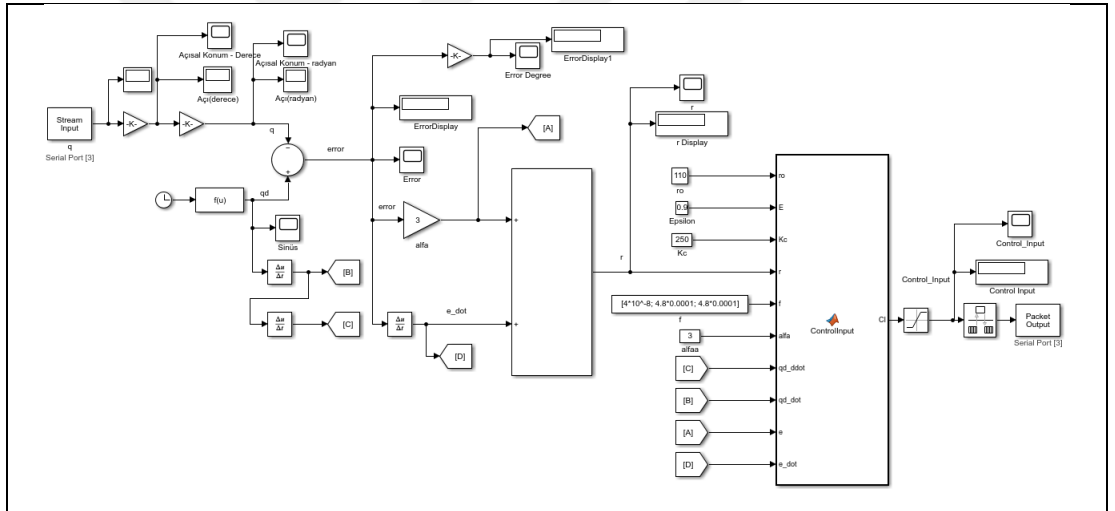
$$\dot{V}_r \leq -2kV_r + \varepsilon \quad (7.33)$$

Diferansiyel denklemin çözümü aşağıdaki gibidir. Ve (7.34)'te V_r yerine yazılırsa (7.35) eşitliği elde edilir.

$$V_r(t) \leq V_r(0)e^{-\gamma t} + \frac{\varepsilon}{\gamma}[1 - e^{-\gamma t}], \gamma \cong 2k \quad (7.34)$$

$$\frac{1}{2}r^2(t) \leq \frac{1}{2}r^2(0)\exp\{-\gamma t\} + \frac{\varepsilon}{\gamma}[1 - \exp\{-\gamma t\}], \gamma \cong 2k \quad (7.35)$$

(7.35) denklemi ile teorem 1 ifadesinde belirtilen $|r(t)| \leq \sqrt{A + Be^{-2kt}}$ üst sınırın geçerli olduğu, $\dot{r}$ fonksiyonunun herhangi bir başlangıç değeri için üstel (eksponansiyel) bir zarf eşliğinde düzenli olarak boyu $\sqrt{A}$ olarak belirlenen ve ε ve k değerleri kullanılarak ayarlanabilen mutlak bir sınırın içine yakınsayacağı gösterilmiştir. Yüksek frekans kontrol için Simulink ortamındaki kontrol tasarımı Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2: Simulink ortamında gürbüz kontrol tasarımı.

7.3. PID Kontrol

Klasik kontrol teorisinden biliniyor ki, sistemde sabit bir bozulma olduğunda PD (proportional-derivative) tipi kontrolörler sıfır olmayan sabit durum hataları verir. Bu yüzden PID hesaplanmış tork kontrolörlerine odaklanıyoruz [Zhang and Guo, 2019]. Burada kontrol girdisi olarak (7.36) kullanılır [Li et al., 2006].

$$u = -K_v \dot{e} - K_p e - K_i \varepsilon \quad (7.36)$$

$$\dot{e} = e \quad (7.37)$$

(7.36)'da görüldüğü gibi kontrolcü tasarımında kazanç değerleri mevcuttur. Kazanç değerleri PD kontrolde olduğu gibi PID kontrolde de oldukça büyük önem arz etmektedir. Dolayısı ile aşağıdaki denklemlere dikkat edilmelidir [Gerov and Jovanović, 2018].

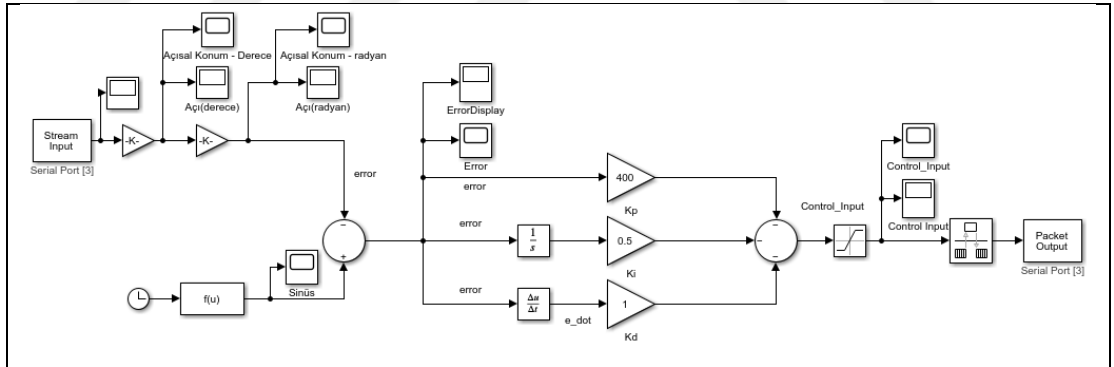
$$K_i = \text{diag}\{K_{i_i}\} \quad K_v = \text{diag}\{K_{v_i}\} \quad K_p = \text{diag}\{K_{p_i}\} \quad (7.38)$$

$$\Rightarrow \Delta_c(s) = \prod_{i=1}^n (s^3 + K_{v_i}s^2 + K_{p_i}s + K_{i_i}) \quad (7.39)$$

Burada Routh'un kararlılık testi uygulandığında kapalı çevrim kararlılığın gereği olarak integral kazancı çok yüksek seçilmemelidir.

$$K_{i_i} < K_{v_i}K_{p_i} \quad (7.40)$$

PID kontrol için Simulink ortamındaki kontrol tasarımı Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3: Simulink ortamında PID kontrol tasarımı.

7.4. Haptik Geri Beslemeli Kontrol

Haptik kontrol algoritması tasarlanırken önceki bölümlerde anlatılan ve tasarımları gerçekleştirilen kontrol algoritmalarından birinin kullanımı yeterlidir. Bu bölümde bir kontrol algoritmasından yararlanılarak farklı bir kontrol algoritması oluşturulacaktır. Kontrol tasarlanmadan önce sürücülerin bilgisayar ortamında görebileceği 2D bir simülasyon ortamı hazırlanmıştır. İki boyutlu simülasyon

ortamında sürücülerin takip etmesi gereken bir yol verilmiştir. Önceki bölümlerde bahsedilen kontrolcülerden PID kontrolcü sürücüye bu yolun ortasından gitmesine yardımcı olurken sürücü az da olsa bu yardımı hissetmektedir. Aynı zamanda sürücü yolun dışına çıktığında ise sistem sürücüye rastgele bir titreşim vererek sürücüyü uyarmaktadır. Titreşim sürücüyü rahatsız etmeyecek şekilde fakat farkına varılacak şekilde bir blok yardımı ile uygulanmıştır. Kullanılan blok, kontrol girdisine gürültü olarak etki etmektedir. Simülasyon ortamı hazırlandıktan sonra sürücüler için hazırlanan anket, sürücüler tarafından doldurulmuştur ve haptik kontrol uygulaması için fikirleri öğrenilmiştir. Sunulan anket ise Şekil 7.4’te paylaşılmıştır.



GEBZE
TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Haptik Geri Besleme Kontrol Anketi

Tarih: .../.../....

Ad:

Soyad:

Meslek:

Aşağıdaki sorularda cevabınızı kutucukları işaretleyerek belirtin. Cevabınız kutucuklarda yok ise soruların altında bulunan “Diğer” bölümüne cevabınızı yazabilirsiniz.

1. Araç kullanıyor musunuz? Evet ise aracınız ve modelini belirtir mısınız?
☐ Evet ☐ Hayır
 Diğer: ...
2. Aracınızın direksiyon sistemi özellikleri nedir?
☐ Hidrolik Destekli Direksiyon (HPAS) ☐ Elektrik Destekli Direksiyon (EPAS) ☐ Yok
 Diğer: ...
3. Sürüş simülörleri ve haptik (dokunsal) sistemleri hakkında bilginiz var mı?
☐ Evet ☐ Hayır
 Diğer: ...
4. Direksiyon sisteminin tasarımını 1’den 5’e kadar yorumlar mısınız? Tasarım tavsiyelerinizi belirtir mısınız.
☐ 1 (Çok Kötü) ☐ 2 (Kötü) ☐ 3 (Orta) ☐ 4 (İyi) ☐ 5 (Çok İyi)
 Diğer: ...
5. Direksiyonun sürüş konforunu 1’den 5’e kadar yorumlar mısınız?
☐ 1 (Çok Kötü) ☐ 2 (Kötü) ☐ 3 (Orta) ☐ 4 (İyi) ☐ 5 (Çok İyi)
 Diğer: ...
6. Simülasyonda tarafınıza sunulan ortamını görsel yönünden 1’den 5’e kadar değerlendirir misiniz? Tavsiyeleriniz varsa belirtir mısınız.
☐ 1 (Çok Kötü) ☐ 2 (Kötü) ☐ 3 (Orta) ☐ 4 (İyi) ☐ 5 (Çok İyi)
 Diğer: ...
7. Simülasyonda tasarlanan Elektrik Destekli Direksiyonun (EPAS) size etkisini yorumlar mısınız?
☐ 1 (Çok Kötü) ☐ 2 (Kötü) ☐ 3 (Orta) ☐ 4 (İyi) ☐ 5 (Çok İyi)
 Diğer: ...

Şekil 7.4: Simülasyonu bitiren sürücüler için haptik geri besleme kontrol anketi.

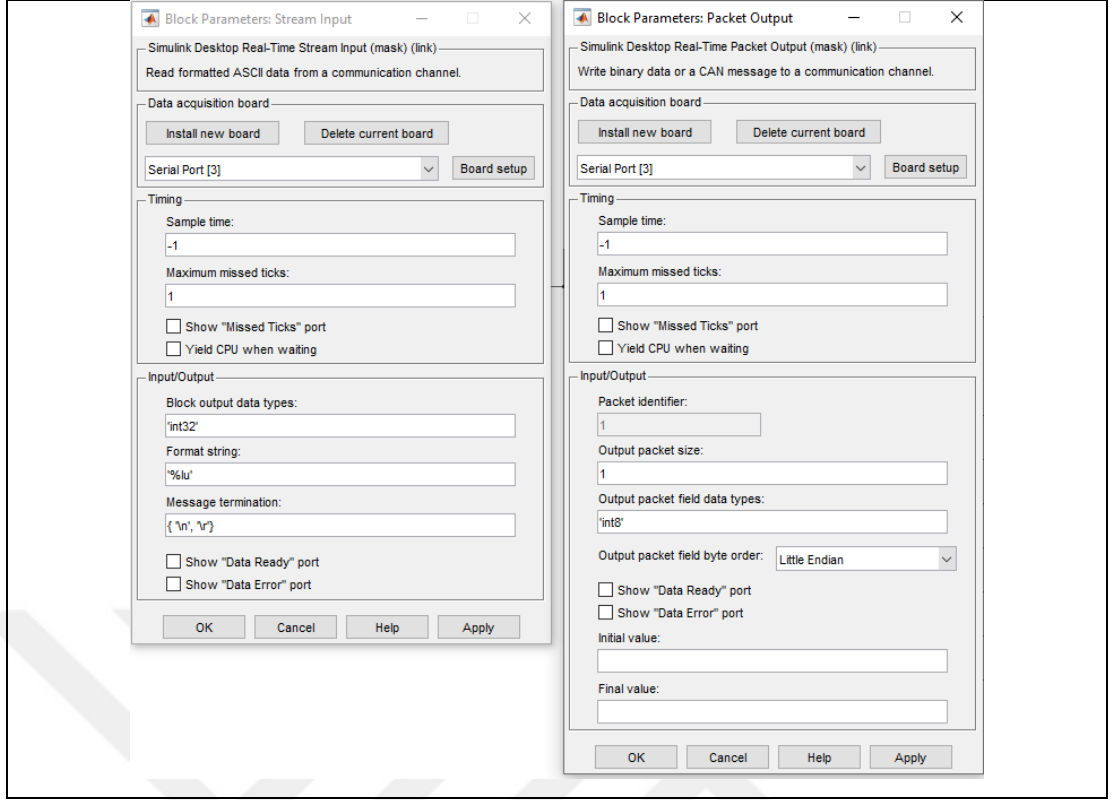
8. SİSTEM AYARLARI

Sistemimizde sonuçların alınabilmesi için belli başlı ayarlar yapılmıştır. Ayarlar sistemin sonuçları üzerinde direkt olarak etki etmekle birlikte oldukça önemlidirler. Sistem donanımı Şekil 8.1’de görüldüğü gibidir.



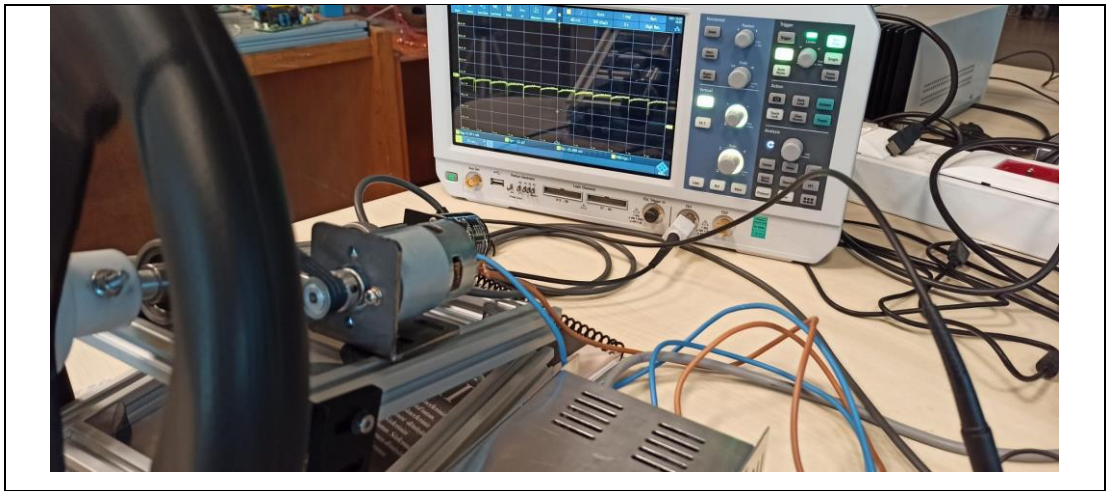
Şekil 8.1: Sistem donanımı görünüşü.

Sistem donanımında bulunan enkoderden veri sisteme UART haberleşmesi ile COM Port üzerinden aktarılır. Simulink ortamında tasarlanan kontrolcünden veri aynı şekilde UART haberleşmesi ile yine COM Port üzerinden motor sürücüsüne iletilir ve motor sürülür. Seri haberleşme blokları Şekil 8.2’de gösterildiği gibidir.



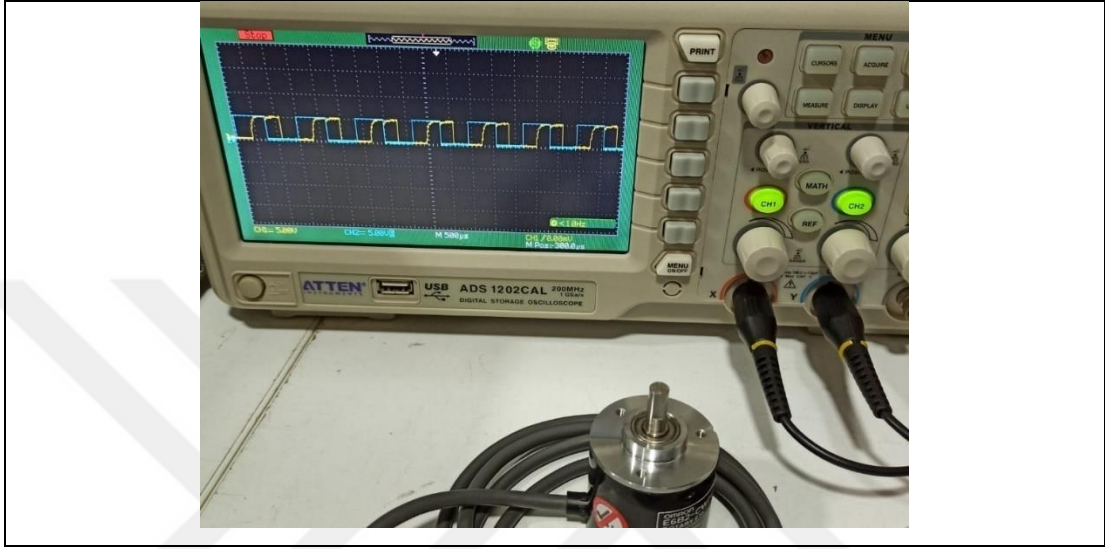
Şekil 8.2: Simulink giriş ve çıkış (COM port) ayarları.

İşlem bir döngü içerisinde gerçekleşmektedir. Sistem CPU frekansları CubeMX programı arayıcılığıyla ayarlanarak bir döngünün 1 milisaniyede bitmesi sağlanmıştır. Dolayısı ile sistem döngü frekansı 1 kHz olmaktadır. Bu değer sistem çalışırken osiloskop yardımı ile Şekil 8.3'teki gibi ölçülmüştür.



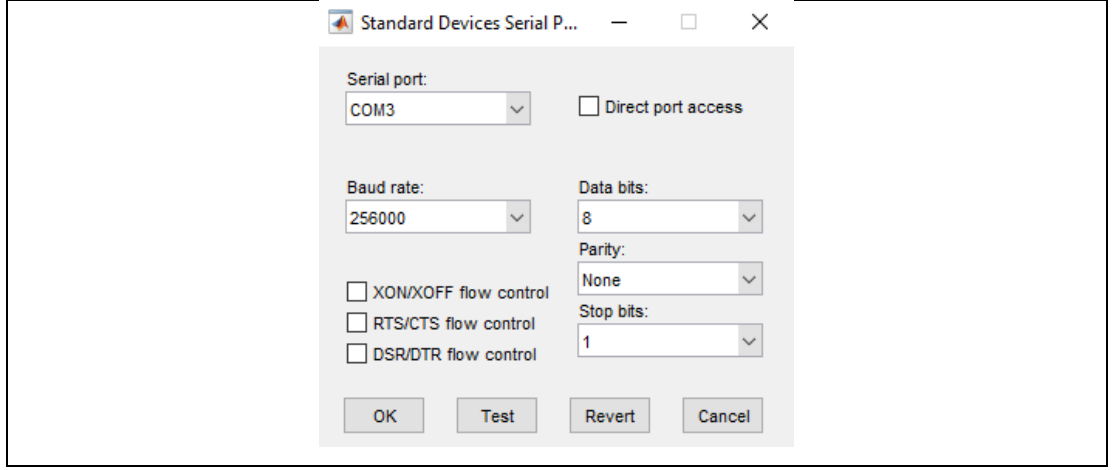
Şekil 8.3: Sistem frekansının ölçümü.

Ayrıca motor sürmek ve enkoder okumak için gömülü tarafta Atollic TRUSTUDIO programı üzerinden zamanlayıcılar (TIM) tanımlanmıştır. Zamanlayıcılarından motorunki 1 kHz'e yakın seçilirken enkoderinki maksimum kapasitede seçilmiştir. Çıkışlarından kare dalga okunan enkoderden veriler Şekil 8.4'teki gibi osiloskop yardımı ile okunmuştur.



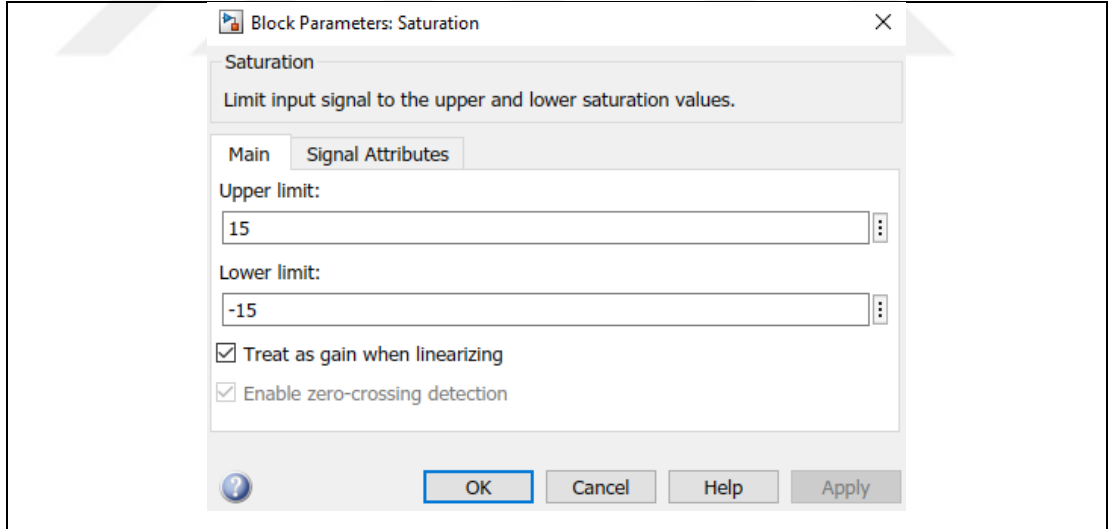
Şekil 8.4: Osiloskop yardımı ile enkoder verisi okuma.

Sistem için Atollic TRUSTUDIO programında hazırlanan gömülü kısma <https://github.com/aethemd/Control-Design-On-a-Steering-Wheel/blob/main/Code> adresinden ulaşılabilir. Simulink ortamında tasarlanan gerçek zamanlı uygulamaları çalıştırmak için kullanılan “Desktop Real-Time” bölümünde simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve simülasyon süreleri 60 sn olarak seçilmiştir. Verilerin bilgisayar ve mikro-denetleyici arasında gönderim ve alımını sağlayacak olan UART modülümüz için “baud rate” olarak 256000, Şekil 8.5'teki gibi seçilmiştir.



Şekil 8.5: UART modülü için COM port ve baud rate seçimi.

Yapılan tüm ayarlamaların gömülü sistem ile örtüştüğünden emin olduktan sonra gömülü sistem debugger yardımı ile mikro-denetleyicimize yüklenmiş ve simülasyonlar üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Simülasyonda sistemi kontrol edecek motora iletilecek olan tork girdisi bir satürasyona sokulduktan sonra UART ile sisteme beslenmektedir. Satürasyon bloğu Şekil 8.6’da gösterilmiştir.

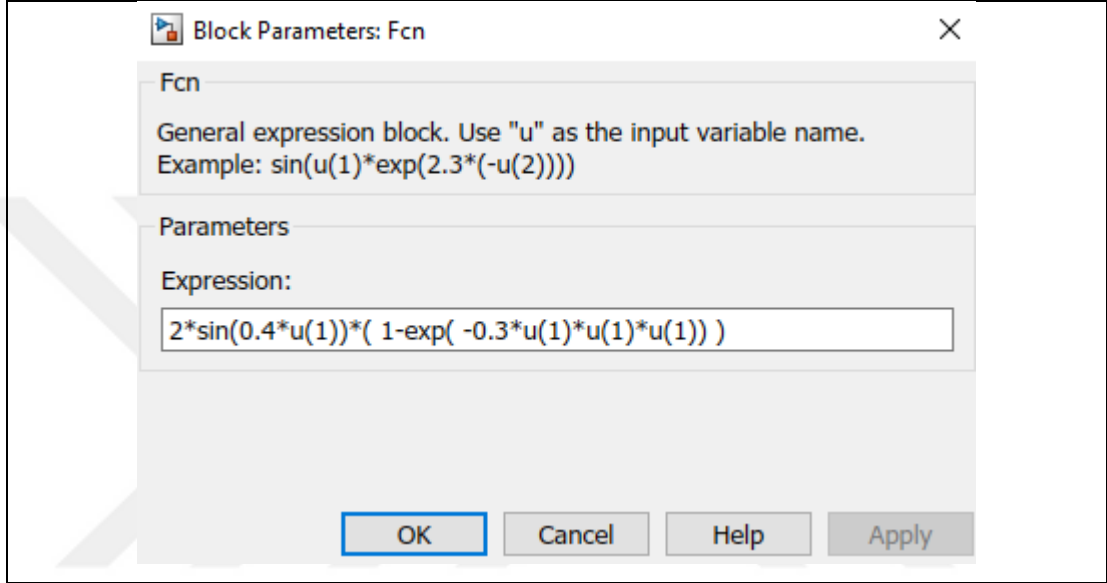


Şekil 8.6: Kontrol çıktısı için satürasyon.

MATLAB çözücü ayarlarında ise “fixed-step, ode3” seçilmiştir ve örnekleme zamanı olarak da 0.0001 değeri seçilmiştir.

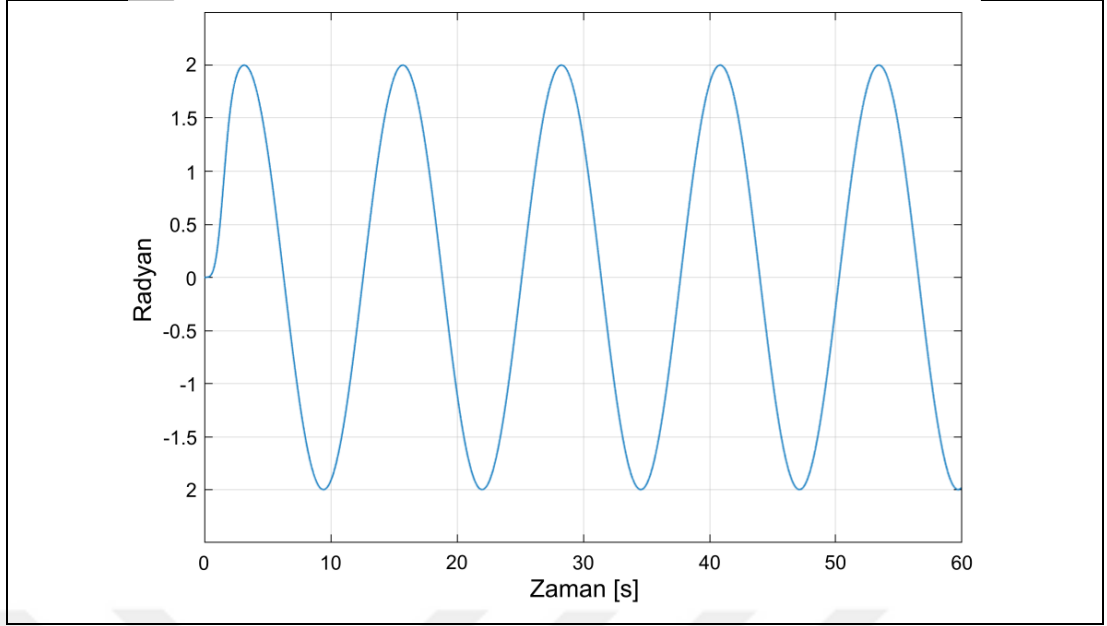
9. SONUÇLAR

Bölüm 7’de anlatılan PID, gürbüz ve standart adaptif olacak şekilde, 3 farklı kontrolcü sistemimiz üzerinde uygulanmıştır. Sisteme takip etmesi beklenen bir yavaşlatılmış sinüs dalgası Şekil 9.1’deki görüldüğü gibi uygulanmıştır. Burada “u(1)” yazan bölümler simülasyon zamanını simgelemektedir.



Şekil 9.1: Yavaşlatılmış sinüs dalgası matematiksel ifadesi.

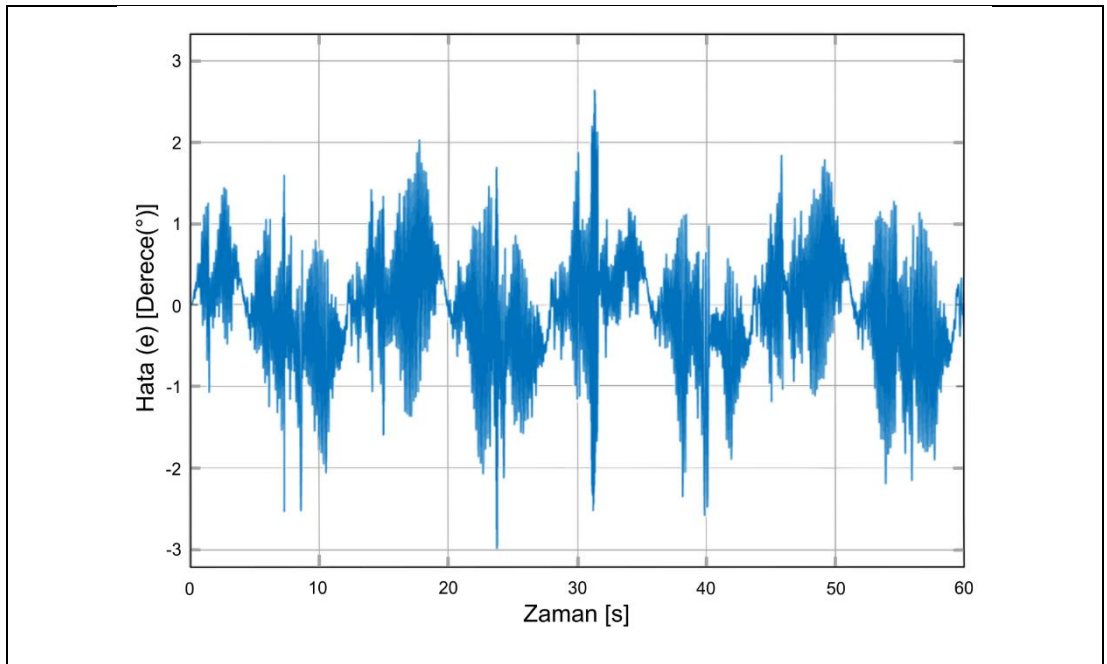
Şekil 9.1’de gösterilen sinüs dalgası formülü Şekil 9.2’de gösterilen, sisteme takip etmesi için beslenecek sinüs dalgasını oluşturmaktadır.



Şekil 9.2: Yavaşlatılmış sinüs dalgasının görünümü.

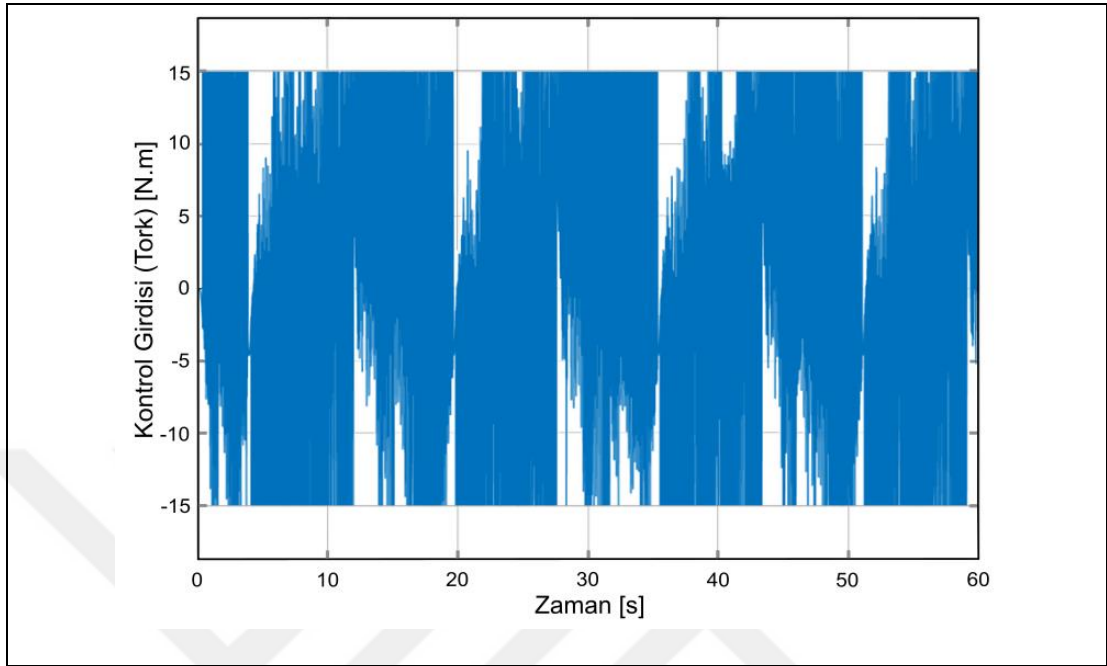
9.1. Kontrolcüler Arasındaki Farklara Yönelik Sonuçlar

İstenilen değeri takip etmesi beklenen direksiyon sistemi için karşılaştırmalar hata ve kontrol girdisi (tork) üzerinden gerçekleştirilmiştir. (7.36) denklemi ile tasarlanan PID kontrolcü ile alınan hata sonucu Şekil 9.3'te verilmiştir.



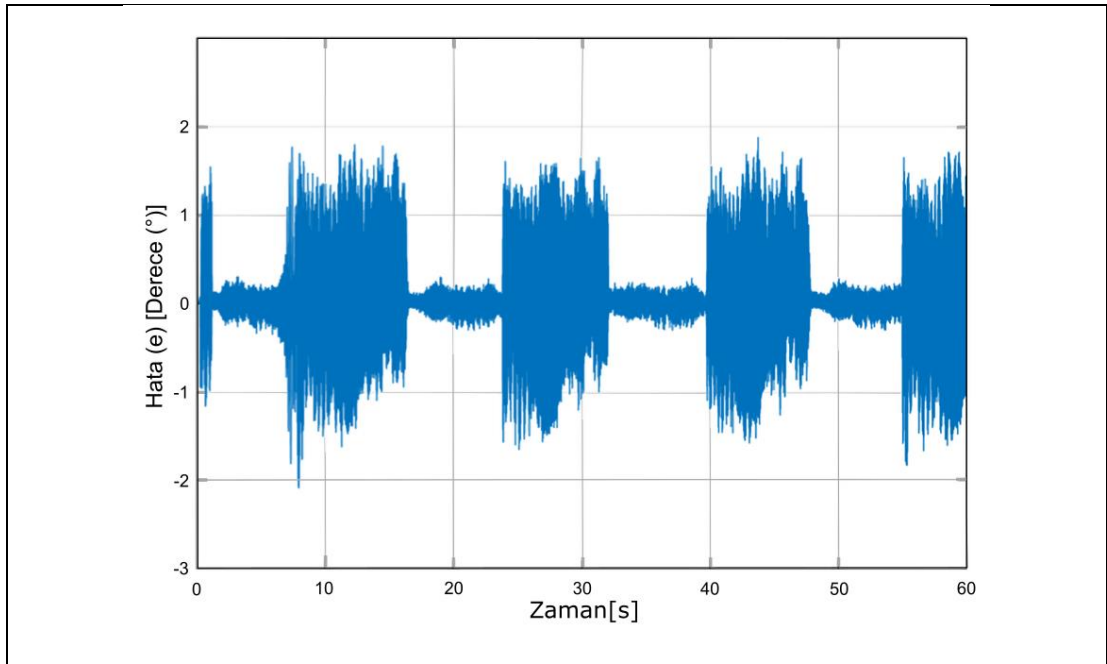
Şekil 9.3: PID kontrol sonucu oluşan hata çıktısı.

PID hata değerini oluşturan direksiyonumuzu harekete geçirecek (7.36) denklemi ile hesaplanan tork girdisi şekil 9.4'teki gibi verilmiştir.



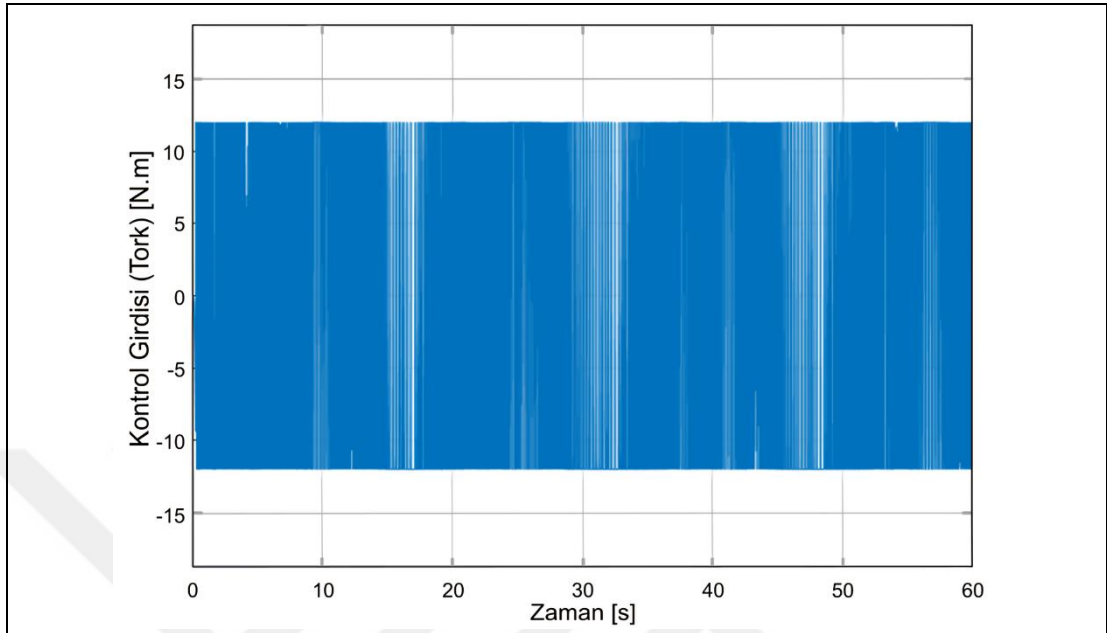
şekil 9.4: PID kontrolde kontrol girdisi sonucu.

Bölüm 7.2.1'de (7.20) denklemi ile tasarlanan yüksek frekans kontrolcü ile şekil 9.2'deki sinüs dalgası takibi sonucu alınan hata grafiği şekil 9.5'teki gibidir.



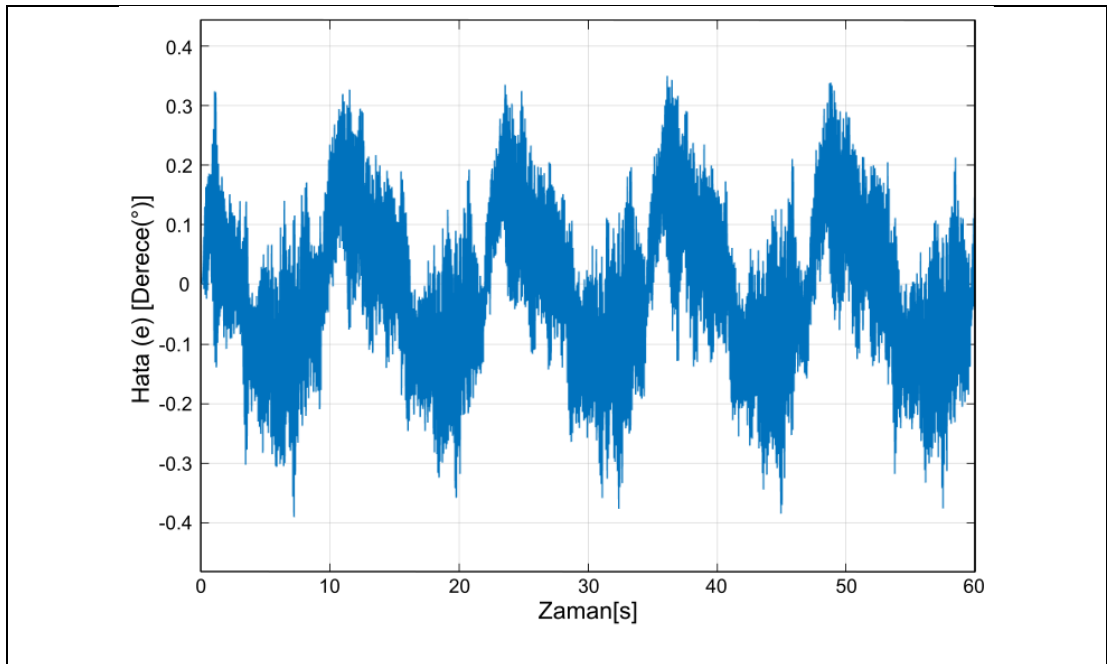
şekil 9.5: Yüksek frekans kontrol sonucu oluşan hata ıktısı.

Yüksek frekans hata değerini oluşturan ve (7.20)'de tasarımı gerçekleştirilen kontrol girdisinin grafiği ise Şekil 9.6'da belirtilmiştir.



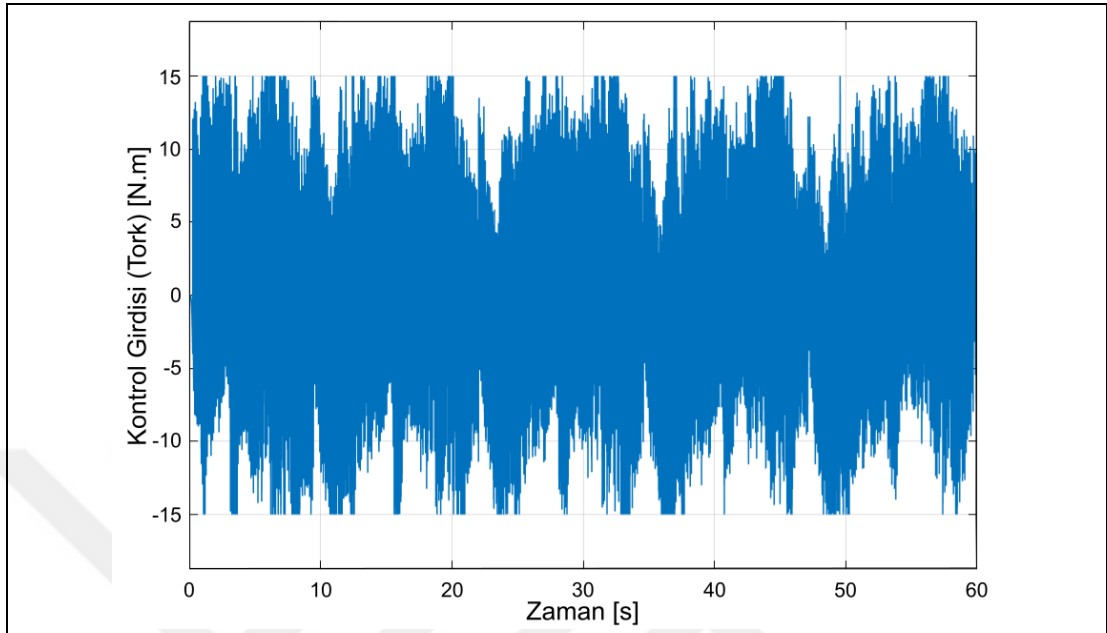
Şekil 9.6: Yüksek frekans kontrolde kontrol girdisi sonucu.

Bölüm 7.1'de (7.18) denklemi ile tasarlanan DCAL kontrolcü ile Şekil 9.7'deki hata grafiği elde edilmiştir.



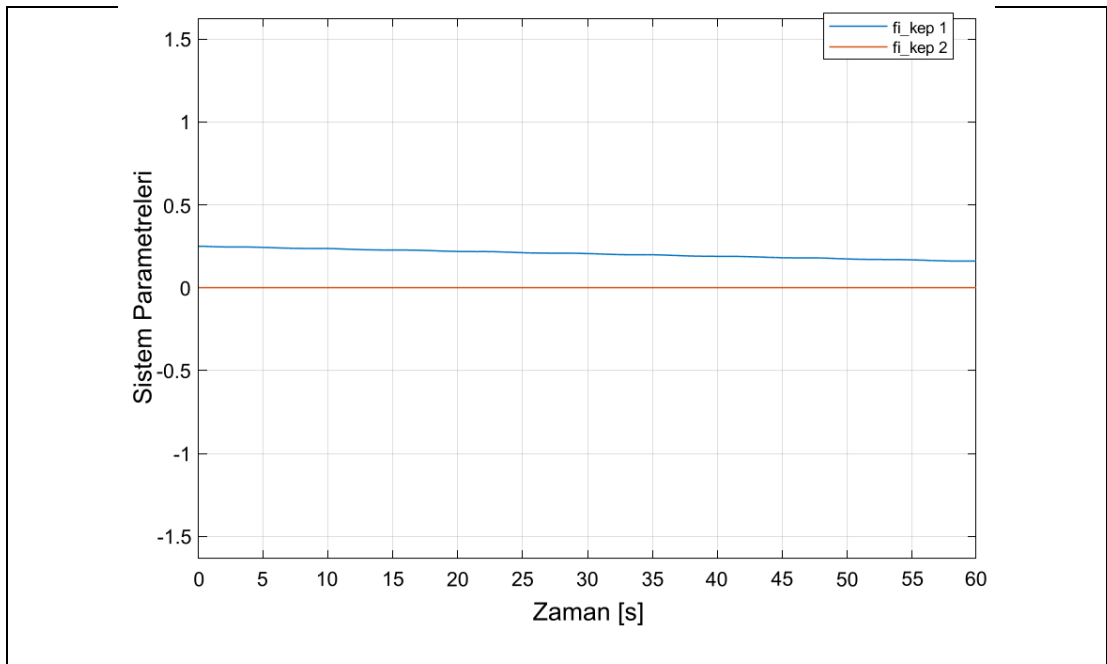
Şekil 9.7: DCAL kontrolcü sonucu oluşan hata çıktısı.

DCAL hata değerini oluşturan ve (7.18)'de tasarımı gerçekleştirilen kontrol girdisinin grafiği ise şekil 9.8'de gösterilmiştir.



şekil 9.8: DCAL kontrolde kontrol girdisi sonucu.

Ayrıca adaptif kontrolde denklem (7.17)'de belirtilen $\hat{\theta}$ sistem parametrelerinin belli bir değere oturduğu şekil 9.9'da belirtilmiştir.



şekil 9.9: DCAL kontrolde sistem parametreleri.

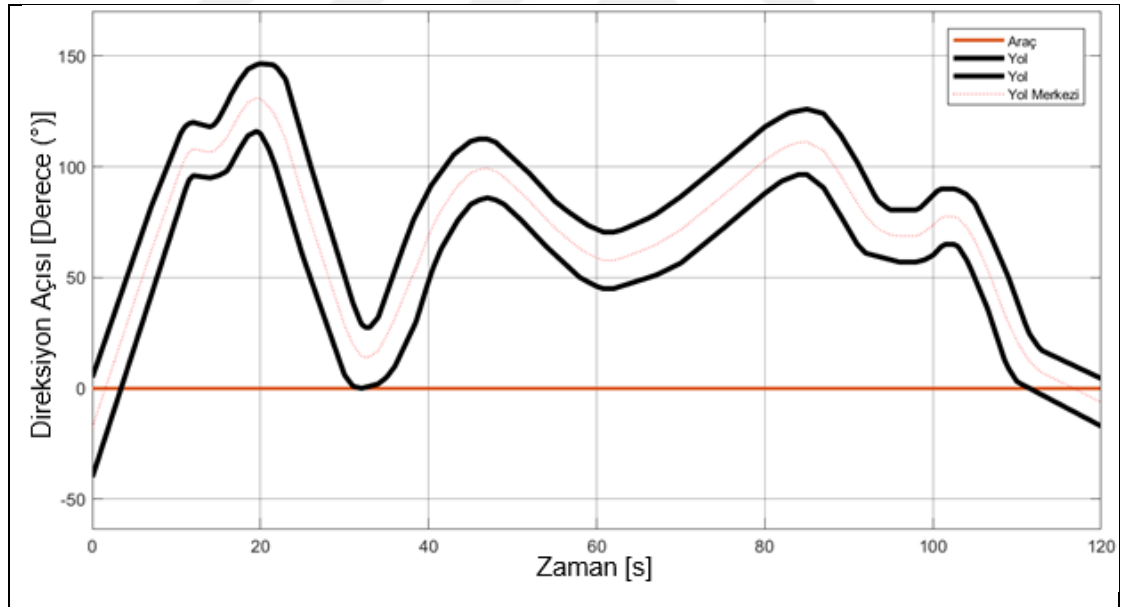
Bölüm 9.1’de, belirtilen üç farklı kontrolcüye de yavaşlatılmış sinüs dalgası, takip etmesi gereken değer olarak verilmiştir. Sonuçlarda sistem dinamiğinin ve seçilen kazanç değerlerinin çok fazla etkisi vardır. PID kontrolde K_p kazancı 850 seçilirken diğer türev ve integral kazançları oldukça düşük seçilmiştir. Yüksek frekans, gürbüz kontrolde ise kazanç PID’dekinin 4’te 1’i oranında seçilmiş, ε değeri hatamızın kaç ile sınırlı kalmasını istiyorsak o değere yakın seçilmiş, α değeri ise 3 olarak seçilmiştir. Bu kontrolcüde ρ değeri en son yavaş yavaş artırılarak ayarlanmıştır. Sistem tahminleri ise olabildiğince gerçeğe yakın seçilmeye çalışılmıştır. Adaptif kontrolde ise kazanç değeri 3000 değerine ayarlanmış ve 7 değeri diyagonal matris olacak şekilde sistemin gerçek parametrelerine yakın seçilmiştir ve sonuçlar bu kazançlara göre irdelenmiştir. Kazançlarda yapılan azaltmalar sistem hatasını arttırmaktadır. Aynı zamanda kazançlarda yapılan artırımlar sistemi zorlamakta, kontrol girdisini yükseltmekte ve sistemi olumsuz etkilemektedir. Hata en düşük adaptif kontrolde meydana gelirken, $0,4^\circ$ ile sınırlı kalmış ve sıfıra çok yakın bir karakteristik sergilemiştir. Adaptif kontrolde sistem parametrelerinin tahmin değerleri sabit bir değere yakınsamış olması, hatayı düşürmede olumlu bir etken olmuştur. Yüksek frekans kontrolde ise hata maksimum 2° derece olmuş ve çoğu zaman sıfıra oldukça yakın değer takip etmiştir. PID kontrolde ise hata maksimum $2,5^\circ$ olacak şekilde sınırlı kalmış ve sinüs dalgasını iyi bir şekilde takip etmiştir.

Sistemimizde kontrol girdisi olan tork ise her kontrolcüde farklı bir karakteristik izlemiştir. En yüksek frekanslı tork değerine, yüksek frekans kontrolde rastlanmıştır. Adaptif ve PID kontrol tasarımlarımızda ise sisteme girdi olarak verilen hesaplanan tork, birbirine çok yakın değerler almış fakat adaptif kontrolde daha yumuşak bir kontrol girdisi elde edilmiştir ve bu hata grafiklerinde de etkin bir rol oynamıştır. Model tabanlı kontrol olan yüksek frekans ve adaptif kontroller, diğer bir kontrol olan PID kontrole göre sistem üzerinde daha efektif çalışmıştır. Bir sistemin dinamik modeli çıkartılamamışsa veya çıkartılmasına engeller varsa sistem üzerinde PID kontrol tasarlamak ve sistem kazançlarını ayarlamak problemi oldukça basite indirgeyecek bir yaklaşımdır. Ancak sistem parametreleri biliniyor veya tahmin edilebiliyorsa, sistem dinamiği oluşturmada herhangi bir problem yoksa, model tabanlı kontrolcülerin kullanılması sistemin sağlığı açısından çok önemlidir. Bununla beraber sonuçlardan da anlaşılacağı gibi mekanik bir sistem üzerinde yüksek frekans

kontrol uygulaması yapmanın titreşim probleminden ötürü sistemin ömrünü kötü yönde etkileyeceği yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

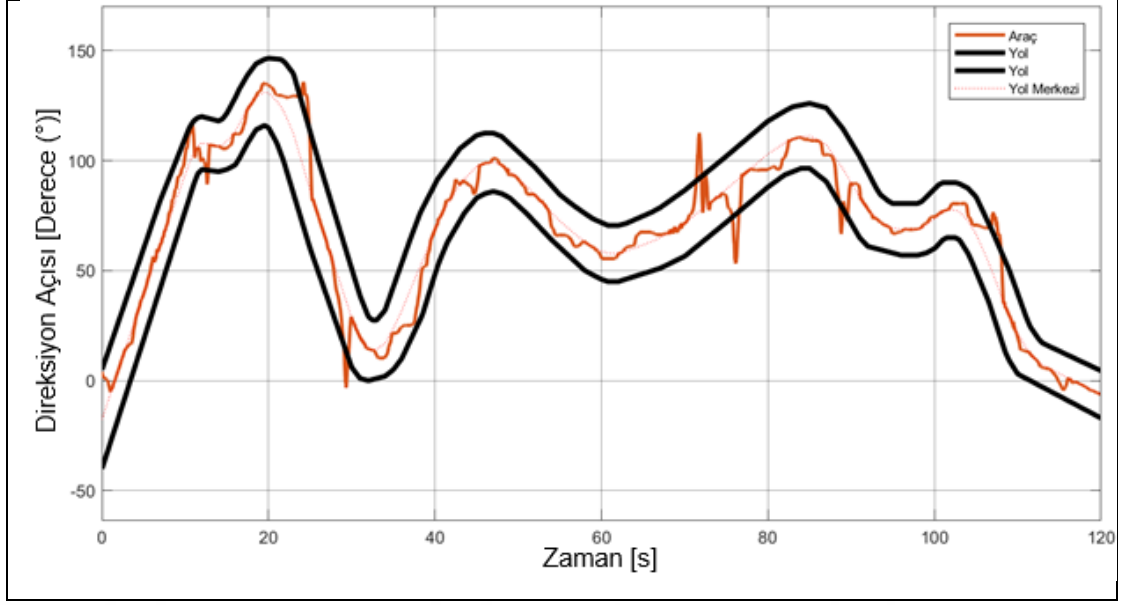
9.2. Haptik Geri Beslemeli Kontrol Sonuçları

Bölüm 7.4’te bahsedilen ve sürücüler için hazırlanacak olan simülasyon ortamı için Simulink programı kullanılmıştır. Bölüm 9.2’de amaç, sürücülere asistanlık yapacak olan direksiyonun rahat bir sürüş keyfi sunarken verilen yoldan çıkan sürücüler uyarmasıdır. Dolayısı ile ilk olarak sürücülerin takip etmesi gereken bir yol verilmesi gerekmektedir. Simulink üzerinde “signal builder” bloğu ile bir yol hazırlanmıştır. Yol merkezi de simülasyon sonrasında grafik ortamında gösterilmektedir. Simülasyon 120 saniye sürmektedir. Simülasyon ortamı Şekil 9.10’da görüldüğü gibi hazırlanmış ve 15 sürücü üzerinde uygulanıp Şekil 7.4’te gösterilen anket bu sürücülere uygulanmıştır.



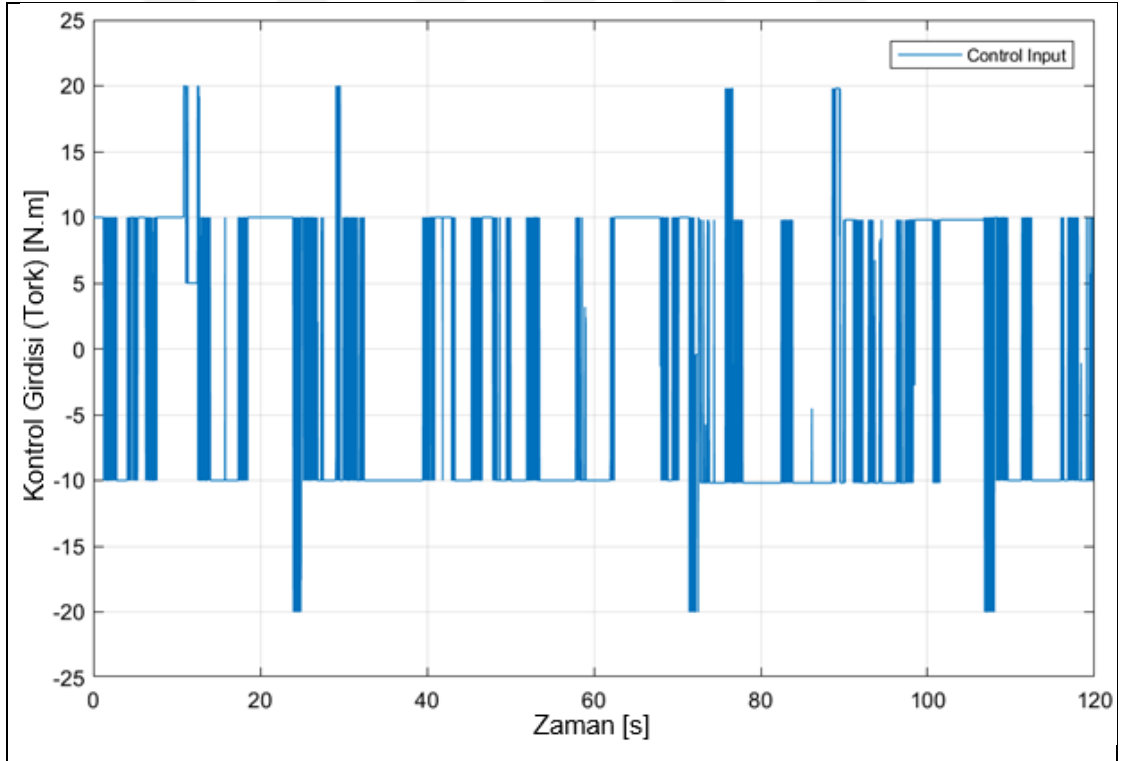
Şekil 9.10: Sürücüler için hazırlanmış haptik sürüş ortamı.

Simülasyon ortamı sürücüler üzerinde denendikten sonra anket sonuçları ve yorumlar toplanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Simülasyon uygulanan bir sürücünün örnek simülasyon sonucu ise Şekil 9.11’deki gibidir.



Şekil 9.11: Örnek bir sürücüden alınmış sürüş sonucu.

Aynı simülasyonda sürücüye eşlik eden kontrol girdisi ise Şekil 9.12’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 9.12: Örnek sürüşten alınan kontrol girdisi sonucu.

Bölüm 7.4'te belirtilen haptik geri beslemeli kontrol uygulaması, tasarlanan PID kontrol kullanılarak simülasyon ortamında sürücülere sunulmuştur. On beş kişi üzerinde uygulanan simülasyonlarda sürücülerin Şekil 9.10'da belirtilen yolu takip etmeleri ve tasarlanan haptik sistemi test etmeleri istenmiştir. Simülasyonlar sonucunda Şekil 7.4'te gösterilen anketin sürücüler tarafından doldurulması istenmiştir. Yapılan anket sonuçlarına göre 15 kişiden 12'si aktif araç kullanmaktadır. Anket sonuçlarında araç kullanan 12 kişinin aracının direksiyonu hidrolik destekli direksiyondur. Dört kişinin sürüş simülatörleri ve haptik sistemler hakkında bilgisi olduğu görülmüştür. Direksiyon sisteminin tasarımı ve sürüş konforu toplanan sonuçlara göre 5 üzerinden 4,27 puan alırken, simülasyonda sürücüye sunulan ortam görsel yönden 5 üzerinden 3,93 puan almış ve EPAS'ın sürücü üzerine etkisi konusunda direksiyon sistemi 5 üzerinden 4,47 puan almıştır. Direksiyon sisteminin tasarımı genel olarak beğenilirken, tasarımının mekanik yönden iyileştirilmesi ve görsel açıdan daha toplu durması yönünden eleştiriler almıştır. Direksiyonun sürüş konforu beğenilirken yol merkezinde oluşan titreşim eleştirilmiş ancak hissiyatının gerçeğe yakınlığı sonuçlarda ön plana çıkmıştır. Simülasyon ortamı görsel olarak beğenilse de 3D olarak tasarlanması, araç görseli eklenmesi gibi iyileştirmeler yapılması konusunda önerilerde bulunulmuştur. Simülasyon için tasarlanan EPAS gerçeğe uyarlanabileceği konusunda gayet başarılı bulunmuş, sürüş sağlığı ve sürücü için elverişli olarak yorumlanmıştır. EPAS'ın sürücü yoldan çıktığında sürücüyü uyarması kusursuz bulunmuş, sürücü yolda giderken sürücüye uyguladığı desteğin hassasiyeti eleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgilere göre direksiyon sistemi üzerinde tasarlanan bir kontrolcünün haptik sistem için kullanılabileceği ve bu sistemin gerçeğe kolaylıkla uyarlanabileceği görülmüştür. Üzerinde çalışılan simülasyon uygulamaları ve kontrol tasarımları başarılı olup ileride yapılacak olan çalışmalar için örnek olmuştur.

10. ÖNERİLER

Bu çalışmada bir direksiyon sistemi üzerinde üç farklı kontrolcü tasarlanıp kıyaslanırken aynı zamanda kontrolcülerden biri ile haptik sistem geliştirildi. Çalışma aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurularak geliştirilebilir;

- Kontrolcüler arasındaki farklar ortaya konulurken sinüs dalgası takibi için kıyaslamalar gerçekleştirildi. Farklı değer takibi için simülasyonlar tekrarlanabilir ve tekrarlar üzerinde kıyaslamalar yapılabilir.
- Direksiyon sisteminde sökülebilir bağlantılar, sistemin kolay taşınabilir olması için olabildiğince fazla kullanılmıştır. Fakat bu bağlantılar, sistem üzerinde kontrol kazançları ayarlanmasında zorluklar yaşatmıştır. Daha rijit tasarımlar gerçekleştirilebilir.
- Direksiyon sisteminde motor ile direksiyon şaftı dişlileri, kayış ile montajlanmıştır. Sistem için farklı bir bağlantı modeli geliştirilebilir.
- Bu çalışmada üç farklı kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcü çeşitliliği artırılabilir.
- Zaman problemi yüzünden haptik geri beslemeli kontrol algoritması PID kontrol ile uygulanmıştır. Haptik kontrolün farklı algoritmalar ile tasarlanıp bu algoritmalar ile de simülasyonları gerçekleştirildikten sonra karşılaştırmalar yapılabilir. Aynı zamanda haptik kontrol simülasyonu için 3D bir ortam hazırlanabilir ve araç görseli simülasyona eklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Rajamani R., (2006), “Vehicle Dynamics and Control”, First Edition, Springer Science-Business Media, Inc.
- [2] Barron M. B., Powers W. F., (1996), “The role of electronic controls for future automotive mechatronic systems”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1(1), 80–88.
- [3] Chugh T., Bruzelius F., Klomp M., Shyrokau B., (2020), “An approach to develop haptic feedback control reference for steering systems using open-loop driving manoeuvres”, Vehicle System Dynamics, 58(12), 1953–1976.
- [4] Johannesson M., Lillberg H., (2018), “Investigation of Steering Feedback Control Strategies for Steer-by-Wire Concept”, Master of Science Thesis in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering, Linköping University.
- [5] Nazaruddin, Adhitya M., Sumarsono D. A., Siregar R., Heryana G., (2020), “Review of electric power steering type column steering with booster motor and future research for EV-bus”, AIP Conference Proceedings, 2227(1). 020016.
- [6] Nazaruddin N., Zainuri F., Siregar R., Heryana G., Adhitya M., Sumarsono D. A., (2019), “Electric power steering: An overview of dynamics equation and how it’s developed for large vehicle”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012112, Bali, INDONESIA, 7-8 August.
- [7] Mohellebi H., Kheddar A., Espié S., (2009), “Adaptive haptic feedback steering wheel for driving simulators”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58(4), 1654-1666.
- [8] Mohellebi H., Espié S., Kheddar A., (2001), “Haptic feedback models for driving simulator - Vibrating seat and haptic feedback steering wheel”, Proceedings 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN 2001), 546–550, Paris, FRANCE, 18-21 Sept.
- [9] Zaremba A., Davis R. I., (1995), “Dynamic analysis and stability of a power assist steering system”, Proceedings of the American Control Conference (ACC'95), 4253–4257, WA, USA, 21-23 June.
- [10] Bajcinca N., Cortesao R., Hauschild M., Bals J., Hirzinger G., (2004), “Haptic Control for Steer-by-Wire Systems”, Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), 2004-2009, NV, USA, 27-31 Oct.
- [11] Huang A. R. W., Chen C., (2003), “A low-cost driving simulator for full vehicle dynamics simulation”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 52(1), 162–172.

- [12] Switkes J. P., Rossetter E. J., Coe I. A., Gerdes J. C., (2006), "Handwheel force feedback for lanekeeping assistance: Combined dynamics and stability", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 128(3), 532–542.
- [13] Shim Y. A., Park K., Lee S., Son J., Woo T., Lee G., (2020), "FS-Pad: Video game interactions using force feedback gamepad", *UIST 2020 - Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 938–950, Virtual Event, USA, 20-23 Oct.
- [14] Andrews S., Mora J., Lang J., Lee W. S., (2006), "Hapticast: a physically-based 3D game with haptic feedback", *Proceedings of FuturePlay 2006: The International Academic Conference on the Future of Game Design and Technology*, 1–8, London, UK, 10-12 Oct.
- [15] Bargerhuff M. E., Cowan H., Oliveira F., Quek F., Fang B., (2010), "Haptic glove technology: Skill development through video game play", *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 104(11), 688–699.
- [16] Bozovic V., (2008), "Medical Robotics", First Edition, I-Tech Education and Publishing.
- [17] Almusawi A. R. J., Dülger L. C., Kapucu S., (2016), "Haptik Teknoloji ile Robot Kolunun Denetimi ve Medikal Operasyonlarda Uygulanabilirliği", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'2016*, 159-165, Eskişehir, TÜRKİYE, 26 Ekim.
- [18] Tanida K., Mizoguchi T., Ohnishi K., (2013), "Development of 3-DOF haptic surgical trocar robot using tendon-drive", *2013 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2013*, 516–521, Vicenza, ITALY, 27 Feb. – 1 March.
- [19] Lahav O., Mioduser D., (2008), "Haptic-feedback support for cognitive mapping of unknown spaces by people who are blind", *International Journal of Human Computer Studies*, 66(1), 23–35.
- [20] Kim Y. S., Collins M., Bulmer W., Sharma S., Mayrose J., (2013), "Haptics Assisted Training (HAT) System for children's handwriting", *2013 World Haptics Conference, WHC 2013*, 559–564, Daejeon, KOREA(South), 14-17 April.
- [21] Rama Krishna A., Sowmya Bala G., Sastry A. S. C. S., Bhanu Prakash Sarma B., Sai Alla G., (2012), "Design And Implementation Of A Robotic Arm Based On Haptic Technology" *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 3098–3103.
- [22] Goodrich M. A., Quigley M., (2005), "Learning Haptic Feedback for Guiding Driver Behavior", *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2507-2512, The Hague, Netherlands, 10-13 Oct.

- [23] Rodriguez-Angeles A., Sira-Ramirez H., Garcia-Antonio J. A., (2013), "Haptic Steering by Wire based on High Gain GPI Observer - Controller techniques", Congreso Nacional de Control Automático, 778-783, Baja California, Mexico, 16-18 Oct.
- [24] Harrer M., Pfeffer P., (2017), "Steering Handbook", First Edition, Springer International Publishing.
- [25] Web1, (2021), <http://meslek.eba.gov.tr/moduller/Direksiyon%20Sistemleri.pdf>, (Erişim Tarihi: 24.12.2021)
- [26] Kokotovic V. V., Grabowski J., Amin V., Lee J., (1999), "Electro hydraulic power steering system", SAE Technical Papers, 108, 661–671.
- [27] Xue Y., Watton J., (2005), "Modelling of a hydraulic power steering system", International Journal of Vehicle Design, 38(2–3), 162–178.
- [28] Baharom M. B., Hussain K., Day A. J., (2013), "Design of full electric power steering with enhanced performance over that of hydraulic power-assisted steering", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 227(3), 390–399.
- [29] Kim J. H., Song J. B., (2002), "Control logic for an electric power steering system using assist motor", Mechatronics, 12(3), 447–459.
- [30] Liu Z., Yang J., Liao D., (2003), "The optimization of electric power assisted steering to improve vehicle performance", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 217(8), 639–646.
- [31] Zaremba A. T., Liubakka M. K., Stuntz R. M., (1998), "Control and steering feel issues in the design of an electric power steering system", Proceedings of the American Control Conference, 36–40, PA, USA, 26 June.
- [32] Nguyen V. G., Guo X., Zhang C., Tran X. K., (2019), "Parameter estimation, robust controller design and performance analysis for an electric power steering system", Algorithms, 12(3), 57.
- [33] Rodriguez-Angeles A., Garcia-Antonio J. A., (2014), "Active disturbance rejection control in steering by wire haptic systems", ISA Transactions, 53(4), 939–946.
- [34] Fankem S., Müller S., (2014), "A new model to compute the desired steering torque for steer-by-wire vehicles and driving simulators", Vehicle System Dynamics, 52(SUPPL. 1), 251–271.
- [35] Cheon D. S., Nam K. H., (2017), "STEERING TORQUE CONTROL USING VARIABLE IMPEDANCE MODELS FOR A STEER-BY-WIRE SYSTEM", International Journal of Automotive Technology, 18(2), 263–270.

- [36] Astrom K. J., Murray R. M., (2008), "Feedback Systems", 1st Edition, Princeton University Press.
- [37] Baruh H., (2015), Applied Dynamics", 1st Edition, Taylor & Francis Group, LLC.
- [38] De Wit C. C., Guégan S., Richard A., (2001), "Control design for an electro power steering system: Part i the reference model", 2001 European Control Conference, ECC, 3611–3616, Porto, Portugal, 4-7 Sept.
- [39] Du H., Zhang Q., Chen S., Fang J., (2019), "Modeling, simulation, and experimental validation of electro-hydraulic power steering system in multi-axle vehicles", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 233(2), 317–332.
- [40] Govender V., Müller S., (2016), "Modelling and Position Control of an Electric Power Steering System", IFAC-PapersOnLine, 49(11), 312–318.
- [41] Baldursson S., (2005), "BLDC Motor Modelling and Control", Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers Tekniska Hogskola.
- [42] Chatterjee M., Rajguru C., Wadkar A., (2013), "Mathematical modelling of automotive electric power assist steering system", Proceedings of the 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2013, 1389–1396, Mysore, India, 22-25 August.
- [43] Palm W., J., (2014), "System Dynamics", Third Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [44] Klee H., Allen R., (2018), "Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink", Third Edition, Taylor & Francis Group.
- [45] Web 2, (2022), <https://engineeringmedia.com/map-of-control>, (Erişim Tarihi: 04.02.2022)
- [46] Astrom K. J., Wittenmark B., (1997), "Computer-Controlled Systems", Third Edition, Prentice Hall.
- [47] Marquez H. J., (2003), "Nonlinear Control Systems Analysis and Design", 1st Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [48] Ozbay U., Zergeroglu E., Sivrioglu S., (2008), "Adaptive backstepping control of variable speed wind turbines", International Journal of Control, 81(6), 910-919.
- [49] Zhang Q., Wang J., Yang Z., Chen Z., (2019), "High-frequency feedback robust control for flocking of multi-agent system with unknown parameters", Automatika, 60(1), 28–35.
- [50] Zhang J., Guo L., (2019), "Theory and Design of PID Controller for Nonlinear

Uncertain Systems", IEEE Control Systems Letters, 3(3), 643–648.

- [51] Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y., (2006), "PID Control System Analysis and Design: Problems, Remedies, and Future Directions", IEEE Control Systems, 26(1), 32-41.
- [52] Gerov R., Jovanović Z., (2018), "A Simple Method of Tuning PI Controller for Integrator Dead/Time Processes", SISY 2018 - IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Proceedings, 51–55. Subotica, Serbia, 13-15 September.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Ethem DANIŞ, 2014 yılında eğitimine başladığı Ondokuzmayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2018 yılında birincilik ile tamamladı. 2019 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.



EKLER

EK A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Çalışmalar

Danis A., Zergeroğlu E., (2021), “Bir Direksiyon Sistemi Üzerinde Kontrol Uygulamaları”, International Congress on Scientific Advances, 116-121, TURKEY, 22-25 December.

