



**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**STABİLİZE KAMERA PLATFORMLARININ
DİNAMİK MODELLENMESİ, KONTROL
SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

Muhammed Talha KORKMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalını

**Ağustos-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ BİLDİRİMİ

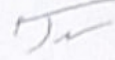
Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammed Talha KORKMAZ

Tarih: 01.09.2020



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

STABİLİZE KAMERA PLATFORMLARININ DİNAMİK MODELLENMESİ, KONTROL SİSTEMİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Muhammed Talha KORKMAZ

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. A. Engin ÖZÇELİK

2020, 91 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. İsmail SARITAŞ
Doç. Dr. A. Engin ÖZÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Onur İNAN**

Stabilize platformlar taşıdıkları sistemleri üzerlerinde bulundukları platformun hareketinden bağımsız olarak istenilen vektöre doğrultmak için kullanılırlar. Bu tez kapsamında, kamera taşıyan iki serbestlik dereceli bir kardan sisteminin modellenmesi, kontrol sistemi tasarımı ve optimizasyonu ele alınmıştır. Sistemin öncelikle dinamik modeli matematiksel olarak tanımlanmış, ardından sistem tanımlama metodolojisi ile sistem parametreleri tespit edilmiştir. Ardından, model esaslı kontrol sistemleri olan, doğrusal kontrolcülere örnek olarak bir PID temelli kontrol sistemi ve doğrusal olmayan kontrol sistemlerine örnek olarak da kayan kipli kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarım esnasında, performans ve gürbüzlük başarımlarını artıracak teknikler, literatür araştırması ile elde edilmiş ve tasarıma uygulanmıştır. Ardından, tasarlanan sistemin parametrelerini optimize etmek için genetik algoritma ile optimizasyon altyapısı hazırlanmış, ceza fonksiyonu tanımlanmıştır. Tasarlanan kontrol sistemleri ve optimize edilmiş halleri örnek senaryo ve bozucu giriş altında gerek benzetim ortamında gerek deneysel veriler ile analiz edilmiş ve sonuçlar – başarımları – gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: genetik algoritma, kayan kipli kontrol, kontrol sistemi, optimizasyon

ABSTRACT

MS THESIS

DYNAMIC MODELLING, CONTROL AND OPTIMIZATION OF A STABILIZED GIMBAL SYSTEM

Muhammed Talha KORKMAZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHATRONIC ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. A. Engin ÖZÇELİK

2020, 91 Pages

**Jury
Prof. Dr. İsmail SARITAŞ
Assoc. Prof. Dr. A. Engin ÖZÇELİK
Asst. Prof. Dr. Onur İNAN**

Stabilized systems are used to direct the payload to the desired direction regardless of the motion of the platform which they are put on. In the scope of this thesis, a gimbal system with two degrees of freedom is studied. First, the dynamic model of the system is derived as a mathematical model. Then, using system identification procedure, the parameters of the model are identified. After the identification, model based control systems, namely, PID for a linear controller and sliding mode controller for a nonlinear controller, are designed. During the derivation of the controllers, novel methods derived from the literature survey are implemented that cause the systems robustness and overall performance to increase. To select the best controller gains, genetic algorithm based optimization technique is selected and prepared to tune the parameters of the controllers. The cost function is designed to satisfy the requirements and constraints. Finally, the controllers are tested both on simulation and on experimental setup and under the disturbance effects. Finally their performance metrics and results are analyzed and reported.

Keywords: control systems, genetic algorithms, nonlinear control, optimization

ÖNSÖZ

Öncelikle bu tez çalışması için gerekli altyapı ve imkanları sağlamasından dolayı TÜBİTAK SAGE'ye teşekkür ederim. Çalışma esnasında yardım ve desteklerinden dolayı Sn. Tayfun ÇELİK'e, Sn. Burak Eren BİRİNCİ'ye ve Optik Tasarım Birimi'nde ve enstitü bünyesinde desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkür ediyorum. Tüm lisansüstü program akademik sürecinde ve tez sürecinde yol gösteren danışmanım Sn. Doç. Dr. A. Engin ÖZÇELİK'e de tüm yardım ve desteği için teşekkür ediyorum. Sonsuz destekleri için de aileme ayrıca teşekkür ediyorum.

Muhammed Talha KORKMAZ
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Stabilize Platformlar.....	2
1.2 Genetik Algoritmalar.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	11
3. SİSTEM TANIMLAMA.....	26
3.1 Stabilize Platform.....	26
3.2 Sistem Dinamik Modeli	27
3.3 Sistem Tanımlama Prosedürü.....	29
4. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI.....	41
4.1 PID Temelli Kontrol Sistemi Tasarımı.....	42
4.2 Kayan Kipli Kontrol Sistemi Tasarımı	46
4.3 Gözlemci Tasarımı.....	56
5. TEST ORTAMLARI	60
5.1 Gerçek Sistem	60
5.2 Benzetim Ortamı.....	60
6. GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYON	63
6.1 Problemin Genetik Algoritma ile Temsili	63
6.2 Genetik Algoritma ile Kullanılacak İşlemler	64
6.3 Ödül Fonksiyonu Tasarımı.....	64
6.4 Eğitim Parametreleri.....	69
7. DENEY TASARIMI.....	72

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	73
8.1 Benzetim Ortamı ile Gerçek Sistemin Karşılaştırılması.....	73
8.2 Tasarlanan Kontrol Sistemlerinin Gerçek Sistem Üzerinde Karşılaştırılması.....	77
8.3 Bozucu Giriş Altındaki Performanslar	82
8.4 Değerlendirme.....	85
9. KAPANIŞ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ.....	90



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Sönüm katsayısı (kg/s)
E_{ss}	: Durağan durumdaki hata
G_c	: Kontrol sistemi transfer fonksiyonu
G_o	: Açık çevrim kontrolcü ve sistemin transfer fonksiyonu
G_p	: Dinamik sistem transfer fonksiyonu
G_s	: Kapalı çevrim kontrolcü ve sistemin transfer fonksiyonu
H_∞	: H-sonsuz optimal kontrol
I	: Akım (Amper)
J	: Atalet ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
K	: Yay sabiti (kg/s^2)
K_D	: PID temelli kontrol sisteminde D kazancı
K_e	: Hız gözlemcisi kazancı
K_I	: PID temelli kontrol sisteminde I kazancı
K_p	: PID temelli kontrol sisteminde P kazancı
K_t	: Tork sabiti (Nm/I)
M_p	: Adım emrinde aşım oranı
N	: Bir sinyaldeki veri sayısı
N	: PID temelli kontrol sisteminde türev kazancı filtre katsayısı
S	: Laplace operatörü
T_r	: Adım emrinde yüksekme zamanı (s)
T_s	: Adım emrinde oturma zamanı (s)
U	: Kontrol sinyali

v	: Doğrusal hız (metre/saniye)
$v_{\perp}$	: Bakış hattına dik yöndeki doğrusal hız (metre/saniye)
x_1	: Konum vektörü
x_2	: Hız vektörü
μ	: Sinyalin ortalama değeri
ξ_c	: İdeal sönümlleme oranı
ω_c	: İdeal bant genişliği (radyan/saniye)
ω	: Açısal hız (radyan/saniye)
θ	: Açısal konum (radyan)
η	: Aktivasyon fonksiyonu kazancı
λ	: Kayma yüzeyi hata türevi kazancı
γ	: Kayma yüzeyi integral terim kazancı
τ	: Tork (Nm)

Kısaltmalar

BLDC	: Brushless direct current motor, fırçasız doğru akım motoru
FFT	: Fast fourier transform, hızlı fourier dönüşümü
FOV	: Field of view, görüş alanı
GA	: Genetik algoritma
Man	: Manuel olarak ayarlanmış sistem
NI	: Non-linear, doğrusal olmayan
Opt	: Optimize edilmiş sistem
KKK	: Kayan kipli kontrol sistemi
LOS	: Line of sight, bakış hattı

PID : Proportional integral derivative, oransal tümlevsel türevsel

PRBS : Pseudo random binary signal, sözde rastgele ikili sinyal

TF : Transfer fonksiyonu

VAF : Variance accountant for, varyans hesaplama



1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında, stabilize platformların kontrol sistemi tasarımı uçtan uca ele alınmıştır. Üzerinde çalışılan problem iki eksenli bir stabilize platformun konum kontrol sisteminin tasarımı ve kontrol sisteminin performans optimizasyonudur.

Verilen performans isterileri ve üzerinde çalışılacak sistem ile, sistemin matematik modeli oluşturulmuş, bu modele göre farklı kontrol sistemleri geliştirilmiş, geliştirilen kontrol sistemlerinin parametreleri optimize edilmiş ve geliştirilen kontrolcüler benzetim ortamı ve gerçek sistem üzerinde test edilmiştir, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sunulması planlanan katma değer ise otonom bir şekilde kontrol sistemi geliştirilme sürecinin gösterimi olarak hedeflenmiştir. Kontrol sistemi için isteriler ve çalışılacak elektromekanik sistem verildikten sonra, sistem modeli ve benzetim ortamı geliştirilmesi, kontrol sisteminin modele göre geliştirilip ardından isterilere göre optimize edilip sonuçların da gerçek sistem üzerinde gösterilmesi amaçlanmaktadır.

Öncelikle bölüm 1.1’de stabilize platformların ne olduğu ve neden bu sistemlere ihtiyaç duyulduğu, stabilize platformların türleri ve kullanım alanları tanıtılmıştır. Bölüm 1.2’de ise kontrol sistemlerinin parametre optimizasyonu sürecinde tasarlanılıp kullanılacak genetik algoritmaların çalışma mantığı anlatılmıştır.

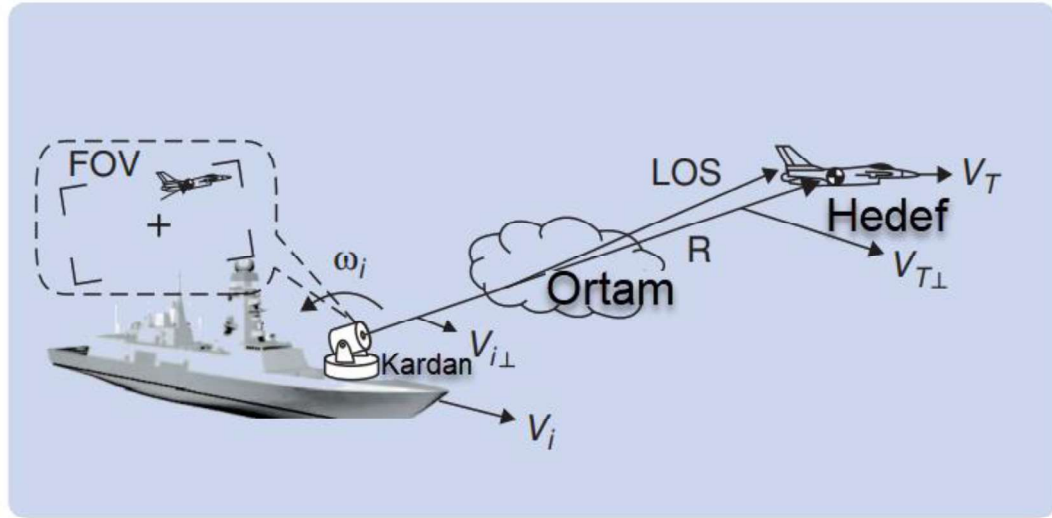
Tasarlanması planlanan kontrol sistemleri model temelli olduğu için, sistemin modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, bölüm 3’te öncelikle üzerinde çalışılacak sistemin dinamik modeli elde edilmiş, ardından da her bir eksen için sistem tanımlama ile dinamik modelin parametreleri bulunmuştur. Elde edilen sistem modeli üzerinden bölüm 4’te PID temelli kontrol ve kayan kipli kontrol olmak üzere iki farklı türde kontrol sistemi geliştirilmiş, bu geliştirilen kontrol sistemleri tasarlanan benzetim ortamında ve gerçek sistem üzerinde test edilmiştir. Ardından, optimizasyon sürecinde kullanılacak bir ceza fonksiyonu tasarlanmıştır. Bölüm 6’da Genetik algoritma ile, belirlenen bu ceza fonksiyonu ve kontrol sistemi performans isterileri üzerinden kontrol sistemi parametrelerini bulmak üzere optimizasyon yapılmıştır. Bölüm 8’de Her bir eksen için tasarlanan kontrolcüler ve optimizasyon sonucu elde edilen kazançları güncellenmiş halleri gerçek sistem üzerinde test edilmiş ve sonuçlar analiz edilip yorumlanmıştır.

1.1 Stabilize Platformlar

Stabilize platformlar, yerleştirildikleri platformun hareketini stabilize edip üzerinde bulunan faydalı yükü stabil tutmakta kullanılırlar. Stabilize platformların temel görevi, üzerinde taşıdıkları faydalı yük ile odak nesne arasındaki Görüş Hattı (İng. Field of View, FOV)’nı korumaktır. 1900’lü yılların başlarında stabilizasyon işlemleri için elektromekanik sistemler kullanılmaya başlanmış (Hilkert, 2008) olmakla birlikte, ilk stabilize platform kavramları milattan önce 300’lü yıllara kadar uzanmaktadır (Sarton, 1959). Farklı alanlarda birçok kullanım uygulamaları olsa da stabilizasyon sistemlerinin temel amacı hedef nesne ile taşıdıkları faydalı yük arasındaki bakış hattını stabil tutmaktır. İlgili görüş hattı formülü eşitlik 1.1’de belirtilmiştir (Hilkert, 2008).

$$\omega_{\text{hedef/görüş hattı}} = v_{\text{hedef} \perp} + \omega_{\text{ortam}} - \omega_{\text{platform}} \quad (1.1)$$

Eşitliğin sol tarafında bulunan $\omega_{\text{hedef/görüş hattı}}$, stabilize platformun hedefi bakış hattına göre sabit tutulması için gerekli olan açısal hızı belirtmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ifadeler ise, stabilizasyon için ihtiyaç duyulan hareketi oluşturan bileşenlerdir. Sırası ile incelenirse, $v_{\text{hedef} \perp}$, hedefin bakış hattına dik yönde hareketini temsil eder. Herhangi bir önleyici karşı hareket yapılmazsa, hedef bakış hattından çıkacaktır. v_p , stabilize platformu barındıran sistemin bakış hattına dik hareketidir. ω_{ortam} , ortamdaki bileşenlerin bozucu girişlerini temsil eder (örneğin ışığın kırılması gibi), uygulamaya göre bu değer yok sayılabilir. Son terim ω_{platform} ise, stabilize platformun kendi hareketini temsil eder.



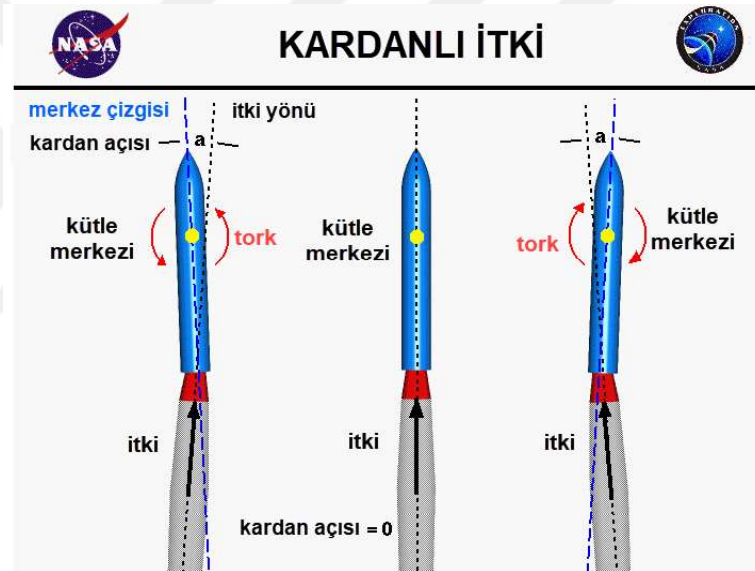
Şekil 1.1. Gemi üzerine yerleştirilmiş bir stabilize platform (Hilkert, 2008)

Şekil 1.1’de, örnek bir stabilizasyon platformu gösterilmiştir. Üzerinde barındığı geminin hareketine karşı koyacak, aynı zamanda hedefin yaptığı harekete göre de kendi konum/hız değerlerini güncelleyecek ve nihayetinde üzerinde taşıdığı faydalı yükü, bu yük kamera veya lazer olabilir, daima hedefe yönlendirilmiş vaziyette tutacaktır.

Stabilize platformların uygulama alanlarına savunma sanayiinde, sivil görüntüleme sistemlerinde ve uzay teknolojilerinde sıkça rastlanılabilir. Şekil 1.2-a’da tankların kule denilen namluyu da kapsayan üst kısmı, tankın ve belirlenen hedefin arasında bakış hattını stabil tutar. Roketlerde de roketin yatıklığından itkinin etkilenmemesi için itki sistemleri stabilize bir platforma Şekil 1.2-b’de gösterildiği gibi entegre edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.2. Tankın kule kısmı stabilizasyonu (a), itki sistemi stabilizasyonu (b) (Anonymous, 2019)

Stabilize platformların en yaygın kullanım alanlarından birisi de bu tezin de konusu olan görüntüleme sistemlerinin stabilizasyonudur. Bu alanda stabilize tutulan sistem üzerinde kamera ve optik sistemleri barındıran görüntüleme sistemidir. Stabilizasyon sayesinde kendi platformunun ve hedefin hareketlerinden etkilenmeyip hedefi sürekli görüntünün merkezinde tutmaya çalışırlar. Bu stabilize platformlara kardanlı sistemler denir.



Şekil 1.3. İnsansız hava aracında stabilizasyon (a), bir füzenin stabilizasyon yapan arayıcı başlığı (b)

Kardan sistemleri sivil alanda birçok uygulamaya sahiptir. Şekil 1.3-a'da görüleceği üzere insansız hava araçlarında, hava aracının dönüşünden ve salınımlarından bağımsız şekilde istenilen yönelimlerde görüntü almak için kullanılırlar. Benzer şekilde kamera kardanları, el ile çekilen görüntülerde yürümeden veya elin titremesi vb. den dolayı oluşan bozucu girişleri görüntüye yansıtmamak için de kullanılır. Kardanlı sistemler askeri alanlarda da sıklıkla kullanılırlar. Şekil 1.3 -b'de ise bir füzenin stabilizasyon yapan arayıcı başlığı gösterilmiştir.

Kardan sistemleri serbestlik derecelerinde göre sınıflandırılırlar. Tek serbestlik dereceli bir sistemde, tek bir motor-ölçer çifti bulunur ve stabilizasyonu yalnızca bu ekseninde yapabilir. 2 serbestlik dereceli bir sistemde, dış kısımdaki eksen iç kısımdaki ekseni taşır, iç eksen ise üzerinde faydalı yükü, yani görüntüleme sistemini taşır. Bu kurguda, iç eksen, dış eksenin hareketlerinden doğrudan etkilenir. 3 serbestlik dereceli bir sistemde ise, benzer şekilde iç içe geçmiş 3 adet eksen bulunur ve her bir eksen, kendisinin dışındaki eksenin hareketlerinden doğrudan etkilenir. Şekil 1.4'te, 3 serbestlik dereceli bir kardanın her bir serbestlik derecesi ayrı ayrı gösterilmiştir. Dönme konfigürasyonu ve eksen sırasına göre farklı konfigürasyonlarda kardan mimarileri bulunmaktadır. 2 serbestlik dereceli bir sistem de yuvarlanma-yunuslama, yunuslama-yuvarlanma veya yunuslama-yan dönme gibi farklı konfigürasyonlarda olabilir.



Şekil 1.4. Stabilize platformun dönü eksenleri (Soule, 2018)

Gerekli stabilizasyonu sağlamak için, kardan sisteminin her bir ekseninde bir motor ve ölçer çifti bulunur. Motorun stabilizasyonu yapmak için gerekli torku üretme görevi vardır. Ölçer ise açısal konumu okur ve kontrol sistemine geri bildirimde bulunur. İstenilen açısal konum ve ölçerin okuduğu açısal konuma göre kontrol sistemi ideal akım/tork çıktısını üretir ve gerçekleştirmesi üzerine motor sürücüsüne ilgili akım/tork komutunu gönderir. Kardan sisteminin en iç ekseninde, jiroskop da bulunabilir. Jiroskop kullanıldığı durumlarda kontrol sistemine hız döngüsü de dahil edileceği için stabilizasyon hassasiyeti artar, sistemde öteki değişkenler sabit kalmak şartıyla bozucu girişlere karşı hassasiyetlerin arttığı ilgili çalışmalarda gösterilmiştir (Sofla ve ark., 2015; Garkushenko ve Lazareva, 2019).

Kullanılacak olan motorlar için isterler, ihtiyaca binaen yapılacak kinematik analizler ile belirlenir. Benzer şekilde kinematik analizler ve işaretleme doğruluğu gibi isterler işlenerek kullanılacak olan ölçer belirlenir. Yüksek hassasiyetli isterleri olan sistemlerde motor olarak BLDC motorlar kullanılmaktadır. BLDC motorlar bakım istememesi, hassas konumlamaya izin vermesi ve her iki yönde de aynı verimle çalışması sebebi ile stabilize platformlar gibi gerek hız gerek hassasiyet isteyen uygulamalarda tercih sebebidir (Anonymous, 1999). Ölçer olarak da açısal konumu okumak için çözücü ve kodlayıcı tercih edilmektedir. Çözücü (İng. Resolver) çevresel şartlara karşı dayanıklı olması ile öne çıkmakta, yalnız analog bir ölçer olduğu için elektromanyetik alandan ve bozucu girişlerden etkilenmektedir. Bir diğer seçenek olarak kodlayıcı ise oldukça hassas ölçüm vermektedir ve dijital bir ölçerdir, yalnız yapısı gereği titreşim gibi bozucu girişlerden etkilenmektedir.

1.2 Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar genel bir optimizasyon ailesine verilen isimdir. 1960'lı yıllarda J. Holland tarafından öne sürülmüş, 1984 yılında genetik algoritmalar ve adaptasyonları ismiyle ilk yayını literatüre kazandırılmıştır. Genetik algoritmalar evrimsel algoritmaların alt başlıklarından birisidir. Optimizasyon metotları arasında, türev alınabilir-alınamayan, doğrusal veya doğrusal olmayan sınır koşulları, sürekli ve/veya ayırık zamanlı parametrelerin her biri ile kullanılabilip verimli sonuçlar alınmasıyla tercih edilen bir konumdadır.

Optimize edilecek problem üzerinde öncelikle bir ceza veya ödül metriği belirlenir. Bu metrik, elde edilen sonucun ne kadar iyi olduğunu nicel olarak bildirir. Sonrasında optimize edilecek parametreler ile belirlenen değer limitleri içerisinde rastgele çözüm adayları türetilir. Rastgele türetilen her bir adayın ceza skorları ölçülür ve kaydedilir. Ceza skoru, problem tanımında belirtilen alt limitin altında ise, bu skora sahip aday tercih edilir. Hiçbir aday gerekli metriği karşılayamıyorsa, çeşitli şekillerde mevcut adaylardan yeni adaylar türetilir ve istenilen başarımla alınana kadar bu süreç devam ettirilir.

Genetik algoritmaları tanımlayan parametreler şunlardır:

Gen: Optimize edilecek parametrelerin her birisi bir adet gendir. Örneğin kontrol sisteminde 4 farklı optimize edilecek kazanç / parametre varsa, bunların her birisine gen denir.

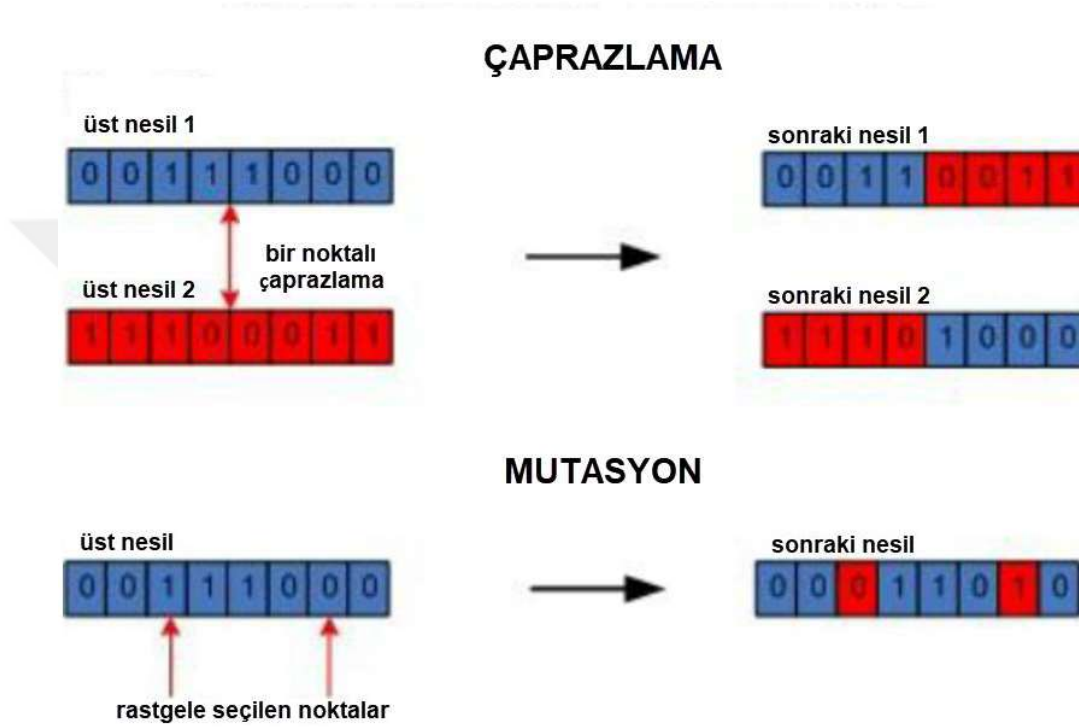
Kromozom: problemin çözüm adayıdır. 4 farklı parametre, yani 4 tane gen optimize edilecek iken, bu dört parametreyi birlikte taşıyan yapıya kromozom denir. Bir kromozom, üzerinde optimize edilecek parametre kadar gen taşır.

Popülasyon: Kromozomlardan oluşan topluluğa verilen isimdir. Örneğin 500 popülasyonlu bir kurguda, 500 adet kromozom bulunmaktadır. Her bir kromozom da bir potansiyel çözüm adayı olduğu için, popülasyonda 500 adet çözüm adayı bulunur.

Çaprazlama (İng. Crossover): 2 adet (bazı yaklaşımlarda daha çok) kromozomun bir veya birkaç yerinden kesilip, daha sonra kesilen parçaların birbirleri ile yer değiştirilerek yeni kromozomlar elde edilmesini sağlayan operasyondur.

Mutasyon: Bir kromozom içerisinde bir veya daha çok genin seçilip, bu gendeki/genlerdeki değerin rastgele değiştirilmesini sağlayan operasyondur.

Çaprazlama ve mutasyon operasyonları Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



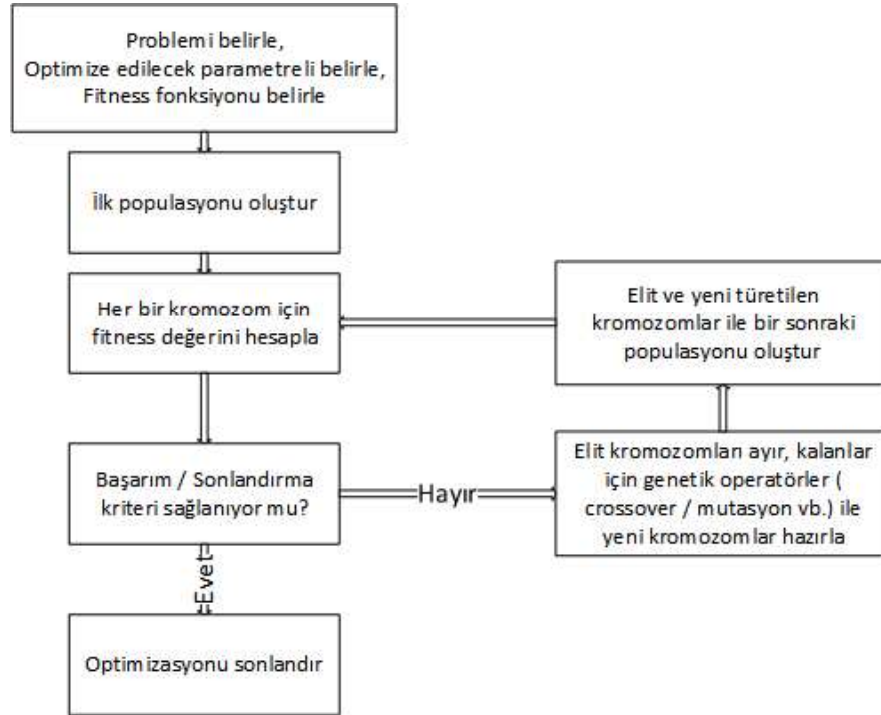
Şekil 1.5 Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin kromozom üzerindeki etkileri (Ioannides ve ark., 2010)

Jenerasyon: Bir popülasyon tamamlanıp, her bir kromozomun (ödül veya ceza) skorunun değerinin hesaplanmasının ardından, yeni kromozomlar oluşturularak ve mevcut kromozomları çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutarak yeni kromozomlar elde edilerek yeni bir popülasyon oluşturulur. Ardışık olarak, oluşturulan her bir popülasyona jenerasyon denir. Jenerasyon kelimesine muadil olarak nesil anahtar kelimesi de kullanılır.

Fitness: Optimizasyon sisteminin başarımlı metriğidir. Skalar bir değerdir, vektör veya matris boyutunda belirtilmez. Bir çözüm önerisi olan, kromozom bünyesindeki genlere göre istenilen metriğe ne kadar yaklaşıldığını ölçen ödül veya ceza fonksiyondur. Birden

çok metrik ile ilgili kısıt veya performans kriteri varsa her bir metrik hesaplanıp bir kazanç ile çarpılır, sonuçlar toplanarak tek bir skor elde edilir. Örneğin bir ders programı optimizasyonunda öğretmenlerin istedikleri gün gelmeleri, dersliklerin çakışmaması, ilgili derslerin ardışık verilmesi ödül fonksiyonunun bileşenleri olabilir. Eğer ödül fonksiyonu kullanılıyorsa optimizasyon bu değeri maksimize etmeye çalışır. Tam tersi şekilde ceza fonksiyonu kullanılıyorsa de optimizasyonda sonucu minimize eden konfigürasyon elde edilmeye çalışılır.

Elitizm: Yeni jenerasyon oluşturulurken, eski jenerasyondan belirli sayıda en iyi skora sahip kromozomun doğrudan yeni jenerasyona aktarılmasına verilen isimdir. Bu sayede, jenerasyonlar geçerken, bulunan en iyi kromozomun, çaprazlama, mutasyon gibi bir operatörle değişip kötü bir hal almasının önüne geçilmiş olunur, çünkü en iyi kromozomların sonraki jenerasyona doğrudan geçişi sağlanmıştır. Geri kalan kromozomlar sonraki jenerasyonda geçirdikleri dönüşümler ile elit kromozomlardan daha iyi skora sahip olurlarsa, kendileri elit kromozom olmuş olurlar. Nihai olarak, jenerasyonlar geçtikçe en iyi skor sürekli iyileşir veya sabit kalır, asla kötüleşmez.



Şekil 1.6. Genetik algoritma çalışma şeması

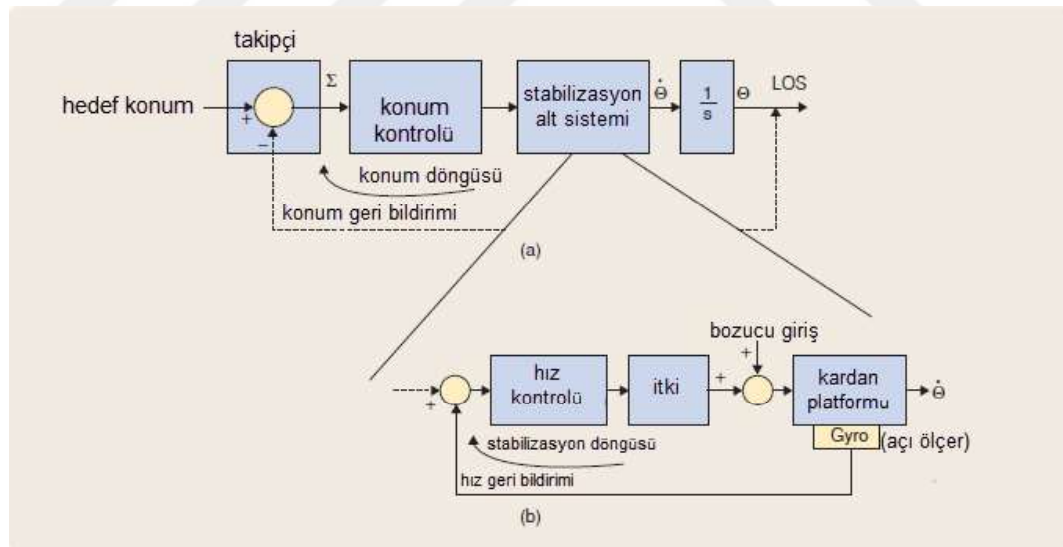
Genetik algoritmalar ile optimizasyon şeması Şekil 1.6’da gösterilmiştir. İlk blok, optimizasyon için en önemli olan bloktur. Problemin nasıl formularize edildiği, tüm optimizasyon sürecini şekillendirir. Kontrol sistemi tasarımından sonra, optimizasyon kısmında daha detaylı şekilde işlenecek olan ceza fonksiyonu belirleme konusu, aynı zamanda çözümün potansiyel etkinliğini de belirler. Örneğin, bilinçsizce seçilmiş, toplam hatanın minimum tutulması yönünde biz ceza fonksiyonu belirlenirse, optimizasyon sonucu sistem durağan duruma hiç ulaşmayıp artı ve eksi yönlerde aşırı salınımlar yapan bir kurguya evrilebilir. Bunun sebebi, bu senaryoda da ceza değerinin düşük olmasıdır, çünkü artı ve eksi yönde yapılan hatalar birbirini dengeleyebilir ve toplam hata sıfıra yakınsayabilir. Bu örnekte, ceza fonksiyonu olarak toplam hata yerine toplam mutlak hata fonksiyonu kullanmak, optimizasyonun gürbüzlüğünü bir tık daha artırır. Pratikte, ceza fonksiyonunu belirlerken tespit etmesi çok daha zor olan durumlar olabilir. Bu durumların etkisi en kötü durumda optimizasyon sonucu önerilen sistemde fark edilir ve ilgili düzenlemeler ceza fonksiyonunda yapıldıktan sonra tekrar optimizasyon yapılır.

Problem kurgusu, ceza fonksiyonu ve optimize edilecek parametreler ve varsa kısıtlar (parametrelerin değer aralığı, parametreler arasında doğrusal – doğrusal olmayan kısıtlar) belirlenir. Ardından, bu kurgu gözetilerek ilk popülasyon rastgele türetilir. Başta belirlediğimiz ceza fonksiyonuna göre, her bir rastgele türetilen kromozomun skoru belirlenir. Skorlar arasında başarımlı metriğini yakalayan varsa optimizasyon sonlandırılıp bu skoru veren kromozom sonuç olarak verilir. Aksi durumda, bu bölümde anlatılan elitizm, çaprazlama, mutasyon vb. metotlar ile bir sonraki jenerasyon için yeni kromozomlar türetilir. Ardından, her bir kromozom için ceza skoru tekrar hesaplanır ve optimizasyon sonuna kadar döngü bu şekilde devam eder.

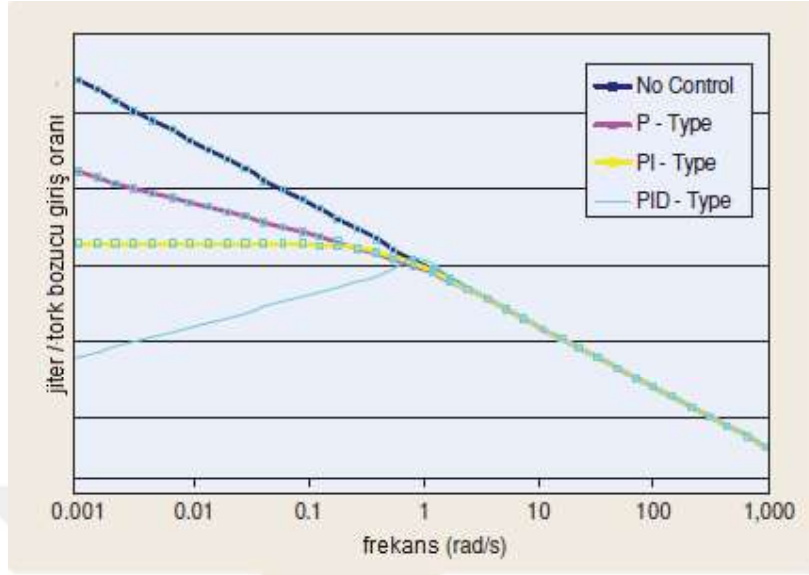
Optimizasyon birkaç şekilde sonlanabilir. Belirlenmiş bir ceza değeri varsa, kromozomların birisi bu değere ulaştığı anda optimizasyon bitirilebilir. Bir diğer seçenek ise jenerasyon sayısını limitlemektir. Verilen sayı kadar jenerasyon geçtikten sonra, son popülasyondaki en yüksek skora sahip kromozom optimizasyon sonucu olarak verilir. Başka bir metot ise süre limiti vermektir, verilen süre sonunda hangi popülasyon mevcut ise, o popülasyonun en yüksek skora sahip kromozomu verilir. Alternatif olarak, jenerasyonlar boyunca en iyi skorun iyileşmesindeki azalma miktarı belirli bir değerin altına inerse, yani skorun iyileşme hızı çok azalırsa, optimizasyon sonlandırılıp mevcut en iyi kromozom verilebilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kardan sistemlerinin kontrolünde literatürde görülen en yaygın metot, sistem kontrolünün temel olarak PID kontrolcüsü ile yapılması, ardından da uyarlanacak başka bir metot ve/veya kontrol sisteminin ilk tasarlanan PID temelli kontrolcü ile kıyası üzerine olmaktadır. Masten (2008) tarafından yapılan çalışmada, kardan sistemlerinin stabilizasyon kontrolü Şekil 2.1’de gösterilen iki döngülü bir yapıda ele alınmış, iç döngü için P, PI ve PID kontrolcüleri bozucu girişlere karşı performansları açısından değerlendirilmiştir. Her ne kadar birçok durumda gerek P gerek PI yeterli düzeyde bir performans verse de isterilerin arttığı zorlu koşullarda Şekil 2.2’de görüleceği üzere PID kontrolcüsünün en ideal kontrol metodu olduğu belirtilmiştir. Bir dıştaki konum kontrol döngüsü için de benzer karakteristiklerin olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada PID kontrol sistemini öne çıkaran, düşük frekanslardaki bozucu girişlere karşı verdiği cevabı olmuştur.

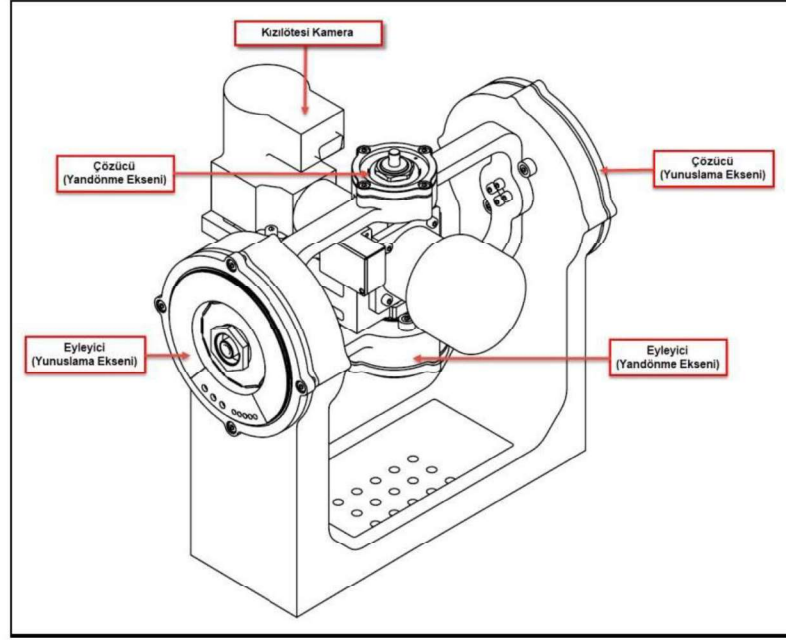


Şekil 2.1. 2 katmanlı kontrol sistemi mimarisi



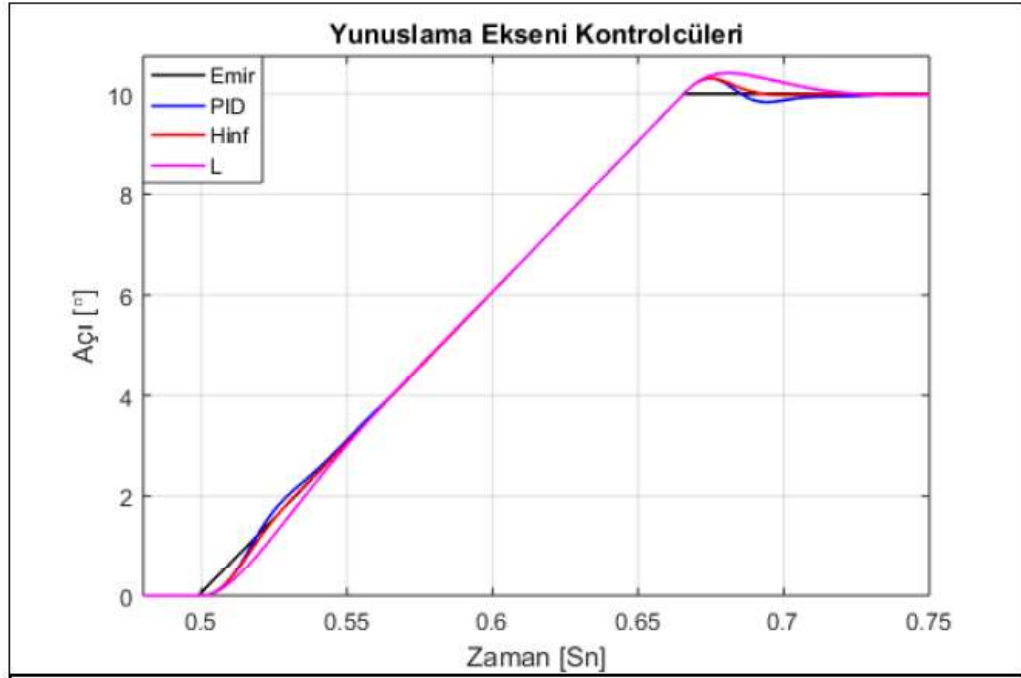
Şekil 2.2. P, PI ve PID temelli kontrol sistemlerinin bozucu girişler altındaki performans karşılaştırması

İki eksenli bir kamera sisteminin konum kontrolü, Doğan (2019) tarafından yapılan çalışmada PID kontrolcüsü ve H_∞ temelli kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada öncelikle sistemin isterileri verilen senaryolar aracılığı ile ve her bir eksenin dönüşüm matrisleri ve kinematik analizler ile çıkarılmıştır. Bu aşamanın sonuçlarına binaen ilgili torku ve ivmelenmeyi türetebilecek bir motor ve işaretleme doğruluğu için de bir ölçer seçimi her iki eksen için de yapılmıştır. Motor olarak fırçasız doğru akım motoru (BLDC), ölçer olarak ise çözücü (İng. resolver) kullanılmıştır. Üzerinde çalışılan platform, yunuslama – yan dönme konfigürasyonuna sahip Şekil 2.3'te görülen sistem olduğu belirtilmiştir.

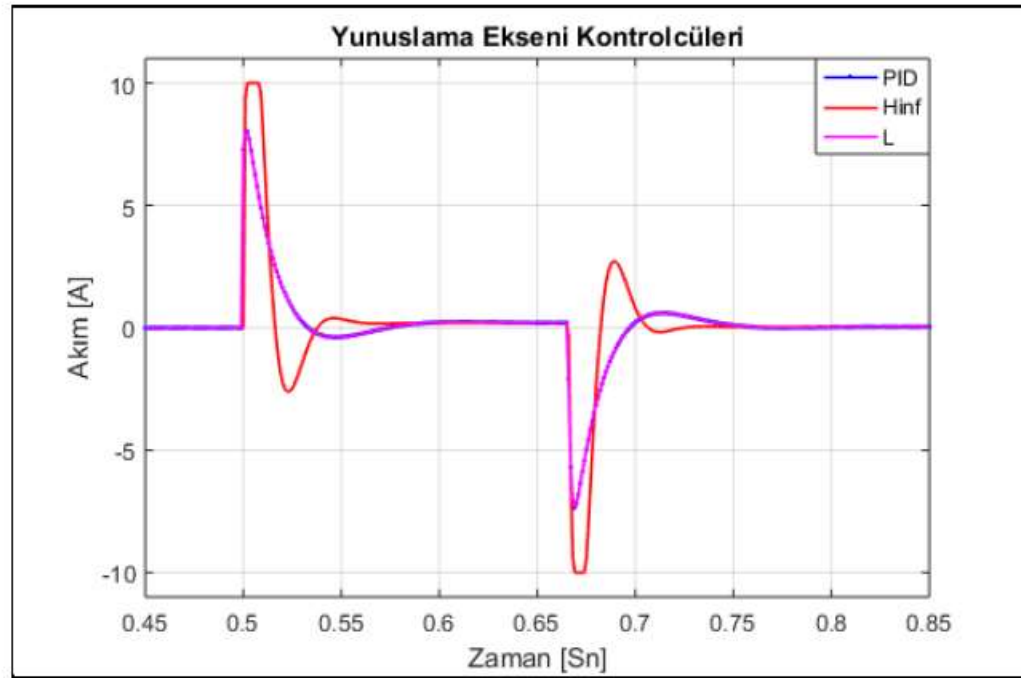


Şekil 2.3. 2 eksenli kardan platformu

Gerek PID temelli kontrolcü gerek H_{∞} temelli kontrolcü model temelli olduğu için sistemin dinamik modelini elde etmek üzere sistem tanımlama yapılmıştır. Sistem tanımlama prosedürünün ardından elde edilen model ile PID ve H_{∞} kontrol sistemleri türetilmiş ve sonuçları analiz edilmiştir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te sırasıyla yunuslama ve yan dönme eksenlerinde kontrol sistemlerinin performansları gözlenmiş ve H_{∞} temelli kontrol sisteminin referans emir ve bozucu girişlere daha iyi cevap verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4. Yunuslama eksen adım emri için PID ve H_{∞} kontrol sistemleri performansı



Şekil 2.5. Yunuslama eksen adım emri için PID ve H_{∞} kontrol sistemleri güç isteri

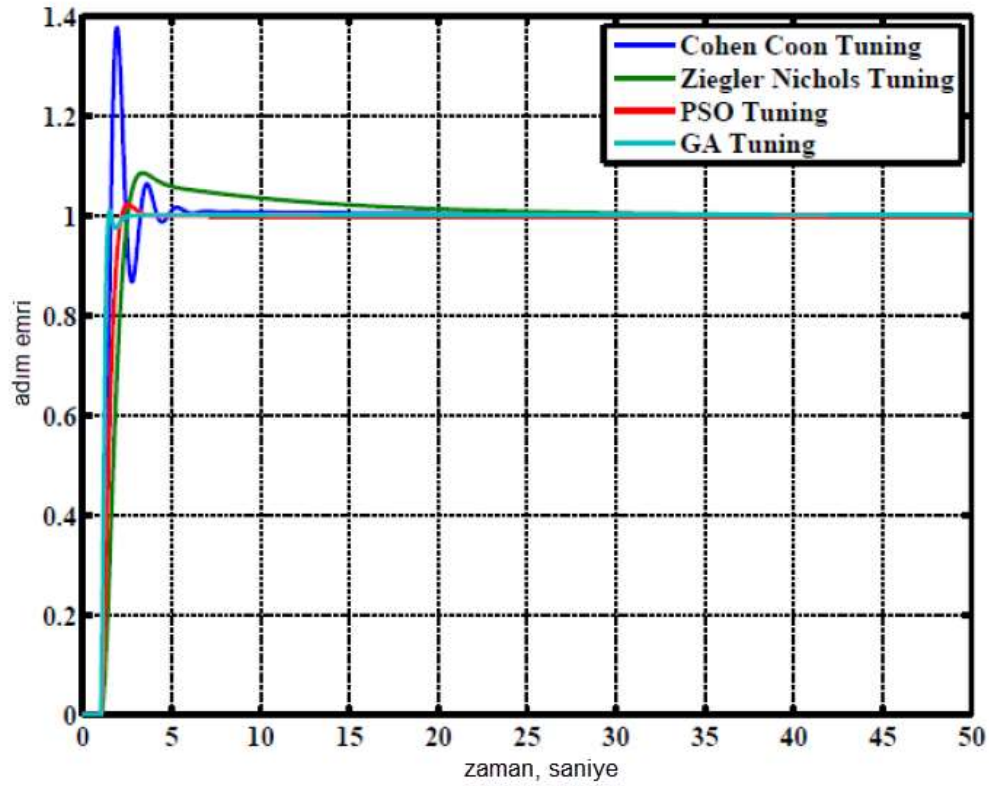
Rajesh ve Kavitha (2015) tarafından yapılan çalışmada, bir kardan sistemi için PID temelli bir kontrolcü tasarlanmış, ardından Ziegler-Nichols, genetik algoritma ve sürü parçacık optimizasyonu teknikleri ile kontrol parametreleri en iyileştirilmiştir. Genetik algoritma ve sürü optimizasyon algoritmasındaki optimizasyonlarda kullanılacak ceza fonksiyonu olarak, eşitlik 2.1’de belirtilen fonksiyon kullanılmıştır.

$$\text{Fitness} = ((1 - \exp(-\beta)) * M_p + E_{ss}) + \exp(-\beta) * (T_s - T_r) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte M_p aşım miktarı, E_{ss} sabit durum hatası, T_s oturma süresi ve T_r ise yükselme zamanı olarak verilmiştir. β parametresi ise ağırlık değeri olup, kullanıcı seçimine bırakılmıştır. Genetik algoritma için Çizelge 2.1’de belirtilen parametrelerin girildiği bildirilmiştir. Tasarlanan kontrol sistemlerinin kapalı döngüde cevapları Şekil 2.6’da verilmiştir. Bildirilen sonuca göre sürü parçacık optimizasyonu en iyi sonucu vermiş, ona en yakın başarımlar ise genetik algoritma ile sağlanmıştır.

Çizelge 2.1 Genetik algoritma için belirlenen parametre seti

Parametre	Değer
Popülasyon Büyüklüğü	50
Azami jenerasyon sayısı	500
Optimize edilecek parametre sayısı	3
Mutasyon oranı	0.3
Çaprazlama oranı	0.8
Seçme Oranı	0.5



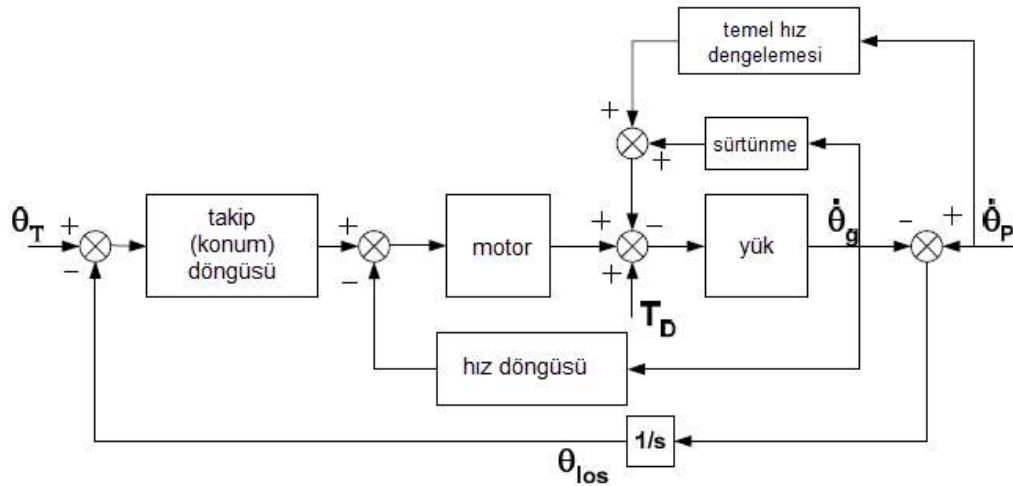
Şekil 2.6. Kontrol sisteminde farklı optimizasyon algoritmalarının çıktılarının gösterimi

Helikopter üzerinde 2 eksenli bir görüntüleme podu stabilizasyonu uygulamalı olarak Sangveraphunsiri (2010) tarafından yapılmıştır. Üzerinde çalışılan sistem Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Çalışmada öncelikle kardanın dinamik modeli türetilmiş, sistemin yan dönme – yunuslama konfigürasyonunda tasarlandığı belirtilmiştir. Kontrol sistemi olarak iç içe 2 seviyeli bir sistem tasarlanmıştır. 2 seviyeli kontrol sistemi kurgusunda iki farklı seçenek olduğu belirtilmiştir. İlki, doğrudan stabilizasyon, iç döngüdeki hız kontrolcüsü doğrudan kardanın içindeki hız ölçerinden beslenir ve hassas bir stabilizasyon yapar. Yalnız bu sistemin dezavantajı, hız ölçer de kardanın içinde bulunması gerektiği için kardan hacmi ve kardan üzerindeki yük büyüyecektir. Alternatif olarak, dolaylı stabilizasyon belirtilmiştir. Dolaylı stabilizasyonda kardan üzerinde hız ölçeri bulunmamakta, ölçer dış eksenin üzerinde bulunmaktadır.



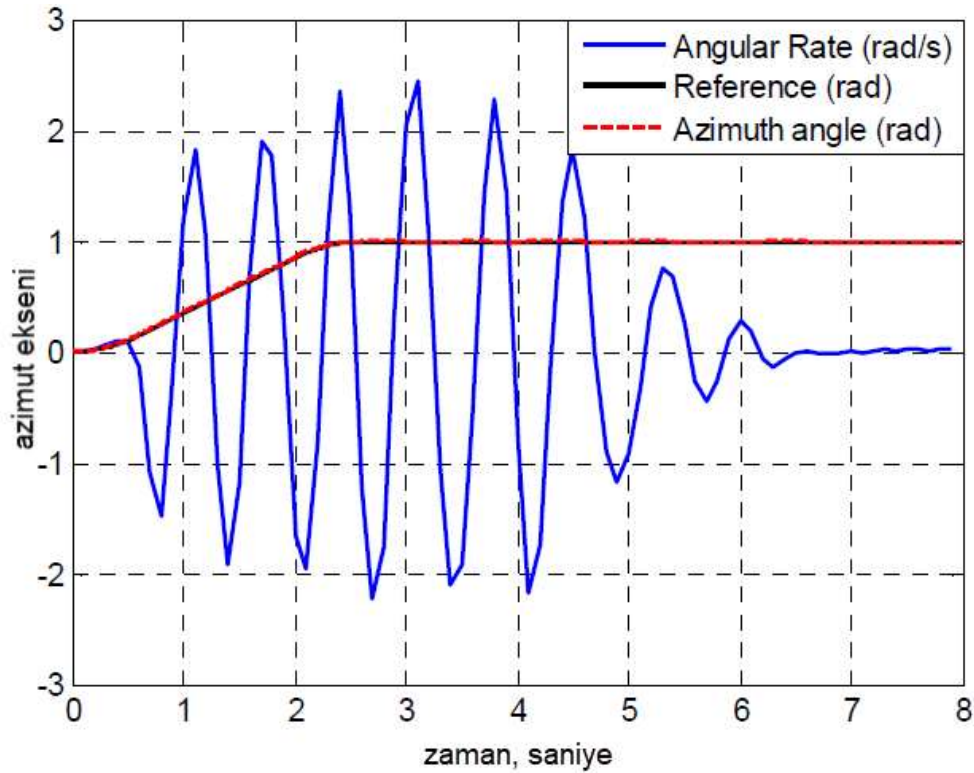
Şekil 2.7. Helikoptere monte 2 eksenli kardan platformu

Böylelikle kardanın daha küçük ve hafif yapıda kurgulanabileceği belirtilmiştir. Bu sistemin dezavantajı olarak da hassasiyet kaybı gösterilmiştir. Bu kaybın sebebi, görüntünün stabilizasyonu için türetilecek değerlerin doğrudan kameranın olduğu iç platform yerine dış eksen üzerinden ölçülüp, ilgili dönüşüm matrisleri ile iz düşümünün alınmasıdır. Bu dönüşümler yapılırken de iç eksen üzerindeki bozucu girişler doğrudan ölçülmediği için doğrudan stabilizasyona göre hassasiyet kaybı gözleneceği belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Dolaylı stabilizasyon mimari yapısı

Bu çalışmada kullanılan, dolaylı stabilizasyon üzerine tasarlanan kontrol mimarisi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Çatırdama problemini elimine etmek için aktivasyon olarak işaret fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonu kullanılmış ve nihai kontrol mimarisi türetilmiştir. Sistemin bozucu giriş altında iken konum emrine karşı cevabı ve bu senaryodaki hız grafiği Şekil 2.9’da gözlemlenebilir. Çalışma sonucunda kardan sisteminin kontrolünün ters dinamik optimizasyon ile birlikte kayan kipli kontrol sisteminin başarılı bir şekilde isterileri karşıladığı belirtilmiştir.



Şekil 2.9. Kayan kipli kontrolcü performansı ve kompanse edilen açısal hızlar

Sener (2015) tarafından yapılan çalışmada stabilize kamera platformunun kontrolü üzerine çalışılmıştır. Sistemin modelinin türetildiği süreçte, platform üzerindeki sürtünmeler de karnopp sürtünme modeli ile modellenmiştir. Hız bilgisinin alındığı dönü ölçer verileri de kalman filtresi aracılığıyla filtrelenip gürültülerden arındırılmıştır. Kontrol sistemi olarak ilk etapta değerleri el ile ayarlanmış bir PID kontrolcüsü hem iç hem dış eksende ve hem konum hem hız kontrolcüsü olmak üzere dört farklı sistem için tasarlanmıştır. Ardından gürbüz bir karakteristiğe sahip olması dolayısıyla kayan kipli kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolcüde çatırdama etkisini azaltmak için

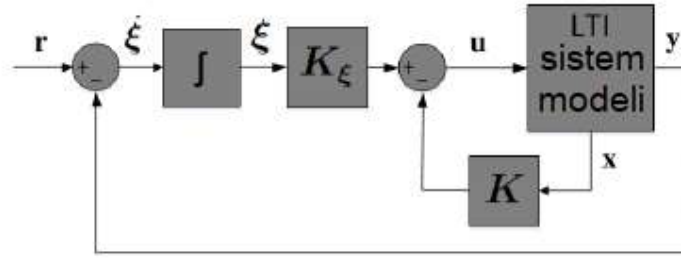
aktivasyon fonksiyonu olarak işaret fonksiyonu yerine hiperbolik tanjant fonksiyonu kullanılmıştır. Sistemin kontrol performansında en iyi sonucu otomatik ayarlanmış PID kontrol sistemi vermiş, kayan kipli kontrol sisteminin ikinci planda kalmasının sebebi olarak kayan kipli kontrol parametrelerinin optimize edilip daha iyi seçilmemiş olması gösterilmiştir.

Bir başka çalışmada iki eksenli kardan sistemi modellenmiş ve model üzerinden kontrol sistemi geliştirilmiştir (Poyrazoğlu, 2017). Çalışmada kullanılan platform Şekil 2.10'da görülebilir. İlgili çalışmada sistem modeli için farklı sürtünme modelleri incelenmiş ve Dahl modelinin en uygun olduğu belirtilmiştir.

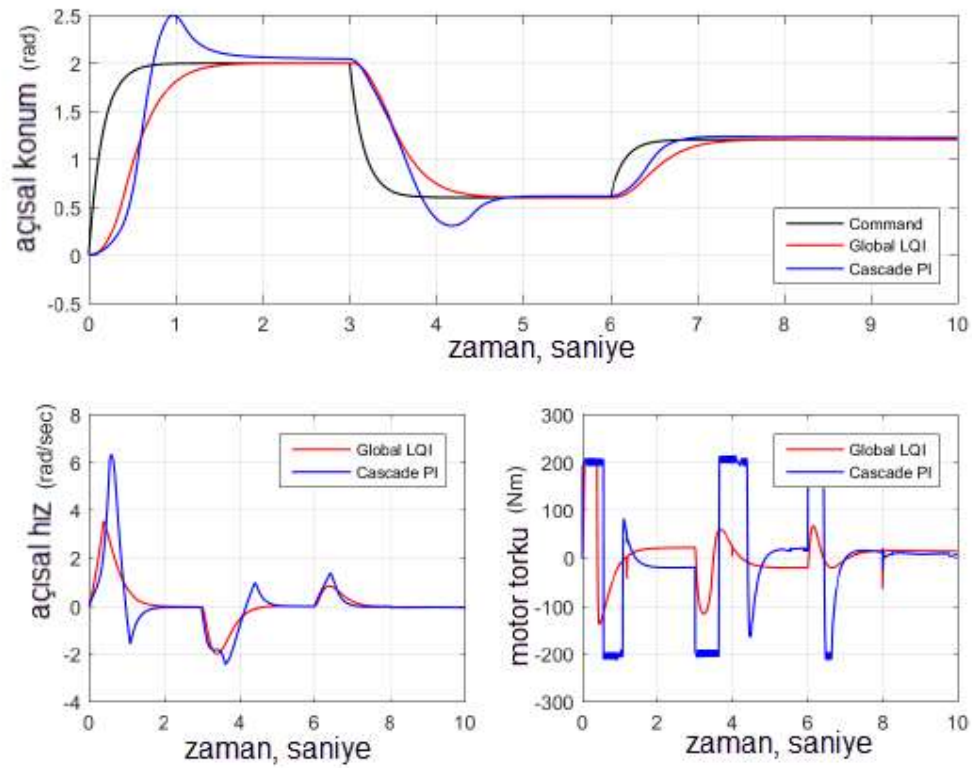


Şekil 2.10. 2 eksenli çoklu görüntüleme platformu

Platformda kullanılan doğru akım motor, vuruntu momenti (İng. cogging torque) etkisi ile birlikte modellenmiştir. Kontrol sistemi olarak iki katmanlı PI kontrolü ve doğrusal kuadratik integral kontrolü tasarlanmıştır. Doğrusal karesel integral kontrol blok şeması Şekil 2.11'de görülebilir. LQI kontrol sisteminin dış eksen üzerindeki performansı ise Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. LQI kontrol sistemi mimarisi



Şekil 2.12. LQI ve katmanlı PI kontrolcü performanslarının karşılaştırılması

Kayan kipli kontrol sisteminin genetik algoritma ile optimize edildiği çalışma Moin ve ark. (1995) tarafından ele alınmıştır. Tasarlanan kontrolcünde aktivasyon fonksiyonu olarak işaret fonksiyonu kullanılmış, genetik algoritma ile yapılan parametre optimizasyonunda ise parametre optimizasyonunun yanı sıra, kararsızlığı önlemek için ceza fonksiyonunda parametre büyüklüğüne de ceza koymuştur. Bu sayede, optimizasyon sonucu çıkacak parametrelerin görece küçük olması amaçlanmıştır.

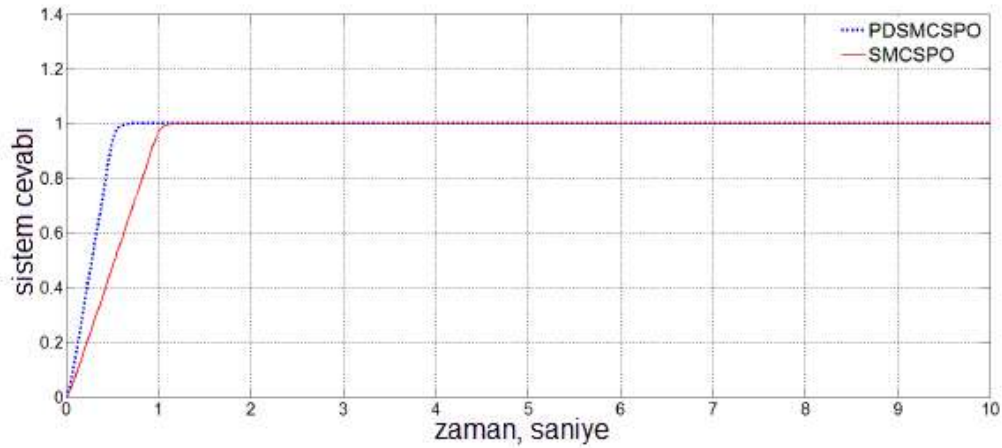
Bir torpidonun konum kontrolü için kayan kipli kontrolcü Rhif (2012) tarafından yapılan çalışmada tasarlanmıştır. Çatırdama fenomenine çözüm olarak aktivasyon fonksiyonunu işaret fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonuna değiştirmiş, ayrıca eşitlik 2.2’de gösterildiği gibi kayma yüzeyine hatanın integrali terimi ve katsayısını eklemiştir.

$$s=\alpha_1 e+\alpha_2 \dot{e}+\alpha_3 \int_0^t e \, d_t \quad (2.2)$$

Bu şekilde, kayma yüzeyi PID kontrolcüsüne yakınsamıştır, çünkü kayma yüzeyi hata, hatanın türevi, hatanın integrali ve bunların katsayılarından oluşmaktadır. İntegralli kayma yüzeyi ile sistemin performansının iyileştiği ve konum seviyesindeki gürültünün azaltıldığı belirtilmiştir.

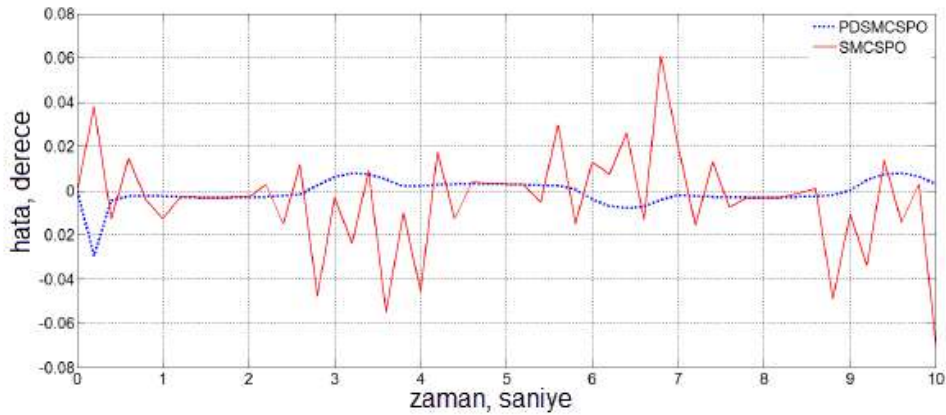
Köse ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışma güç elektriği üzerine bir çalışma olmakla birlikte kayan kipli kontrolcü tasarlanmış ve genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Burada kullanılan ceza fonksiyonu, doğrudan hatanın karesinin minimize edilmesi üzerine kurgulanmıştır. Genetik algoritmanın optimize edeceği parametreler ise kontrol sisteminin katsayıları olarak verilmiştir.

Abbasi ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada konum kontrolü üzerine çalışılmıştır. Kontrol performansını iyileştirmek üzere, tasarlanan kayan kipli kontrolcü üzerine sapma gözlemcisi (İng. Perturbation Observer) dahil edilmiştir. Sapma gözlemcisi, kayna kipli kontrol sistemindeki aktivasyon fonksiyonunun, sistemin hatasının değişim hızına, yani türevine bağlı olduğu parametrik bir katsayı ile çarpılması ile elde edilmiştir. Yayında bildirilen sonuçlara göre, Şekil 2.13’te görüleceği üzere adım emirlere daha hızlı tepki verip önceden yerleştiği belirtilmiştir.



Şekil 2.13. Klasik ve sapma gözlemcili kayan kipli kontrol sistemi performans karşılaştırması

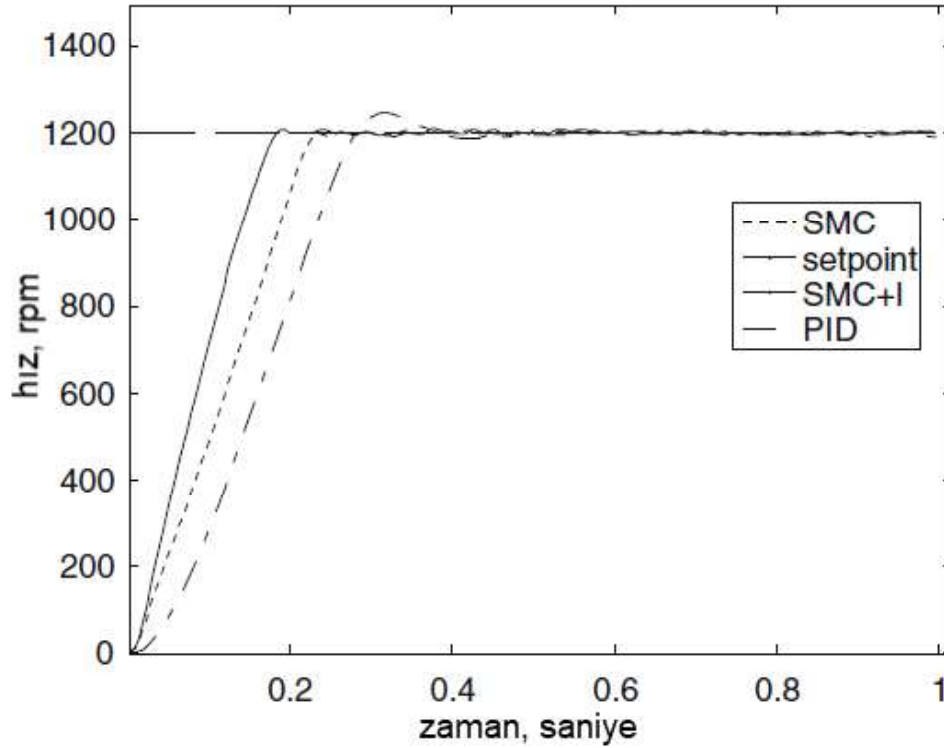
Bunun sebebi olarak, aktivasyon fonksiyonunun katsayısı parametrik olduğu için hata büyük iken hızla referansa yaklaşmakta, hatanın türevi küçüldükçe katsayının değeri de küçülüp kontrol sinyalini yumuşatmakta olması gösterilmiştir. Sinyalin hata türevine bağlı yumuşaması neticesinde, Şekil 2.14'te gösterildiği gibi konum hataları da azalmakta, takip edilen profil daha yumuşak geçişlere sahip olmaktadır.



Şekil 2.14. Sapma gözlemcili ve klasik kayan kipli kontrol sistemi akım tüketimi karşılaştırması

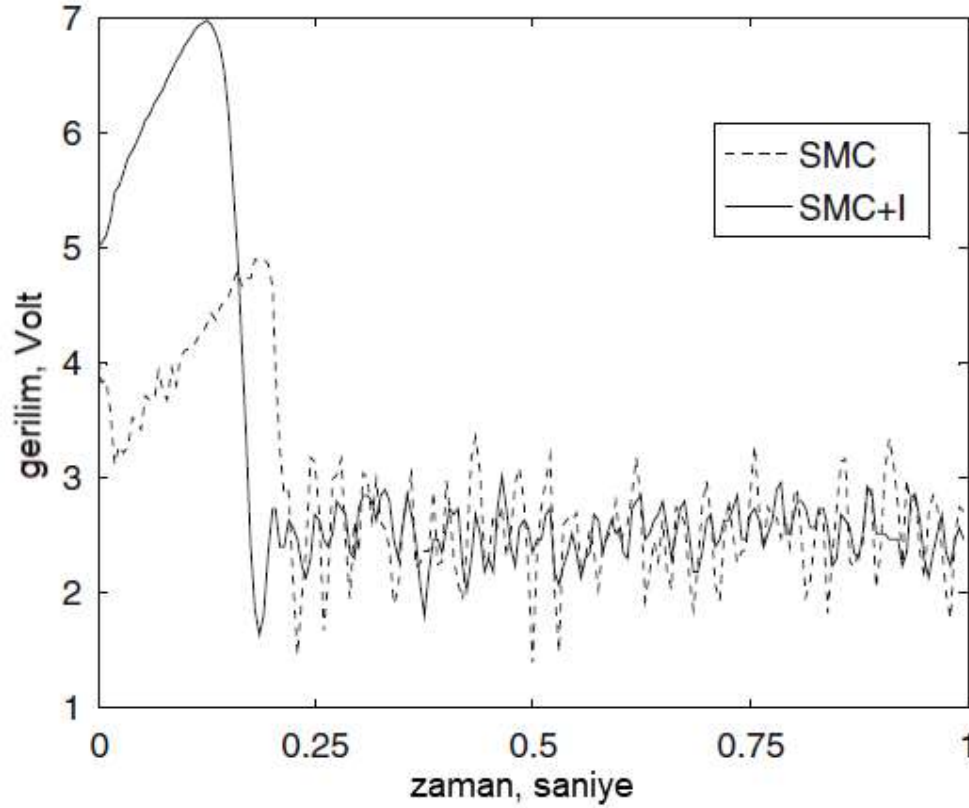
Eker ve Akınal (2008) tarafından elektromekanik bir sistemin kontrolü üzerine çalışma yapılmıştır. (Rhif, 2012)'de belirtilen çalışmaya benzer şekilde, sistemin

performansını artırmak için kayma yüzeyine integral terimi eklenip kayma yüzeyi PID kontrolcüsüne yakınsatılmıştır. Geliştirilen sistemin kararlılığı için, kayma yüzeyine bağlı Lyapunov fonksiyonu belirlenip, bu Lyapunov fonksiyonunun zaman sıfırdan büyük iken pozitif, zaman sıfırda iken sıfırda ve fonksiyonun türevi de her zaman negatif olması isterilerini sağladığı gösterilmiş ve bu sayede sistemin kararlılığı garanti altına alınmıştır. Referans olarak PID kontrolcü ve klasik kayan kipli kontrolcü ile karşılaştırılmış ve ilgili sonuç Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Görüleceği üzere integralli kayma yüzeyine sahip kayan kipli kontrolcü en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 2.15. PID, kayan kipli kontrol ve integral kayan kipli kontrol sistemi performans karşılaştırması

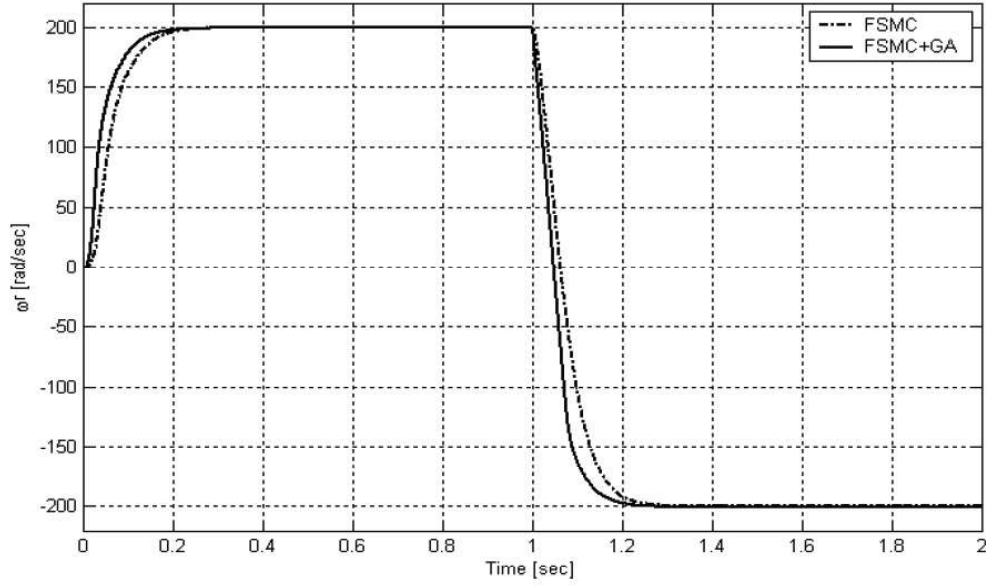
Kayma yüzeyine yeni bir terim eklendiği için kontrol eforunun artması beklenmektedir. Bu durum da Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Yalnız bu efor limitler dahilinde olduğu için ve daha fazla eforun karşılığında sistem Şekil 2.15'te gösterildiği gibi daha hızlı oturup kararlı olduğu için integralli kayan kipli kontrolcünün başarılı olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.16. Klasik ve integral kayan kipli kontrol sistemi güç isteri karşılaştırması

Kayan kipli kontrol sisteminin bulanık mantık ile tasarlanıp genetik algoritma ile optimize edildiği bir çalışma Hazzab ve ark. (2004) tarafından sunulmuştur. Kontrol sistemi, hız kontrolcüsü geliştirmek üzere kurgulanmıştır. Modellemedeki belirsizlikler ve bozucu girişlere karşı etkili olması sebebi ile kayan kipli kontrol sisteminin geliştirildiği belirtilmiştir. Bulanık mantık kontrolünün ise implementasyon kolaylığı ve kompleks, lineer olmayan veya zamana bağlı olmayan sistemlerdeki etkinliği sebebi ile tercih edildiği belirtilmiştir. Bulanık mantık sistemlerde stabilite garantisinin zor olduğu belirtilmiş, bu sebeple kayan kipli kontrol sistemi tasarlanıp, stabilitesi garanti edilip, ardından bunun üzerine bulanık mantık kontrolün konulduğu bir kurgu tasarlanmıştır. Bulanık mantık sisteminde en büyük dezavantajın dizayn teknikleri olduğu, kural – değer tanımlamada insan bilgisine bağlı kalındığı vurgulanmıştır. Bu değerleri optimize etmek için genetik algoritmalar devreye alınmıştır. Genetik algoritmada ceza fonksiyonu olarak hatanın integralinin karesi verilmiştir. Bu çalışmada da çatırdamayı önlemek için aktivasyon fonksiyonu işaret yerine saturasyon fonksiyonu seçilmiştir.

Aktivasyon fonksiyonunun katsayısı, bulanık mantık ile 5 farklı değer olarak belirlenmiş, bu değerler de optimize edilmek üzere genetik algoritmaya bırakılmıştır.



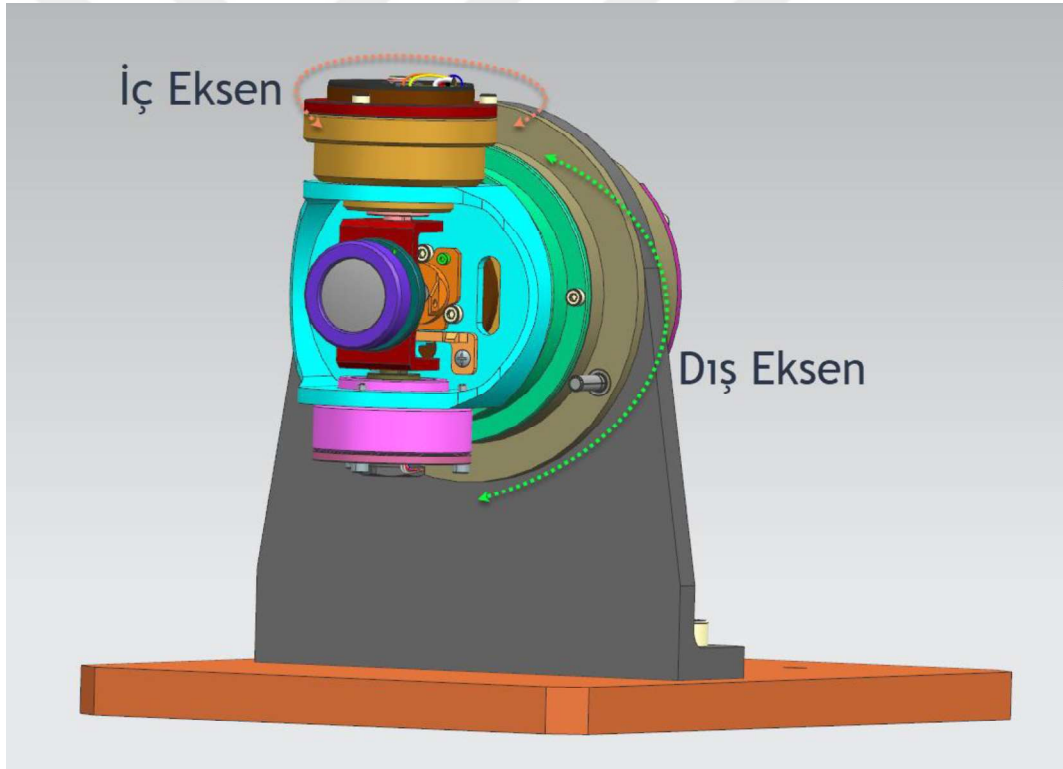
Şekil 2.17. Bulanık kayan kipli kontrol ve genetik algoritma ile optimize edilmiş halinin performans karşılaştırması

Optimize edilen bulanık mantıklı kayan kipli kontrol sisteminin performansı Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Figür üzerinden anlaşılacağı üzere, genetik algoritma ile optimize edilen sistem emirlere daha hızlı tepki vermiş, üstelik bu sistemin, daha hızlı olmanın getirdiği aşım gibi dezavantajları da barındırmadığı görülmüştür.

3. SİSTEM TANIMLAMA

3.1 Stabilize Platform

Tez kapsamında üzerinde çalışma yapılan iki serbestlik dereceli kardan platformu, ikinci dereceden dinamik sistemlerin bir altkümesidir. Sistem, Şekil 3.1’de görülebilir. Her bir ekseninde bir adet motor ve bir adet ölçer bulunmakta, iç eksen içerisinde ise faydalı yük olan görüntüleme sistemini temsilen kütle eşdeğer ağırlık bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Üzerinde çalışılan stabilize platform

Şekil 3.1’de görülen stabilize kamera platformunda temel olarak atalet, hıza bağlı bir sönüm oranı ve ay sabiti etkileri bulunmaktadır. Doğrusal olmayan etkiler ise sistem tanımlama metodolojisi ile elde edilecek dinamik modelin dışında tutulacaktır. Bu etkilerin bir kısmı ayrıca modellenecek, bir kısmı ise kontrol sisteminin gürbüzlüğü ile etkileri elimine edilmeye çalışılacaktır.

3.2 Sistem Dinamik Modeli

Tasarlanması planlanan kontrol sistemleri model esaslı olacağı için, ilk etapta sistem parametrelerin belirlenip, sistemin bir dinamik model olarak tanımlanması gerekmektedir. Elektromekanik sistemlerde, sistemin karakteristiğini belirleyen unsurlar başlıca şunlardır;

J: sistemin ataletini temsil eder. Sistemin ağırlığı arttıkça, ataleti de artar. Sistemin ataleti arttıkça, sistemin mevcut durumunu değiştirmek zorlaşır. Yani, eğer sistem durağan bir halde ise, bu sistemi belirli bir ivmelenme ile belirli bir hıza ulaştırmak veya belirli bir konuma getirmek için daha çok efor gerekir. Benzer şekilde, eğer sistem hareketli halde ise de hareketini değiştirmek ve/veya durağan hale getirmek zorlaşır. Sistemin ataletinin yüksek veya düşük olmasının kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Düşük ataletle sahip bir sistem istenilen duruma görece daha düşük bir enerji ile getirilebilir fakat yine görece düşük bir enerjiye sahip bozucu giriş ile istenilen durumunu koruyamayabilir. Bununla ters orantılı olarak da yüksek ataletle sahip bir sistemi istenilen konuma getirmek için yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç vardır ama bozucu girişlerden de ataleti ile orantılı olarak daha az mertebelerde etkileneceklerdir. Bu sebeple, sistemin ataleti hem sistemin tasarımında çok önemli bir bileşen, aynı zamanda kontrol sistemi dizaynı için de çok önemli bir girdidir.

Sistemin ataleti, eğer mevcutsa mekanik tasarımının yapıldığı programdan edinilebilir. Yalnız gerçekte üretilen / bütünlenen sistemdeki farklılıklar ve değişkenler de dikkate alınırsa, sonraki başlıkta tanımlanacak sistem tanımlama ile atalet terimini tahmin edip, bunun katı model tasarımı sonucu edinilen atalet ile uyumunu kontrol etmek daha sağlıklı bir yaklaşımdır.

B: B terimi sistemin sönümlemesini temsil eder. Osilasyonlarda, sönüm katsayısı büyük olan sistemler çabuk sönümlenip durağan duruma yaklaşırlar. Sönüm oranı 1'den küçük olan sistemler eksil sönümlü, 1'den büyük olan sistemler ise aşırı sönümlü sistem olarak tanımlanırlar. Sönümleme oranının 1 olduğu sistemler ise kritik sönümlemeli sistemler

olarak adlandırılırlar. Sönümlleme oranının da artan değerlerinin sisteme getirdiği avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Yüksek bir sönüm oranına sahip sistemde salınımlar görülmez veya çok az görülür, yalnız tüm diğer şartların aynı olduğu durumda sistemin istenilen referansa ulaşması daha uzun sürer. Sönümlleme oranının düşük olduğu sistemlerde ise sistem durağan duruma gelene kadar çeşitli frekanslarda osilasyonlar görülür. Yalnız sönüm oranı uygun bir aralıkta iken, oturma zamanı daha kısa bir süre olabilir.

K: K terimi ise sistemin yay sabitini temsil eder. Sistemlerde yay sabiti yükseldikçe sistemin bulunduğu konumdan nominal konumuna gitme isteği (kuvveti) artar. Yay sabiti yüksek sistemlerde, nominal konumu etrafında sistemin stabilitesi (kararlılığı) yay sabiti ile orantılı olarak artar. Yay sabiti yüksek olan sistemlerde nominal konumdan uzaklaştıkça, sisteme uygulanması gereken kuvvet de artmaktadır. Bu da birtakım sistemlerde kontrolü zorlaştırabilmektedir. Yay sabiti çok küçük iken ise, sistemin nominal konum etrafında bozucu giriş geldiği zaman kendiliğinden nominal konumuna gelmesi beklenemez, ekstra kontrol eforu uygulanmak zorundadır.

Sisteme kontrol sinyali ise tork olarak verilir. Torkun akıma oranı eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$\tau = IK_t \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de görüleceği üzere, motorun sisteme uyguladığı tork, akım ile orantılıdır. K_t ise motor tork sabitidir. Motor tork sabiti arttıkça, uygulanan birim akımda sisteme iletilen tork artar. Motor tork sabitine motor kataloğundan ulaşılabilir. Ayrıca, gelecek bölümlerde anlatılan sistem tanımlama prosedürleri ile de elde edilebilir.

Bu bölümde bahsedilen bileşenlerin bir araya geldiği elektromekanik sistemler ikinci dereceden bir dinamik sistem olarak modellenenlerdir. Bu sayede sistemin ideal modeli, sistem tanımlama prosedürleri ile elde edilebilir. Yalnız burada sistemin doğrusal olduğu varsayımı bulunmaktadır. Gerçek hayatta ise sistemler çoğu durumda tamamen doğrusal değildirler.

Her bir eksen için, sistemin (doğrusal) transfer fonksiyonu eşitlik 3.2’de gösterildiği gibidir.

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{K_t}{Js^2 + Bs + K} \quad (3.2)$$

Denklemden görülen “s” laplace operatörüdür. Sol kısımda görüleceği üzere, sistemin girdisi akım (I), çıktısı ise açısal konum (θ) dur. Bu eşitlik, kardanın hem iç hem dış eksenleri için, parametreleri ayrı olmak kaydıyla geçerlidir. Kardan sisteminde, her iki eksen için de motorların K_t değerleri bilinmekte, yalnız öteki parametreler (J, B ve K) için sistem tanımlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Kardan platformunun her iki eksenini için de sistemde yay efekti bulunmamaktadır. Yani gerek iç gerekse dış eksen bir konumda bırakıldığı zaman, harici bir kuvvete maruz kalmadıkça bulunduğu konumu muhafaza etmektedir. Dolayısıyla, eşitlik 3.3 kabulü her iki eksen takımı için de geçerlidir.

$$K = 0 \quad (3.3)$$

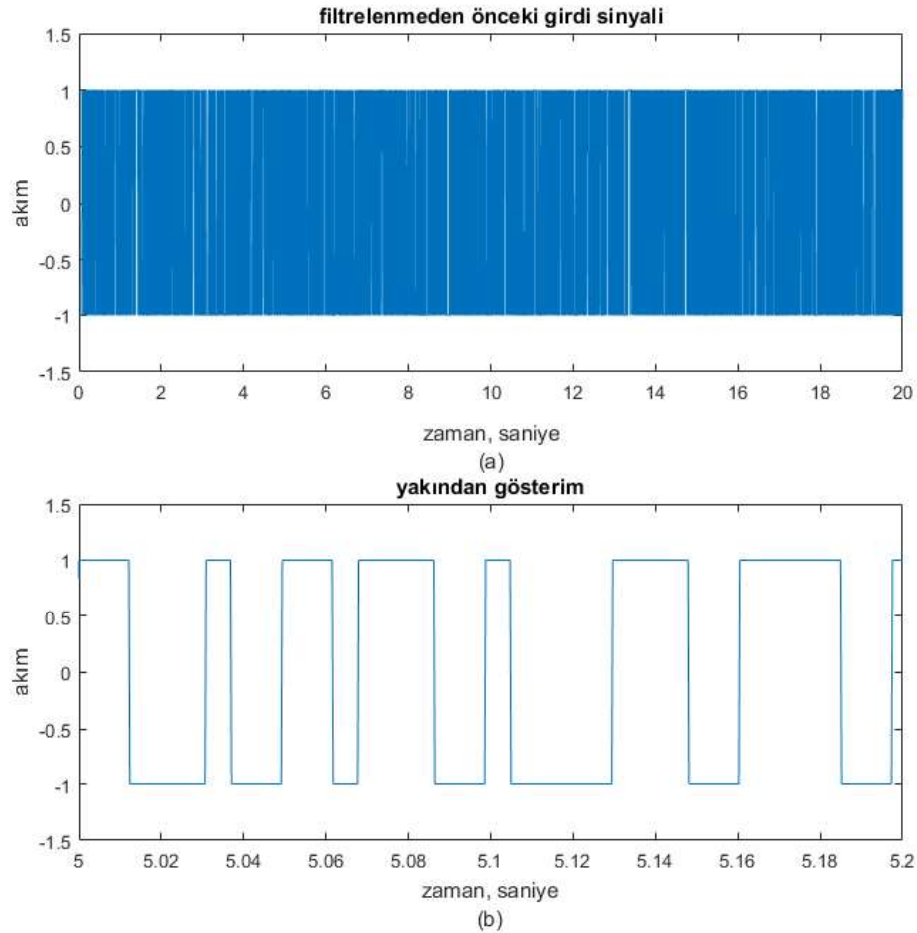
Dolayısıyla, eşitlik 3.2’de verilen sistemin transfer fonksiyonu da eşitlik 3.4’teki duruma evrilmiş olur.

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{K_t}{Js^2 + Bs} \quad (3.4)$$

3.3 Sistem Tanımlama Prosedürü

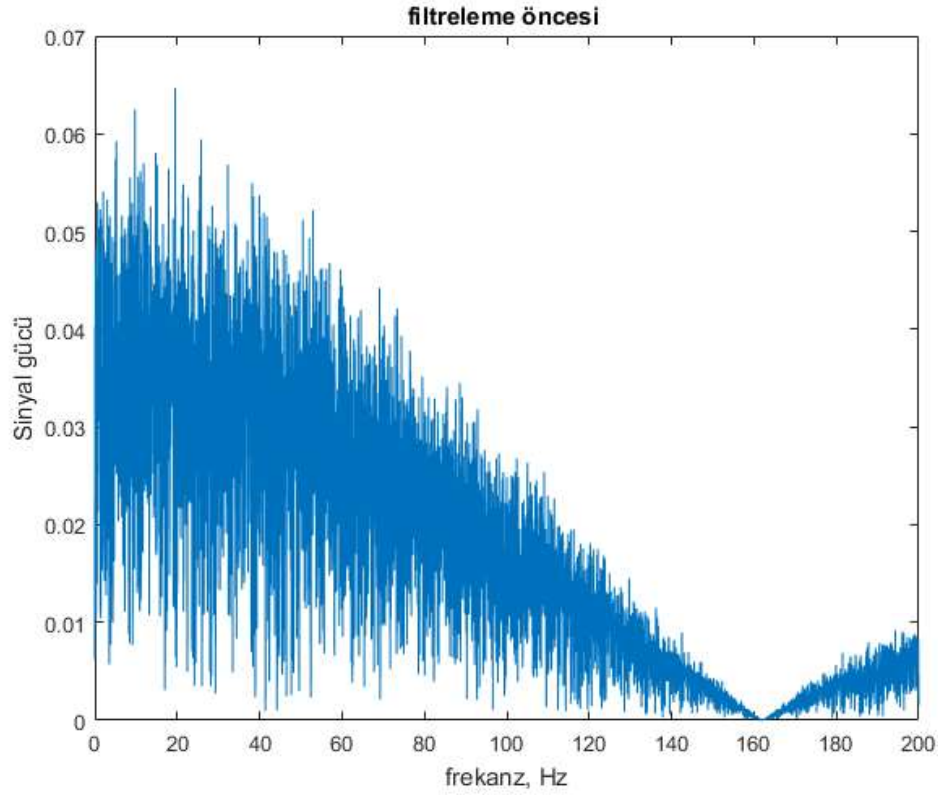
Eşitlik 3.4’te belirtildiği gibi, sisteme verilen akım ile, sistemin cevabı olan açısal konum arasında K_t , J ve B terimlerine bağlı bir fonksiyon bulunmaktadır. Bu değerleri elde etmek için, sisteme çeşitli frekanslarda akım emri verilir ve karşılığında sistemdeki ölçerler ile açısal konumu sürekli okunur. Daha sonra bu ikili arasındaki ilişkiyi en doğru şekilde yansıtan parametreler tespit edilir. Validasyon verisi ile doğrulama ile birlikte, sistem tanımlama prosedürü amacına ulaşmış olur. Bu yol haritası, kardan platformunda hem iç hem de dış eksen için geçerlidir.

Bu çalışmada, sisteme akım sinyali PRBS (Pseudo Random Binary Signal, Sözcük rastgele İkili Sayı) formatında düzenlenmiştir. Sinyal, Şekil 3.2’de görüldüğü şekilde türetilir. Akım sinyalinin boyutu, sistemde beklenen nominal çalışma bölgesi olacak şekilde belirtilmiştir.



Şekil 3.2. PRBS sinyali ve yakından gösterimi

Şekil 3.2’de belirtilen sinyali sistem tanımlama için kullanmak uygun olmamaktadır. Sinyalin bu hali ile frekans aralığı FFT alınarak Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Frekans bandında sistemin çalışması istenilen aralığın 1.5-2 katı büyüklüğünde bir frekans bandı yeterli olmaktadır. İç ve dış eksen için nominal akım değerleri ve filtrelenen frekans bandı Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

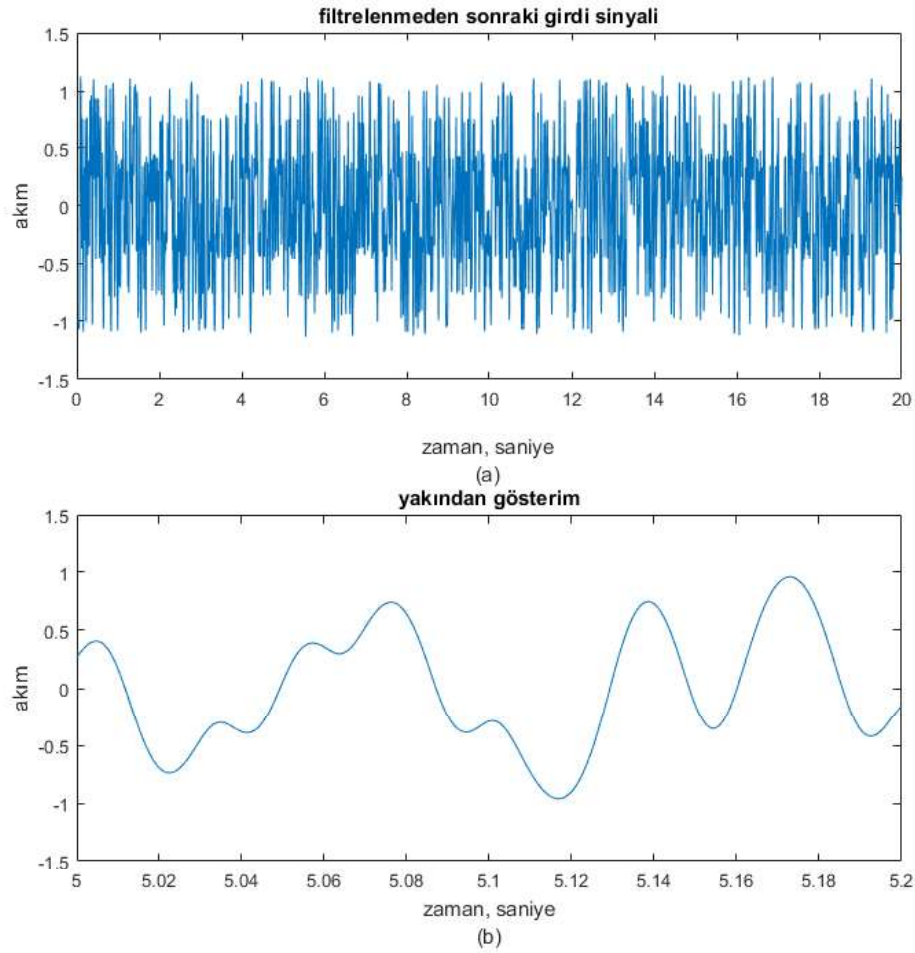


Şekil 3.3. Filtrenmemiş girdi sinyalinin frekans dağılımı

Çizelge 3.1. Dış ve iç eksenler için nominal akım ve filtrelenen frekans değerleri

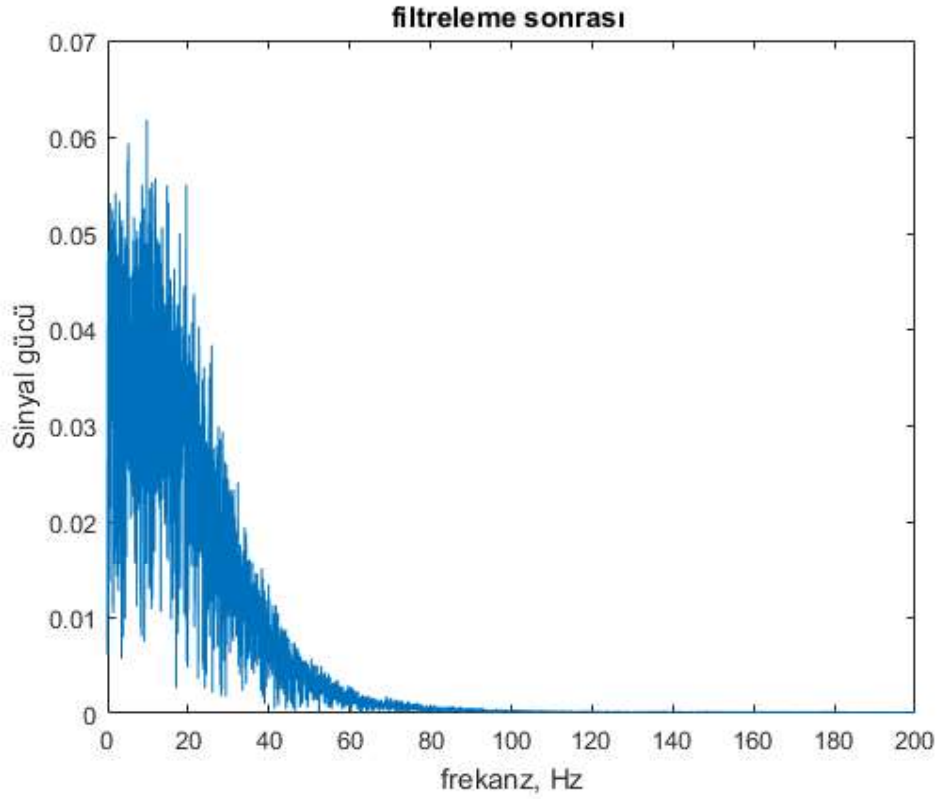
	Nominal Akım (Amper)	Filtrelenen Frekans Bandı (Hz)
Dış eksen	2	20
İç eksen	1	15

Çok yüksek frekanslar sistemin gerçekte karşılaşılmayacak dinamiklerini uyarabilir ve sistem tanımlama sonuçları daha az güvenilir olabilir. Bu sebeple, Şekil 3.2’de gösterilen türetilmiş akım sinyali, alçak bant geçiren bir filtre ile filtrelenebilir ve Şekil 3.4’teki halini alır. Akım sinyalinin filtreden geçirilmiş halinin frekans bandında yayılımı Şekil 3.5’te gösterildiği gibidir. Görüleceği üzere, girdi sinyalindeki yüksek frekanslar filtrelenmiştir.



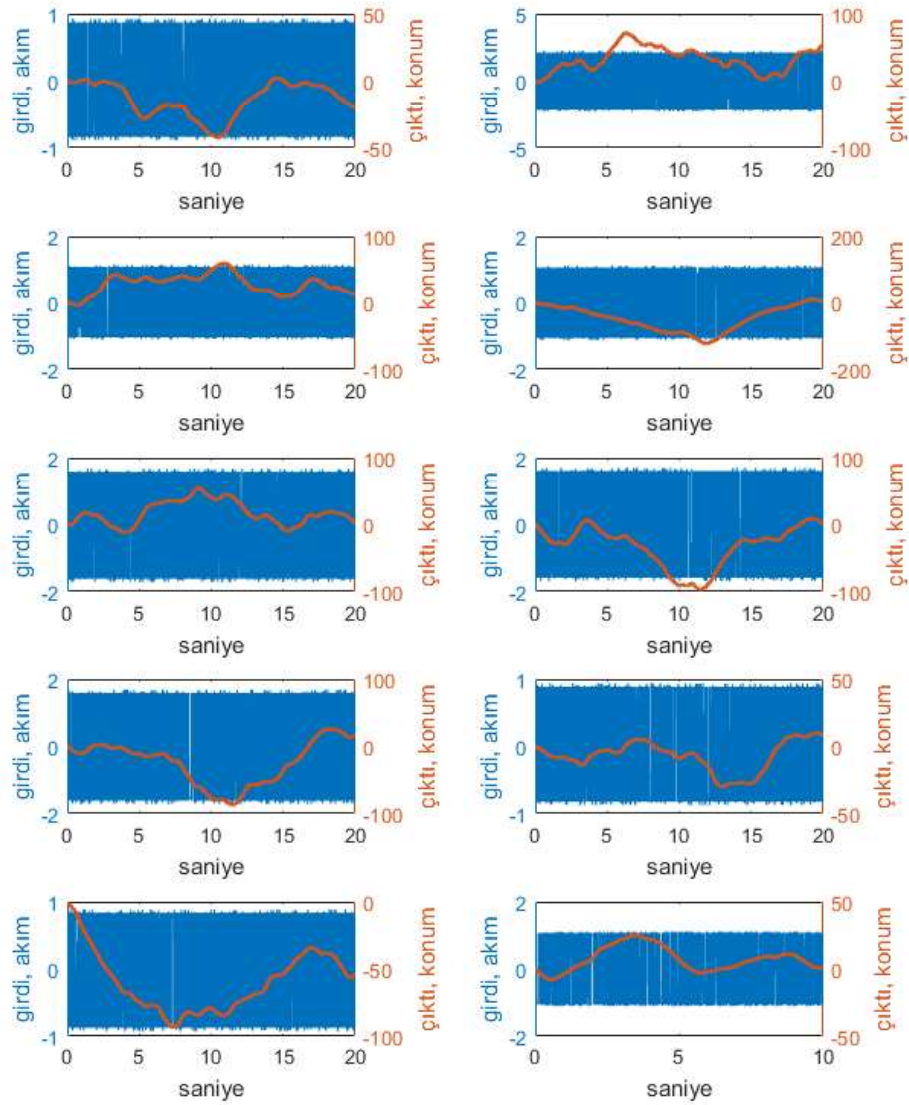
Şekil 3.4. Filtrelenmiş PRBS sinyali

Girdi sinyalinin hazırlanmasının ardından, Bölüm 3.1’de gösterilen gerçek sisteme PRBS olarak türetilip ardından filtrelenen akım sinyalleri verilir. Sistemlerin birbirinden, özellikle iç eksenin dış eksenin çalışmasından etkilenmemesi için, yalnızca sistem tanımlama sürecinde iç ve dış eksenler aynı anda değil, ardışık olarak çalıştırılmaktadır. Bu sayede her bir eksenin kendisine ait parametreleri daha yüksek bir doğruluk ile bulunmuş olur.

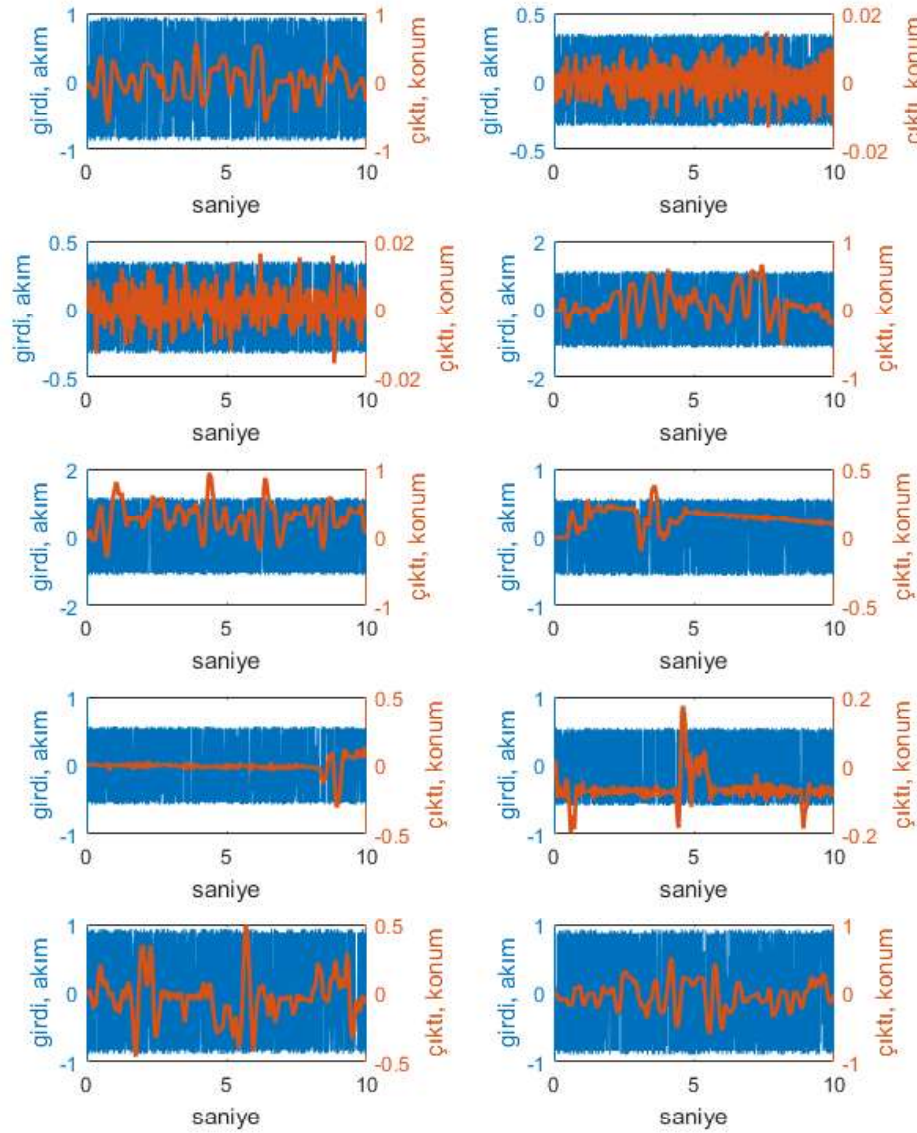


Şekil 3.5. Filtrelenmiş PRBS sinyalinin frekans dağılımı

Çizelge 3.1’de belirtilen değerler ve frekans bandında, her bir eksen için 10 adet girdi sinyali hazırlanmıştır. Kenarlara çarpma ihtimalinden dolayı iç eksen için tanımlanan sinyal süresi 10 saniye, dış eksen için ise süre 20 saniye olarak belirlenmiştir. Girdi sinyali gerçek sisteme verilip, sistemin cevapları toplandığında dış ve iç eksenler için sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilen sonuçlar alınır. Veriler incelendiğinde sisteme verilen belirli frekanslarda rastgele sinyal karşısında sistemin salınımlar yaptığı, yalnız bu salınımların her zaman simetrik olmadığı görülebilir. Bunun sebebi, sistemin doğrusal olmayan dinamikleridir. Örneğin asimetrik sürtünme sebebi ile, sistem bir yöne kolaylıkla gidebilmekte, aksi yöne gitmekte ise bir dirençle karşılaşmaktadır.



Şekil 3.6. Dış eksen için 10 adet yapılan sistem tanımlama prosedüründe edinilen girdi ve çıktı sinyalleri



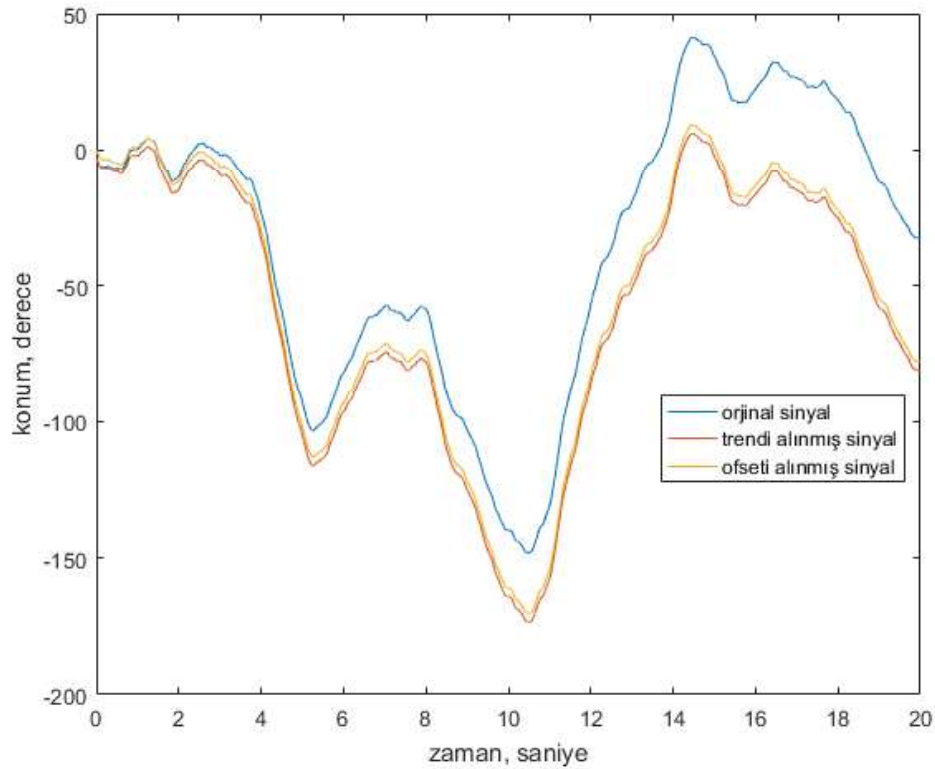
Şekil 3.7. İç eksen için 10 adet yapılan sistem tanımlama prosedüründe edinilen girdi ve çıktı sinyalleri

Tanımlanması planlanan model ikinci dereceden doğrusal bir model olacağı için, bu dinamiklerin etkisi sistem tanımlama optimizasyonuna yansıtılmamalıdır. Bu amaç ile, girdi olan akım sinyalinin mertebesi belirlendikten sonra birtakım düzenlemelerden geçirildiği gibi, çıktı sinyali için de birtakım düzenlemeler gereklidir. Bu düzenlemelerin ilki, verinin trendini almaktır. Trend alınırken, $y = ax$ şeklinde temel bir model ile, verideki sistematik trend elimine edilmeye çalışılır. Bu denklemde a katsayısı trendin eğimini, y katsayısı trende sahip veriyi, x ise trende sahip olmayan veriyi temsil eder.

Çıktı sinyali belirli bir katsayıya bölünüp trendi alındıktan sonra, ilklenme aşamasında performans kaybı yaşanmaması adına, ilk anda ($t=0$) sistemin durumları sıfır değerine ilklenir. Bunun için de eşitlik 3.5'te gösterilen formül kullanılır. Bu formül ile, veri, kendisinin ilk değerinden çıkarılır. Tüm değerlerini korumakla birlikte, sabit bir ofset alınarak $t=0$ anında konum ve hız değerleri de sıfır değerine eşitlenmiş olur. Trendi alınmış ve ardından ofseti de alınarak sistem tanımlamaya hazır hale getirilen örnek bir çıktı sinyali Şekil 3.8'de gözlemlenebilir.

$$y(t)=y(t)-y_{t=0}$$

(3.5)



Şekil 3.8. Çıktı sinyallerinin işlenmesi

Sistemin transfer fonksiyonu, eşitlik 3.6'da verilmiştir. Bu transfer fonksiyonundaki değerleri bulacak şekilde, sistem tanımlama ile eşitlik 3.6'da belirtilen

a ve b parametreleri bulunur. Bu değerleri bulmak için, hazırlanan girdi ve elde edilen çıktı sinyali MATLAB® programı üzerinden “tfest” fonksiyonuna girdi olarak verilir ve karşılığında tahmin edilen çıktılar alınır.

$$\frac{K_t}{Js^2+Bs} = \frac{a}{s^2+bs} \quad (3.6)$$

Tahminlerin gerçek sisteme yakınlığı, validasyon verisi ile test edilir. Tahmin edilen sistemin gerçek sisteme yakınlığını nicel olarak ölçmek için tercih edilen başarıım metriği olarak ise, VAF fonksiyonu kullanılması uygun olmaktadır. VAF fonksiyonu, eşitlik 3.7’de ifade edilmiştir(Doğan, 2019).

$$F_{VAF} = 100 * \left(1 - \frac{\text{var}(y_{\text{gercek}} - y_{\text{model}})}{\text{var}(y_{\text{gercek}})} \right) \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7’de belirtilen var, varyans fonksiyonunun kısaltmasıdır ve eşitlik 3.8’de verilmiştir. Eşitlik 3.8’de belirtilen μ değeri, ilgili girdi vektörünün ortalamasını temsil eder.

$$\text{var}(X) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |X_i - \mu|^2 \quad (3.8)$$

Dış ve iç eksenler için, tahmin edilen modellerin sonuçları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dış eksen için sistem tanımlama sonuçları

Deney numarası	Girdi Sinyal Türü	Nominal Akım Değeri (A)	VAF skoru	VAF validasyon
1	PRBS	0.9	78.6237795981678	61.9458015515239
2	PRBS	2.2	99.9974189921367	0.0735115106358375

3	PRBS	1.1	99.9968474246628	0.0850423789380495
4	PRBS	1.1	83.3321250481073	57.2329425174648
5	PRBS	1.6	75.5368359176548	56.5791250658315
6	PRBS	1.6	92.5688905686080	33.4294535480665
7	PRBS	1.7	96.3640921443519	18.5194284372295
8	PRBS	0.9	96.8147712862777	16.7733380271934
9	PRBS	0.9	83.0624465235410	64.3591072772887
10	PRBS	1.1	82.0032712224245	61.1573164947167

Çizelge 3.3. İç eksen için sistem tanımlama sonuçları

Deney numarası	Girdi Sinyal Türü	Nominal Akım Değeri (A)	VAF skoru	VAF validasyon
1	PRBS	1	92.1203427505018	25.3471734566742
2	PRBS	0.35	13.0005206255549	63.9323238977123
3	PRBS	0.35	83.2211001155545	75.0257097269110
4	PRBS	1.1	65.4312281285327	-241.650272598031
5	PRBS	1.1	88.0927550456852	84.2828734471864
6	PRBS	0.5	89.6848805625556	61.4121140442831
7	PRBS	0.5	87.7190999449921	31.4976121690465
8	PRBS	0.5	96.1180510558219	72.5722462649723
9	PRBS	0.9	24.0962934986274	42.1952171015830
10	PRBS	0.9	90.4151158175507	66.2964079054074

Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilen sonuçlar neticesinde, validasyon skoru yüksek sonuçların yakınsadığı değerler olarak iç ve dış eksenler için bulunan parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sistem tanımlama sonucu dış ve iç eksen için bulunan değerler

Parametre	Değer
Dış eksen a	430
Dış eksen b	2.685
İç eksen a	291.755
İç eksen b	1.56

Sistem tanımlama prosedürü sonucunda Çizelge 3.4'te verilen değerler edinilmiş, sonuç olarak iç ve dış eksenlerin dinamik modelleri, eşitlik 3.9 ve eşitlik 3.10'da vermiştir.

$$TF_{\text{dış eksen}} = \frac{430}{s^2 + 1.685s} \quad (3.9)$$

$$TF_{\text{iç eksen}} = \frac{291.755}{s^2 + 1.56s} \quad (3.10)$$

Kontrol sistemi tasarımında uzay-zaman formu üzerinden kontrol sistemi tasarlanacağı için, eşitlik 3.9 ve eşitlik 3.10'da belirtilen transfer fonksiyonlarının uzay-zaman formuna dönüştürülmesi gerekmektedir. X vektörü sistemin durumları, U vektörü kontrol sinyali olmak üzere uzay zaman matrisleri eşitlik 3.11 ve 3.12'deki gibi ifade edilir.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.11)$$

$$Y = CX + DU \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.11 ve 3.12'de gösterilen uzay zaman formu için dış eksende sistem tanımlama sonucu bulunan değerler eşitlik 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16'da gösterilmiştir.

$$A_{\text{dış}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2.685 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B_{\text{dış}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 430 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$C_{\text{dış}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$D_{\text{dış}} = [0] \quad (3.16)$$

Benzer şekilde, iç eksen için de bulunan değerler eşitlik 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20’de gösterilmiştir.

$$A_{iç} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1.56 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$B_{iç} = \begin{bmatrix} 0 \\ 291.755 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$C_{iç} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$D_{iç} = [0] \quad (3.20)$$

4. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde, biri PID temelli, bir diğeri de kayan kipli kontrol sistemi olmak üzere iki kontrol sisteminin tasarımı yapılacaktır. Stabilize platformda, kontrol sisteminin istenilen açısal konuma mümkün olan en hızlı şekilde gidebilmesi, aşımaların olabildiğince az olması, bozucu girişler karşısında gürbüzlüğe sahip olması ve yüksek bir bant genişliğine sahip olması, aynı zamanda da türetilen kontrol sinyalinin mümkün olduğunca düşük olması beklenmektedir. Dolayısıyla, kontrol sistemi tasarımı çok boyutlu bir optimizasyon olarak görülebilir. Tasarım kriterleri, dış ve iç eksen için sırası ile Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Dış eksen kontrol sistemi tasarım kriterleri

Kriter	Başarım metriği
Aşım miktarı	$< \%10$
Azami akım miktarı	$< 6A$
Bant genişliği	$> 12 \text{ Hz}$
Oturma zamanı	$< 300ms$

Çizelge 4.2. İç eksen kontrol sistemi tasarım kriterleri

Kriter	Başarım metriği
Aşım miktarı	$< \%10$
Azami akım miktarı	$< 5A$
Bant genişliği	$> 10 \text{ Hz}$
Oturma zamanı	$< 300ms$

Belirtilen kriterler ile kontrol sistemleri bu bölüm içerisinde tasarlanıp bu kriterleri sağlayıp sağlamadıkları ve birbirlerine göre performansları gözlemlenecektir.

4.1 PID Temelli Kontrol Sistemi Tasarımı

PID temelli kontrol sistemi, temel olarak kontrol sisteminden istenilen değer ile mevcuttaki değerin farkının, yani hatanın, 3 farklı operatör ile etkileşimi sonucu türetilen kontrol sistemidir. Hata P kazancı ile çarpılır, hatanın integrali I kazancı ile çarpılır ve hatanın türevi de D kazancı ile çarpılır. Elde edilen 3 sinyal toplanarak kontrol sinyali türetilir. PID temelli kontrol sistemi, bu ifadeler ile eşitlik 4.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$G_c(s) = K_p + \left(\frac{K_i}{s} \right) + K_d s \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'de belirtilen formda, ihtiyaca göre türev terimine filtre eklenilip sinyal/gürültü oranı düşürülebilir. PID temelli kontrol sisteminde P kazancı, hata ile orantılı şekilde kontrol sinyalini artırır. P kazancını artırmak, sistemin hataya karşı tepkisini artırır, aynı zamanda bozucu girişlere karşı daha gürbüz bir yapıya sebep olur. Ancak, P kazancı çok artırılırsa, sistem osilasyonlara girmeye başlar. Oturma süresi uzar ve stabilite marjini azalmaya başlar. P kazancı çok fazla artılırsa sistem kararsız olup kontrol edilemez bir hal alabilir.

I kazancı ise, durağan durum hatasını sıfırlamak için kullanılır. Örneğin, verilen emir karşısında P kazancına sahip kontrolcü belirli bir hata ile emri yerine getirip, ardından emir ile gerçekleşen sinyal arasındaki hata kadar kontrol sinyali üretmeye devam edecektir. Ancak, bu sinyal sürtünme vb. etkilerden dolayı sistemi harekete geçirmeyecek bir mertebede kalabilir. Bu durumda, sonsuza kadar sistem bu hata ile kalacaktır. Bu duruma yakalanmamak için, integral kazancı sayesinde sistemde hata biriktikçe kontrol sinyali de artmaya devam eder, dolayısıyla ilk aşamada sürtünme yenilemediği zaman, geçen her bir sürede kontrol sinyali güçlenecek ve nihayet sistemi hareket ettirip durağan durum hatasını kapatacaktır. İntegral kazancını çok artırmanın da sistemi osilasyona soktuğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple integral kazancı seçilirken de optimum değer yakalanmalıdır.

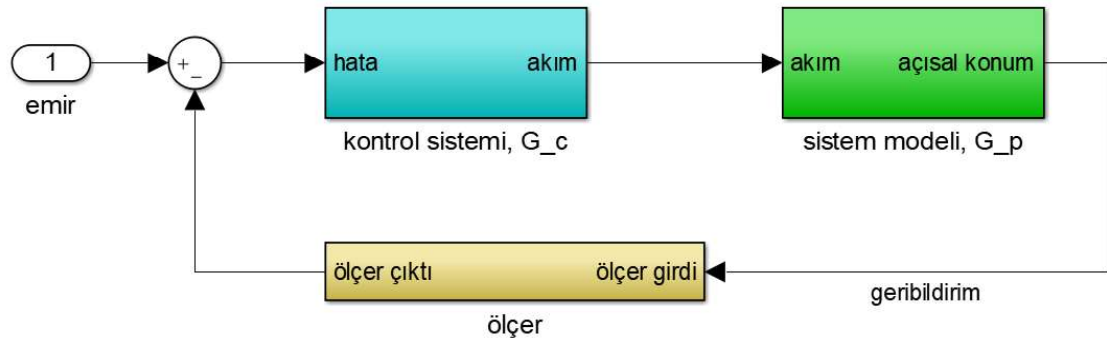
D kazancı hatanın türevinin kazanç değeridir. D kazancı, adım emirlerde aşımaları sönümlemek ve sistemi hızlandırmak için kullanılır. D kazancı türev ile ilişkili olduğu

için, gürültüye karşı çok duyarlıdır. Eğer kontrol sisteminin geribildiriminde gürültü kaynağı varsa, türev alınınca bu değer daha da büyüyecek ve kontrol sinyali de gürültülü bir hal alacaktır. Bu sebeple, hem D kazancı seçilirken dikkatli olunmalı, hem de gerektiği durumlarda D kazancına filtre de eklenip yüksek frekanslı salınımlar elimine edilmelidir (Araki, 2009).

Bölüm 3'te gösterilen eşitlik 3.6'da belirtildiği gibi, iç ve dış eksenler için sistemin transfer fonksiyonu eşitlik 4.2'deki formdadır.

$$G_p(s) = a/(s^2 + bs) \quad (4.2)$$

Kontrol sisteminin blok şeması, Şekil 4.1'de görülebilir.



Şekil 4.1. PID temelli kontrol sistemi blok şeması

Ölçer modeli ideal (1) kabul edilirse, kontrol sistemi ve sistemin modelinden oluşan açık döngü sistemin modeli, eşitlik 4.3'de belirtildiği gibidir.

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'te belirtilen $G_c(s)$ ve $G_p(s)$ için transfer fonksiyonları sırasıyla eşitlik 4.1 ve eşitlik 4.2'de verilmişti. İlgili değerler eşitlik 4.3'te yerine yazılırsa, eşitlik 4.4'te belirtilen açık döngü transfer fonksiyonu elde edilir.

$$G_o(s) = \frac{a[K_p + (K_i/s) + K_d s]}{s^2 + bs} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.4)$$

Kapalı döngü sistemin transfer fonksiyonu $G_s(s)$ ise, eşitlik 4.5'te belirtilen formdadır.

$$G_s(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5'te belirtilen pay ($N(s)$) ve payda ($D(s)$) değerleri sırasıyla eşitlik 4.6 ve eşitlik 4.7'de belirtilmiştir.

$$N(s) = a[K_p s + K_i + K_d s^2] \quad (4.6)$$

$$D(s) = s^3 + (aK_d + b)s^2 + (aK_p)s + aK_i \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7'te belirtilen payda, $D(s)$, ideal olarak eşitlik 4.8'de belirtilen butterworth polinomundaki forma eşitlenirse bant genişliğine ve sönüm oranına göre ideal bir pid temelli kontrol sistemi tasarlanabilir (Özakalın ve ark., 2011).

$$D_3(s) = \left(\frac{1}{\omega_c^3}\right)s^3 + \left(\frac{2\xi_c + 1}{\omega_c^2}\right)s^2 + \left(\frac{2\xi_c + 1}{\omega_c}\right)s + 1 \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8'de belirtilen ideal denklemde, ω_c kontrol sisteminin bant genişliğini, ξ_c ise sistemin sönüm oranını temsil eder.

PID temelli kontrol sisteminin kazançlarını bulmak için, eşitlik 4.8'de belirtilen ideal sistem ile eşitlik 4.7'de belirtilen kapalı döngü sistemin paydası birbirine eşitlenir. Sonuç olarak, PID temelli kontrol sisteminin kazançları, eşitlik 4.9, 4.10 ve 4.11'de ifade edildiği gibi parametrik halde elde edilir (Doğan, 2019).

$$K_p = \frac{(2\xi_c + 1)K_i}{\omega_c} \quad (4.9)$$

$$K_i = \frac{\omega_c^3}{a} \quad (4.10)$$

$$K_d = \frac{(2\xi_c + 1)K_i - b\omega_c^2/a}{\omega_c^2} \quad (4.11)$$

İstenilen bant genişlikleri ve sönüm oranları, Çizelge 4.3'te ifade edilmiştir.

Çizelge 4.3. Tasarlanacak PID temelli kontrol sistemi için bant genişliği ve sönüm oranları

Eksen	Bant genişliği (rad/saniye)	Sönüm oranı (ξ_c)
Dış eksen	$2*\pi*15$	0.7
İç eksen	$2*\pi*12$	0.7

Çizelge 4.3'te belirlenen değerler, eşitlik 4.9, 4.10 ve 4.11'de belirtilen PID kontrol sistem kazançlarında yerlerine konulursa, dış eksen için Çizelge 4.4'te, iç eksen için ise Çizelge 4.5'te belirtilen kazançlar elde edilir. Türev kazancının filtrelenmesi için, her iki sisteme de türev için birinci dereceden filtre eklenmiştir.

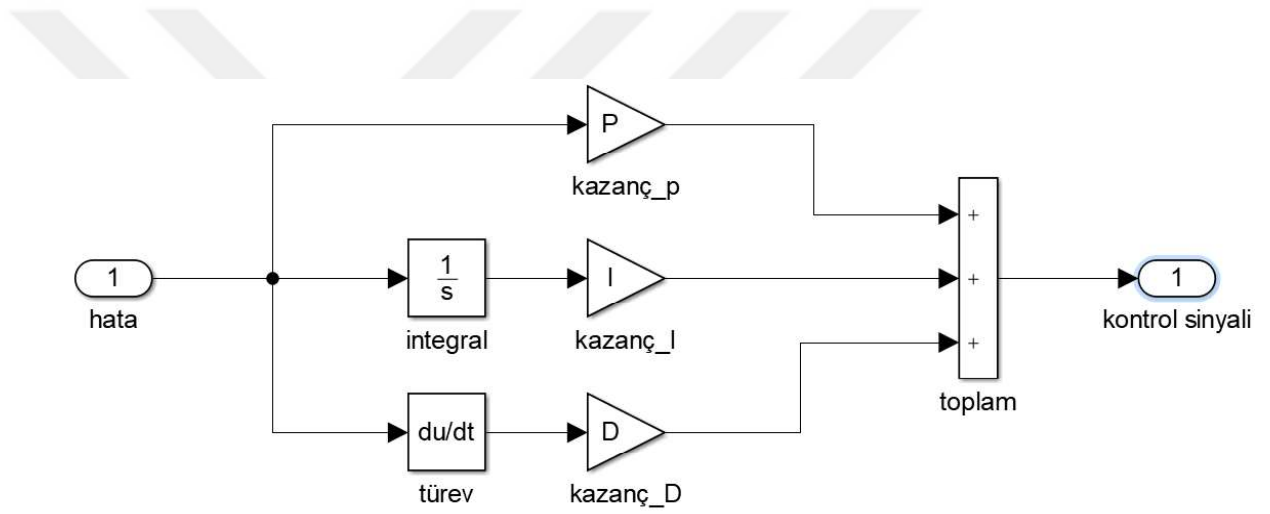
Çizelge 4.4. Dış eksen için bulunan PID parametreleri

Parametre	Değer
K_{p_dis}	49.86
K_{i_dis}	1947
K_{d_dis}	0.52
N_{dis}	800

Çizelge 4.5. İç eksen için bulunan PID parametreleri

Parametre	Değer
$K_{p_{ic}}$	47.03
$K_{i_{ic}}$	1469
$K_{d_{ic}}$	0.61
N_{ic}	500

Tasarlanan PID temelli kontrol sisteminin blok şeması da Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

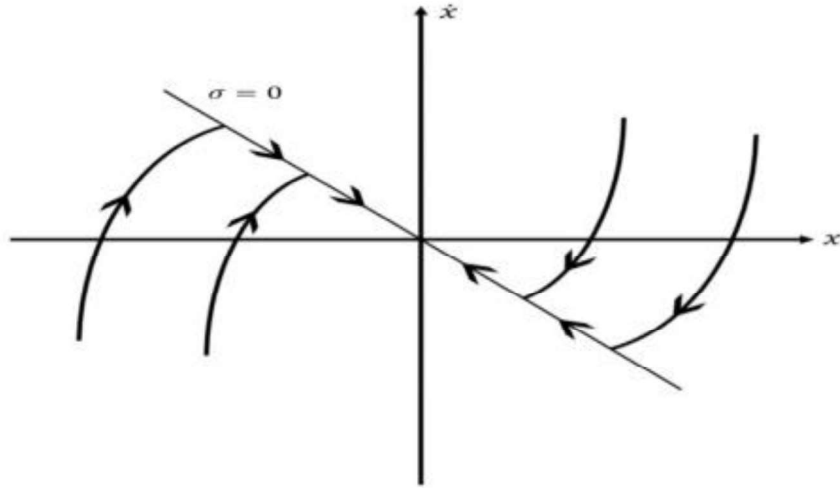


Şekil 4.2. PID temelli kontrol sistemi temel blok şeması

4.2 Kayan Kipli Kontrol Sistemi Tasarımı

Kayan kipli kontrol sistemi, Utkin (1977) tarafından temelleri atılan, doğrusal olmayan, değişken yapılı bir kontrol sistemleri ailesine ait bir kontrol sistemidir. Stabilize platformlarda da kayan kipli kontrol sistemi 20 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır (Smith ve ark., 1999). Kayan kipli kontrol sistemi, doğrusal olmayan yapısı sayesinde, gerek sistem tanımlama ile elde edilen model parametrelerindeki olası sapma ve değişikliklere, gerekse kontrol sisteminin çalışması esnasında dışardan gelecek bozucu girişlere karşı oldukça gürbüz bir yapıdadır.

Kayan kipli kontrol sisteminde iki ana kontrol sinyali vardır. Eş değer kontrol sinyali, sistem tanımlama metodolojisi ile bulunan sistem modeli üzerinden eşdeğer bir kontrol sinyali üretir. Bu kısım, klasik – doğrusal kontrol sistemlerine benzerlik gösterir. İkinci ana kontrol sinyali ise, doğrusal olmayan kontrol sinyalidir. Öncelikle hata ve hatanın türevi ve bazı durumlarda hatanın integraline göre, bir kayma yüzeyi tanımlanır / tasarlanır. Bu kayma yüzeyi, ilgili kontrolcü kazançları ile birlikte, her bir durumda hata ve ilgili öteki değişkenleri (hatanın türevi, hatanın integrali vb.) alıp karşılığında bir değer üretir. Bu üretilen değer, doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonundan, örneğin işaret fonksiyonu, geçirilip bir kazanç ile çarpılır ve doğrusal olmayan kontrol sinyali türetilmiş olur. Kayma yüzeyi, tasarımı bakımından klasik, PID temelli kontrol sistemlerine benzerlik gösterse de kayma yüzeyinin çıktısının doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilip kullanılması ile kayan kipli kontrol sistemi farklılık yaratır ve yüksek mertebelerde gürbüzlüğe ulaşır.



Şekil 4.3. Hata ve hata türevine bağlı kayma yüzeyi (Utkin, 1993)

Şekil 4.3'te görülen doğru, örnek bir tasarımda tanımlanan hata ve hatanın türevine bağlı bir kayma yüzeyidir. Şekilde görüleceği üzere, sistem öncelikle bulunduğu durumdan kayma yüzeyinin bulunduğu düzleme sürülür, ardından kayma yüzeyinde kalarak hatayı / hatanın türevini sıfıra çeker.

Kayan kipli kontrol sisteminin elektromekanik sistemlere uyarlamasında çeşitli iyileştirici operasyonlar da yapılmakla birlikte, ilgili işlemler ve süreç, kontrolcü tasarımı

ve optimizasyon kısımlarında, teorik altyapıdan kontrol sistemi türetildikçe ilgili ara maddelerde izah edilecektir.

Bölüm 3'te belirtilen sistem tanımlama sonucunda, uzay-zaman formunda belirtilen sistem modeli ile kontrol sistemi tasarımına başlanılır. Sistemin dinamik modeli tekrar belirtilirse, girdi akım, çıktı açısal konum olmak üzere sistemin denklemi eşitlik 4.12'de belirtildiği gibidir.

$$J\ddot{x}_1 + B\dot{x}_1 + Kx_1 = K_t I \quad (4.12)$$

Sistemin uzay-zaman modelinde, x_1 açısal konum, x_2 ise açısal hız olmak üzere, x_1 ve x_2 arasında eşitlik 4.13'te gösterilen ilişki vardır.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.13)$$

x_2 durumunun, yani açısal hız değerinin türevi ise eşitlik 4.14'te belirtildiği üzere kontrol sinyali ile ilişkilendirilir.

$$\ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = \frac{K_t I - Kx_1 - Bx_2}{J} \quad (4.14)$$

Bölüm 3'te belirtildiği üzere, sistemde yay sabiti bulunmadığı için, K değeri sıfıra eşittir. Dolayısıyla eşitlik 4.14, eşitlik 4.15'te belirtilen hali alır.

$$\ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = \frac{K_t I - Bx_2}{J} \quad (4.15)$$

Hata, açısal konumda referans değer ile mevcut değer arasındaki fark olarak, eşitlik 4.16'da belirtildiği gibi tanımlanır.

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (4.16)$$

Bu aşamada, kayma yüzeyinin tanımlanması gerekmektedir. İlk konseptte hata ve hatanın türevi üzerinden kayma yüzeyleri tasarlanmış, ancak nihai kontrol sisteminde durağan durum hataları görülmesi üzerine integralli kayma yüzeyi tanımlanmıştır. Kayma yüzeyi, eşitlik 4.17’de belirtildiği şekilde, λ ve γ değerleri kontrol sistemi kazançları olmak üzere tanımlanır.

$$\sigma(e) = \dot{e} + \lambda e + \gamma \int_0^t e dt \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17’de tanımlanan kayma yüzeyinde, hata ve hatanın türevi olan verimler sistemin referans emre hızlı bir şekilde gitmesi ve bozucu girişleri reddetmesi kısımlarında etkili olurken, integral terimi ise durağan durum hatalarını gidermek ve kontrol sinyalinin yumuşatmak kısımlarında etkili olmaktadır.

Eşitlik 4.17’de belirtilen kayma yüzeyi σ üzerinden, sistemin stabilitesinin garanti edilmesi gerekmektedir. Stabilite garantisi için, doğrusal olmayan kontrol sistemlerinde de Lyapunov fonksiyonları ve kriterleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sistemin stabilite garantisi için, eşitlik 4.18’de belirtilen kayma yüzeyine bağlı Lyapunov fonksiyonu seçilmiştir.

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.18’de belirtilen Lyapunov fonksiyonunun, sistemin kararlılığını sağlayabilmesi için, eşitlik 4.19, 4.20 ve 4.21’de belirtilen koşulları sağlaması gerekmektedir (Slotine ve Li, 1991; Khalil, 2010).

$$V(0) > 0 \quad (4.19)$$

$$s > 0 \text{ için } V(s) > 0 \quad (4.20)$$

$$\dot{V}(s) < 0 \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.19 ve 4.20’de belirtilen koşullar, eşitlik 4.18’de belirtilen / tasarlanan Lyapunov fonksiyonunun yapısı sayesinde hali hazırda sağlanmaktadır. Eşitlik 4.21’de belirtilen koşulun sağlanması için, Lyapunov fonksiyonunun türevi, eşitlik 4.22’de gösterildiği gibi alınır.

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} \quad (4.22)$$

Eşitlik 4.22’de belirtilen $\dot{s}$ terimini hesaplamak için eşitlik 4.17’de belirtilen kayma yüzeyinin türevi alınır.

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} + \gamma e \quad (4.23)$$

Eşitlik 4.23’te hesaplanan $\dot{s}$ terimi, eşitlik 4.22’de ilgili yere konulursa eşitlik 4.24 elde edilir.

$$\dot{V}(s) = s(\ddot{e} + \lambda \dot{e} + \gamma e) \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.24’te tanımlanan hatanın birinci ve ikinci dereceden türevleri, eşitlik 4.25 ve 4.26’da belirtildiği gibidir.

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (4.25)$$

$$\ddot{e} = \dot{x}_{1d} - \ddot{x}_1 = \ddot{x}_{1d} - \dot{x}_2 \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.25 ve 4.26'da belirtilen değerler, eşitlik 4.23'te hesaplanan $\dot{s}$ içinde ilgili yerlere konulursa eşitlik 4.27 elde edilir.

$$\dot{s} = (\ddot{x}_{1d} - \dot{x}_2) + \lambda(\dot{x}_{1d} - x_2) + \gamma(x_{1d} - x_1) \quad (4.27)$$

Eşitlik 4.27'de belirtilen $\dot{x}_2$ yerine, eşitlik 4.15'te bulunan değer konulursa, eşitlik 4.28 elde edilir.

$$\dot{s} = \ddot{x}_{1d} - \frac{K_t I - B x_2}{J} + b x_2 + \lambda \dot{e} + \gamma e \quad (4.28)$$

Lyapunov fonksiyonunun sağlanması için $\dot{s}$ terimi eşitlik 4.29'da belirtildiği gibi sıfıra eşitlenir.

$$\dot{s} = 0 \quad (4.29)$$

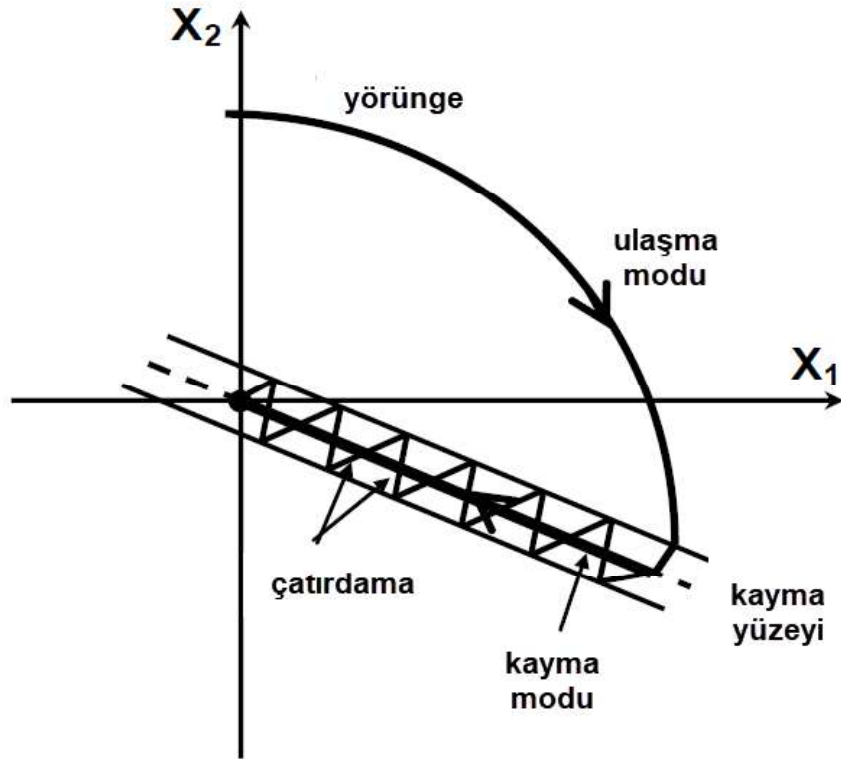
Eşitlik 4.21'de belirtilen kısıt ile, eşitlik 4.28'de kontrol sinyali yalnız bırakılarak eşdeğer kontrol sinyali türetilir. Eşdeğer kontrol sinyali, eşitlik 4.30'da belirtilmiştir.

$$u_{\text{eşdeğer}} = \frac{J}{K_t} \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{B}{J} x_2 + \lambda \dot{e} + \gamma e \right) \quad (4.30)$$

Doğrusal olmayan kontrol sinyali için, geleneksel olarak eşitlik 4.31'de belirtilen işaret fonksiyonunun bir kazançla çarpımı kullanılır. Eşitlik 4.31'de belirtilen η parametresi, kontrol sistemi kazançlarından birisidir. Bozucu girişleri bastırmak için, değeri karşılaşılabilecek bozucu giriş mertebelerine eşit veya büyük olmak zorundadır.

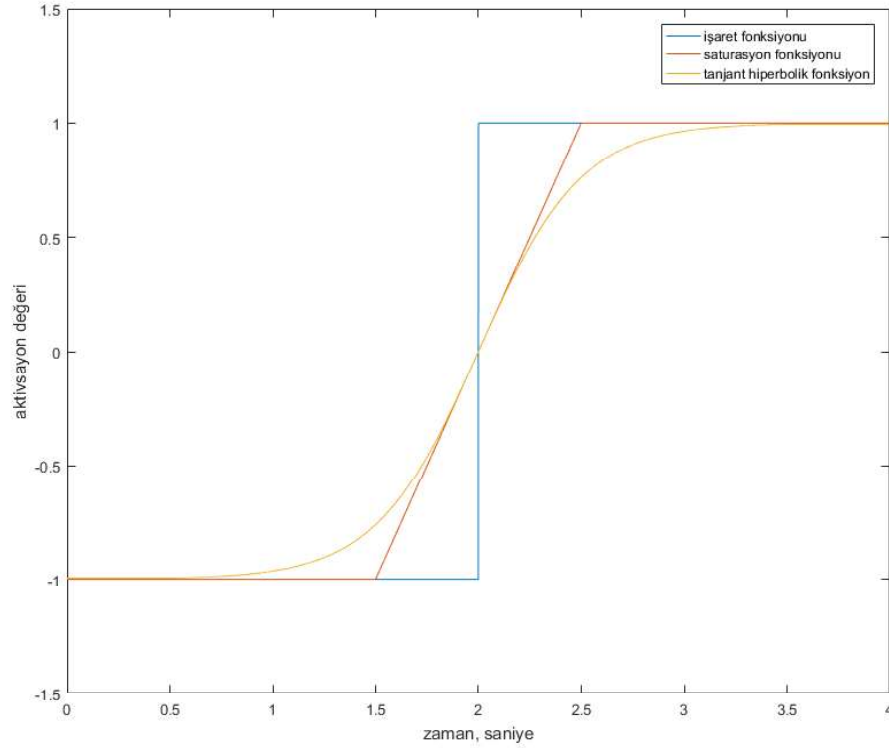
$$u_{nl} = \eta \text{sign}(s) \quad (4.31)$$

Yalnız, işaret fonksiyonu kullanıldığı durumlarda, sistem kayma yüzeyine geldiği zaman kontrol sinyali çok yüksek frekansta ve gürültülü bir şekilde türetilir. Bunun sebebi, kayma yüzeyine ne kadar yakın olunursa olunsun, sistem yüzeyin bir tarafındayken tersi yönde, ufak bir oynama ile öteki yöne geçtiği zaman da bu yönün tersi yönde sürekli bir düzeltme sinyali üretmektedir. Bu durum, bir takım elektrik devreleri üzerindeki kontrol sistemlerinde devrelerin ve PWM sinyalinin çalışma mantığı ile tutarlı olduğu için sorun teşkil etmemektedir. Ancak, elektromekanik sistemlerde, sistemde gürültüye sebep olmakta, aynı zamanda sürekli büyük mertebelerde kontrol sinyali olduğu için sistemin çok enerji tüketmesine ve motorların ısınmasına sebep olmaktadır. Bu durum, literatürde üzerinde çok çalışılmış, halen de çalışılmakta olan bir fenomendir (Edwards ve ark., 2006). İşaret fonksiyonu kullanıldığı zaman oluşan çatırdama problemi, Şekil 4.4'te kayma yüzeyi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kayma yüzeyi üzerinde çatırdama fenomeninin gösterimi (Khater, 2007)

Çatırdamayı önlemek için yapılacak pratik iyileştirmelerden birisi, sistemde doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu olarak işaret fonksiyonu yerine sıfırın etrafında değeri azalan saturasyon ve tanjant hiperbolik fonksiyonlarının kullanılmasıdır. İlgili aktivasyon fonksiyonlarının karşılaştırılması Şekil 4.5'te yapılmıştır.



Şekil 4.5. Aktivasyon fonksiyonlarının gösterimi

Yumuşak geçişlere sahip olması ve eksponansiyel olarak değerini artırması sebebi ile, kontrol sistemi tasarımında aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant hiperbolik fonksiyonu seçilmiştir. Tanjant hiperbolik fonksiyonu, eşitlik 4.32'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4.32)$$

Bu seçim sonucunda, doğrusal olmayan kontrol terimi eşitlik 4.33'te gösterilen formu alır.

$$u_{nl} = \eta \tanh(s) \quad (4.33)$$

Unutulmaması gereken bir husus, işaret fonksiyonundan uzaklaştıkça, sistemin gürbüzlüğünden ödün verildiğidir. Bozucu bir giriş geldiğinde veya referans sinyali değiştiğinde, kayma yüzeyi sıfırın etrafından ufak mertebelerde uzaklaştığı zaman tanjant hiperbolik fonksiyonu, işaret fonksiyonu kadar hızlı tepki vermemekte, bu da çatırdama yönünden avantaj sağlamakla birlikte gürbüzlükten ödün vermektedir. Bu durumda her iki sistemin avantajından yararlanmak ve kontrol sistemini parametrik yapmak için, kayma yüzeyine bağlı değişken şekilde bir kazanç daha eşitlik 4.34'te gösterildiği gibi kontrol sinyaline eklenmiştir. Bu sayede, aktivasyon fonksiyonunun kazancı sadece sabit bir η parametresine bağlı kalmayacak, sistem olması gerekenden çok uzak bir yerde ise bu kazancı eksponansiyel olarak büyütecek, yalnız istenilen duruma yaklaştıkça da sürekli katsayıyı düşürecek bir performans verecektir.

$$u_{nl} = \eta |s|^{\eta_p} \tanh(s) \quad (4.34)$$

Eşitlik 4.34'te belirtilen η_p üssel değeri de ayarlanması gereken bir kontrol kazancıdır. Kayma yüzeyi değerinin mutlak değer içerisinde olması, kontrol sinyalinin yönünü değişmeyeceğini, yalnız o anki duruma göre kazançlarının büyüklüğünü dinamik ayarlanacağını garanti eder.

Nihai olarak, kontrol sinyali, eşitlik 4.35'te gösterildiği gibi, eşdeğer ve doğrusal olmayan sinyalin toplamı ile elde edilir.

$$u = u_{\text{eşdeğer}} + u_{nl} \quad (4.35)$$

Eşitlik 4.35'te belirtilen sinyaller, eşitlik 4.30 ve 4.34'te tanımlanmıştır. Bunlar eşitlik 4.35'te yerlerine konulursa, kontrol sinyali eşitlik 4.36'da belirtilen halini alır.

$$u = \frac{J}{K_t} \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{B}{J} x_2 + \lambda \dot{e} + \gamma e \right) + \eta |s|^{n_p} \tanh(s) \quad (4.36)$$

Kontrol sinyalinde ön beslemeli terim olan $\ddot{x}_{1d}$ terimi, emir hızlı değişirken yüksek değerler üretmekte, buna binaen öteki kazançların değerleri düşürülmek zorunda kalınmaktadır. Bu durum da emrin türevinin değişmediği bozucu girişlerde performans kaybına sebep olmaktadır. Bu sebeple, kontrol sinyalinde ön besleme terimi kullanılmamakta, kontrol sinyali eşitlik 4.37’de belirtilen halini almaktadır.

$$u = \frac{J}{K_t} \left(\frac{B}{J} x_2 + \lambda \dot{e} + \gamma e \right) + \eta |s|^{n_p} \tanh(s) \quad (4.37)$$

Kontrol sisteminin optimizasyon sürecinde nicel değerlerinin küçük, ondalıklı sayılar yerine büyük sayılar olması değerler arasındaki farkı yorumlamayı ve limitleri belirlemeyi kolaylaştırmaktadır. Bu sebeple, eşitlik 4.37’de verilen kontrol sisteminde K_t ve J değerleri kontrol sisteminin dışına alınıp, değerler de Bölüm 3’te Çizelge 3.4’te belirtilen sistem tanımlama parametreleri cinsinden yazıldığı takdirde eşitlik 4.38’deki form elde edilir. Pratikte eşitlik 4.37 ile birebir aynı kontrol sinyali üretilmekte, katsayılar kontrol sisteminin dışına alınmaktadır. Bu sayede yalnız kontrolcü parametreleri görece büyük değerler alıp optimizasyon sürecinde takibi kolaylaştırmaktadır.

$$u = \frac{1}{aK_t} (bx_2 + \lambda \dot{e} + \gamma e + \eta |s|^{n_p} \tanh(s)) \quad (4.38)$$

4.3 Gözlemci Tasarımı

Eşitlik 4.38’de belirtilen kontrol sinyalinin girdilerinden birisi x_2 terimi, yani hız bileşenidir. Sistemde ise ölçer olarak yalnızca açısal konum ölçeri bulunmakta, açısal hız ölçeri bulunmamaktadır. Hız verisini türetmenin bir yolu konum verisinin türevini almak olmakla birlikte, ölçer gürültüsünün olduğu durumlarda bu yöntem çok sağlıklı olmamaktadır. Bu sebeple, konum verisinden hız verisini türetmek için, Bölüm 3’te sistem tanımlama ile bulunan iç ve dış eksen modelleri üzerinden, sistem dinamikleri dikkate alınarak hız gözlemcisi tasarlanmıştır.

$$\dot{\varphi} = (A_{22} - K_e A_{12})\eta + \{((A_{22} - K_e A_{12})K_e) + A_{21} - K_e A_{11}\}y + (B_2 - K_e B_a)u \quad (4.39)$$

Eşitlik 4.39’da belirtilen $\dot{\varphi}$ sinyalinin integrali alınarak, eşitlik 4.40’da belirtilen şekilde x_2 durumu, gözlemci sayesinde elde edilmiş olur (Ogata, 2009).

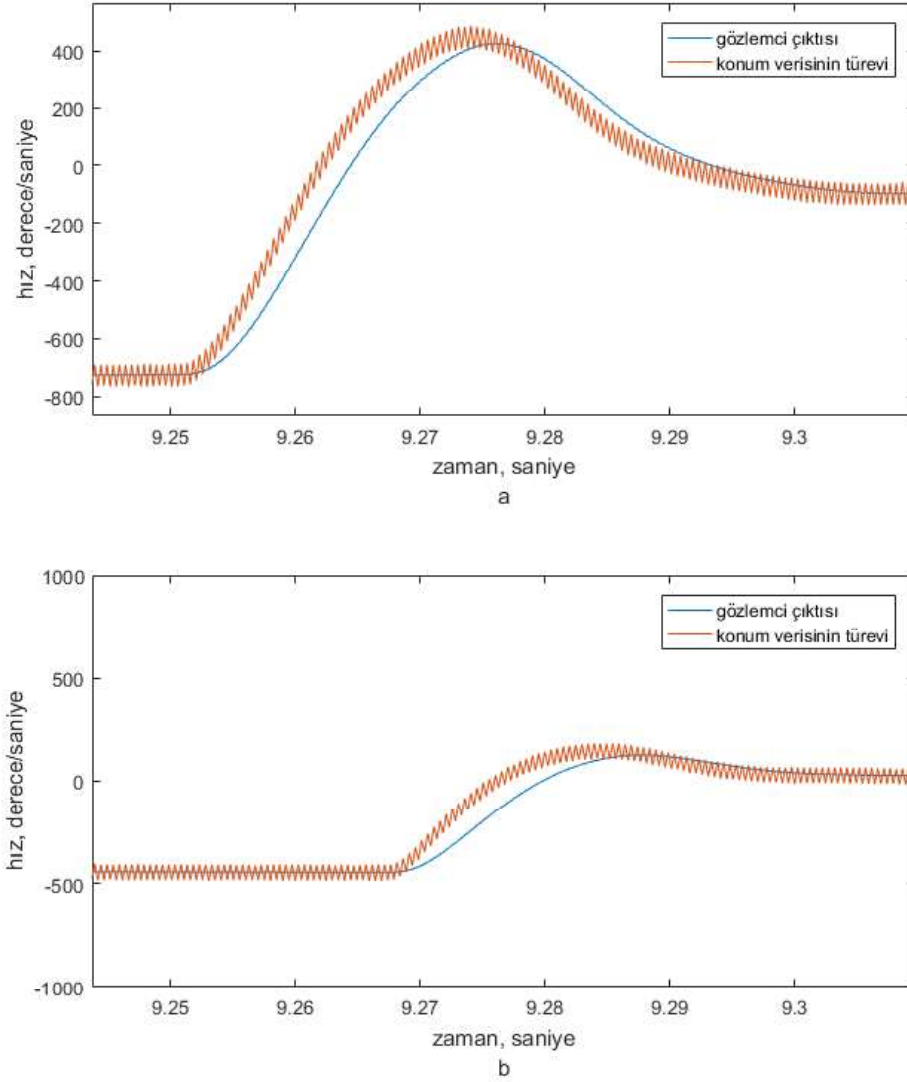
$$x_2 = \varphi + K_e y \quad (4.40)$$

Eşitlik 4.39 ve 4.40’da belirtilen K_e terimi, gözlemci katsayısıdır. K_e değeri arttıkça, gözlemci çıktısı türeğe yakınsar. K_e değeri azaltıldıkça, türetilen hız sinyalindeki gürültüler de azalır ama gecikme artar ve veri sönümlenmeye başlar. Bu sebeple K_e değerinin de uygun bir aralıkta seçilmesi gerekmektedir. İç ve dış eksenler için seçilen K_e değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Dış ve iç eksen için seçilen gözlemci kazançları

Eksen	K_e Değeri
Dış eksen	300
İç eksen	250

Gözlemcinin örnek bir performansı, dış eksen ve iç eksen için Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Dış (a) ve iç (b) eksenleri türev ve gözlemci çıktılarının karşılaştırılması

Kayan kipli kontrol sisteminin parametreleri ve kazançları, sistem performansına göre geri bildirimler ile ayarlanarak, dış ve iç eksenler için sırasıyla Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kayan kipli kontrol sistemi için manuel olarak bulunan kazançlar

Dış eksen – Parametre	Değer
$\eta_{dış}$	170
$\lambda_{dış}$	90
$\gamma_{dış}$	6500
$n_{p_dış}$	0.45
İç eksen – Parametre	Değer
$\eta_{dış}$	148
$\lambda_{dış}$	78
$\gamma_{dış}$	2250
$n_{p_dış}$	0.45

Tasarlanan kontrol sistemin blok şeması, dış eksen için Şekil 4.7’de gösterilmiştir. İç eksen için de aynı mimari kullanılmakta, yalnızca değişkenlerin değerleri değişmektedir.

5. TEST ORTAMLARI

5.1 Gerçek Sistem

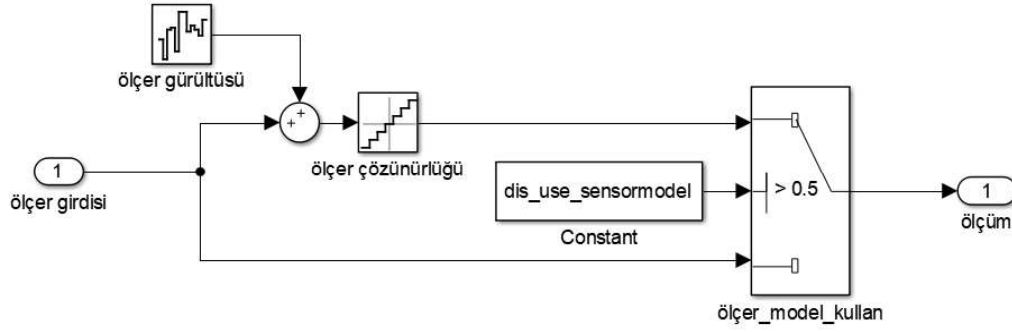
Sistemde ölçer okuma kartları, motor sürücüler ve endüstriyel analog / dijital okuma yazma kartları kullanılmaktadır. Tasarımlar, MATLAB® (SN: 254052) Simulink RealTime® aracılığı ile hedef bilgisayara C koduna dönüştürülüp yüklenmekte ve gerçek sistem döngüde donanım test kurgusu ile çalıştırılıp sonuçlar masaüstü bilgisayara gönderilmektedir.

Çalışmalar oda şartları altında gerçekleştirilmiş, yalnız bozucu etkiler akım izdüşümüne dönüştürülüp gerek benzetim ortamında gerek gerçek sistemde sisteme beslenmiştir.

5.2 Benzetim Ortamı

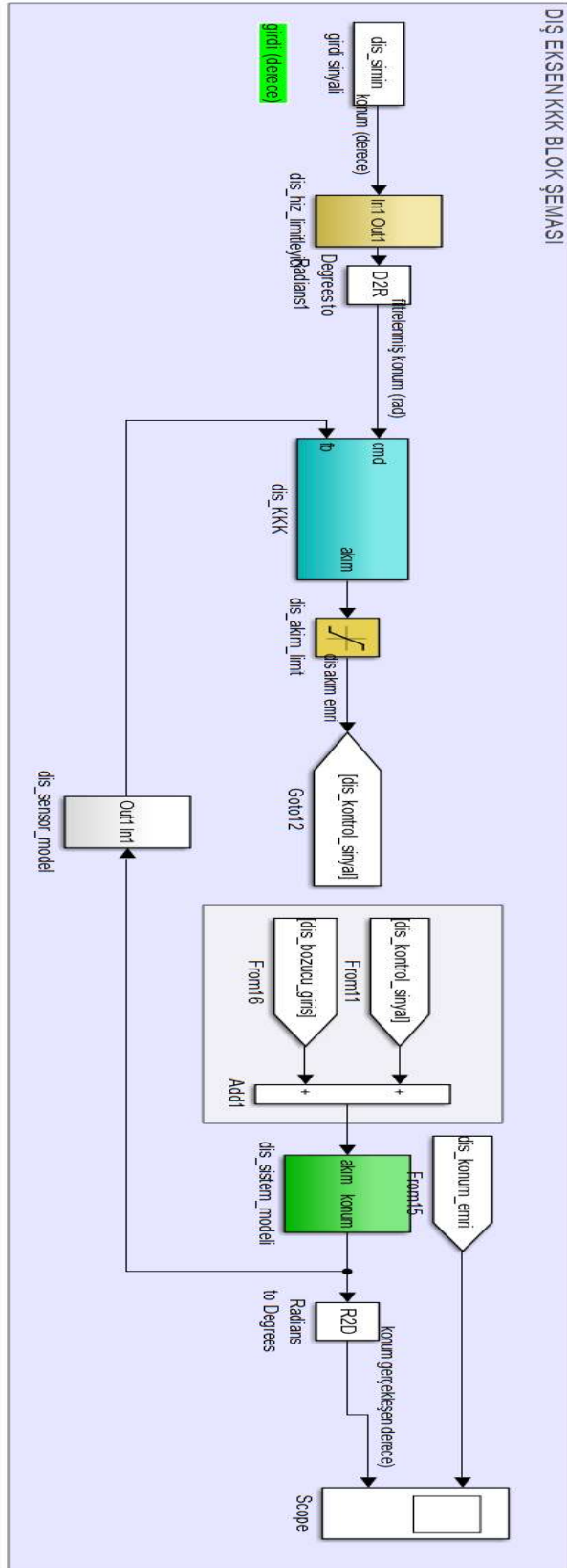
Gerek kontrol sisteminin testleri gerekse optimizasyon aşamasında çok sayıda test yapılması gerekmektedir. Bu testlerin her birinin gerçek zamanlı ve gerçek sistem üzerinde yapılması pratikte mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, bölüm 3'te tanımlanan sistem modeli ve bölüm 4'te tasarlanan kontrolcü ile birlikte, ölçerler de modellenerek bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Bu benzetim ortamı ile testler sanal olarak ve gerçek sisteme yakınsayacak şekilde icra edilebilmektedir.

Benzetim ortamını gerçek sisteme yakınsatmak için, ölçer modeli de sisteme dahil edilmiştir. Ölçerin minimum değişiklik miktarı ve okuma gürültüsü modeli dahil edilmiştir. Zaman gecikmesi çok küçük mertebelerde olduğu için modele dahil edilmemiştir. Ölçer modeli Şekil 5.1'de görülebilir.



Şekil 5.1. Benzetim ortamında kullanılan ölçer modeli

Bozucu girişler ise kontrol sisteminin akım çıkısına ek olarak, ön beslemeli olarak eklenmiştir. Benzetim ortamında kullanılan şema, Şekil 5.2’de görülebilir. Gerek gerçek sistemi çalıştırırken, gerek benzetim ortamında simülasyonlar yaparken, 3.5Ghz saat hızına sahip 12 çekirdekli bir işlemci ve 16Gb kapasiteye sahip bir bellek (RAM) kullanılmıştır. Bu işlem gücü ile, benzetim ortamı gerçek zamanlı sistemden de hızlı çalışmış, bu da özellikle genetik algoritma ile yapılacak optimizasyonlarda hızlı bir şekilde sonuca ulaşılmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 5.2. Kontrol sistemi benzetim ortamı blok şeması

6. GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYON

Bölüm 4.2’de tasarlanan kayan kipli kontrol sisteminde, ayarlanabilir birçok parametre bulunmaktadır. İstenilen performansa göre, manuel bir şekilde tüm bu parametrelerin optimum değerini bulmak oldukça zorlu bir süreçtir. Bu sebeple, tasarımın sonucunda Çizelge 4.7’de belirtilen değerler optimizasyon sonucu bulunmak üzere yeniden ele alınmıştır. Optimizasyon için performans yönüyle isterler ve kısıtlar konulmuş, parametrelerin değer aralıkları ve alabilecekleri değerler belirtilmiş, birçok unsura dayanan başarı metriği tasarlanmış, optimizasyon algoritmasının parametreleri belirlenmiş ve son olarak her bir eksen için kontrol sistemi parametreleri optimizasyona sokulup sonuçları değerlendirilmiştir.

6.1 Problemin Genetik Algoritma ile Temsili

Optimizasyon problemi için iç ve dış eksen ayrı ayrı ele alınmıştır. Kontrol sistemi kazançları, sürekli aralığa sahip olduğu için, alt ve üst limitler her bir parametre için belirlenmiştir. Bu değer aralıklarında rasyonel herhangi bir değer optimizasyon sırasında bu parametrelere atanabilir. Aktivasyon fonksiyonu için ise işaret fonksiyonu, saturasyon fonksiyonu ve tanjant hiperbolik fonksiyon seçenek olarak eşitlik 6.1’de gösterildiği gibi tasarlanmış, yalnız optimizasyon boyutunu artırmamak için kullanılmamıştır.

$$f(x) = \begin{cases} x=1, & \text{akt}=\text{sign}() \\ x=2, & \text{akt}=\text{sat}() \\ x=3, & \text{akt}=\text{tanh}() \end{cases} \quad (6.1)$$

Bölüm 1.2’de açıklandığı gibi, her bir kromozom optimizasyon yapılacak parametre sayısı kadar gen içermektedir. Her bir eksen için, kromozom yapısı ve alabileceği değerler Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de belirtilmiştir. Nümerik değerlerin limitleri, kontrol sistemi tasarımı sonrasında manuel parametre seçimi esnasında karşılaşılan limitler baz alınarak konulmuştur.

Çizelge 6.1. Dış eksen optimize edilecek parametreler ve limitleri

Parametre	Azami değer	Asgari değer
$\eta_{dış}$	50	500
$\lambda_{dış}$	40	200
$\gamma_{dış}$	100	8000
$n_{p_dış}$	0	1

Çizelge 6.2. İç eksen optimize edilecek parametreler ve limitleri

Parametre	Azami değer	Asgari değer
$\eta_{iç}$	50	450
$\lambda_{iç}$	30	180
$\gamma_{iç}$	100	7000
$n_{p_iç}$	0	1

6.2 Genetik Algoritma ile Kullanılacak İşlemler

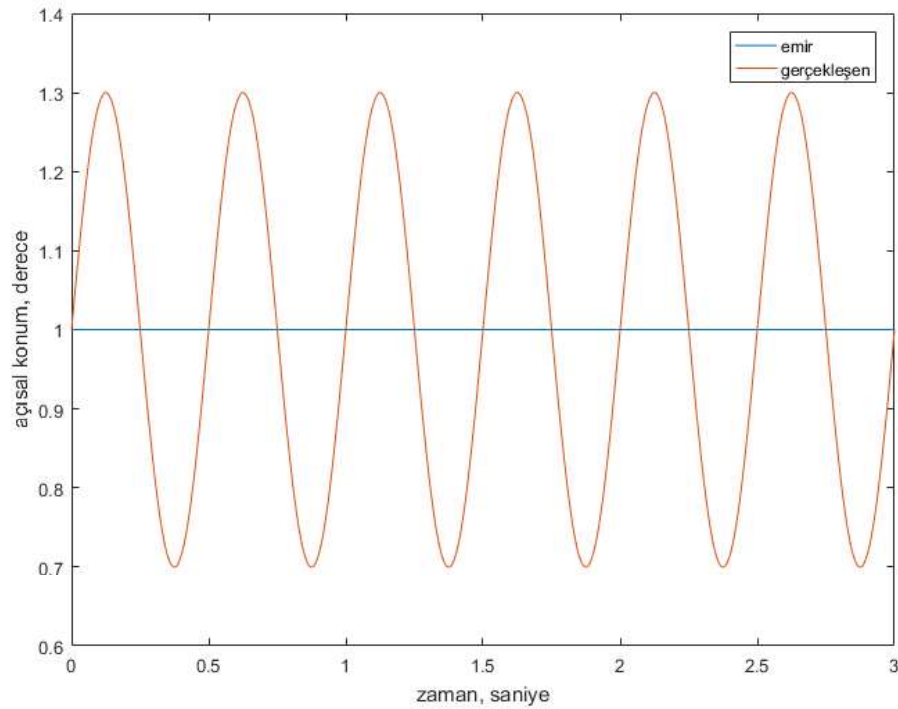
Kromozomlar arasında, Bölüm 1.2’de belirtildiği gibi, çaprazlama ve mutasyon işlemleri kullanılacaktır. Ayrıca, belirli bir olasılık dahilinde, bir sonraki jenerasyon için, mevcut kromozomların mutasyon ve çaprazlama ile oluşturulan çocukları dışında yeni kromozomlar da türetilecektir. Her bir adımda mevcut kromozomların başarımları hesaplanacak, eğer tasarım kriterini karşılayan bir kromozom var ise optimizasyon sonlandırılacak, yoksa belirtilen operatörler ile yeni kromozomlar türetilecek, bunların başarımları hesaplanacak ve döngü optimizasyon sonlandırılana kadar devam edecektir.

6.3 Ödül Fonksiyonu Tasarımı

Kontrol sistemlerinde optimizasyon prosedürünün en zorlayıcı kısmı ödül fonksiyonu tasarımıdır. Eğer ödül fonksiyonu yeterince kapsayıcı olmazsa, optimizasyon algoritması sistemin açığını bulup lokal bir minimaya yakınsayacak, bu da sistemin

istenilen performanstan çok uzak, ama ödül fonksiyonunu tatmin eden bir hale evrilmesine sebep olacaktır.

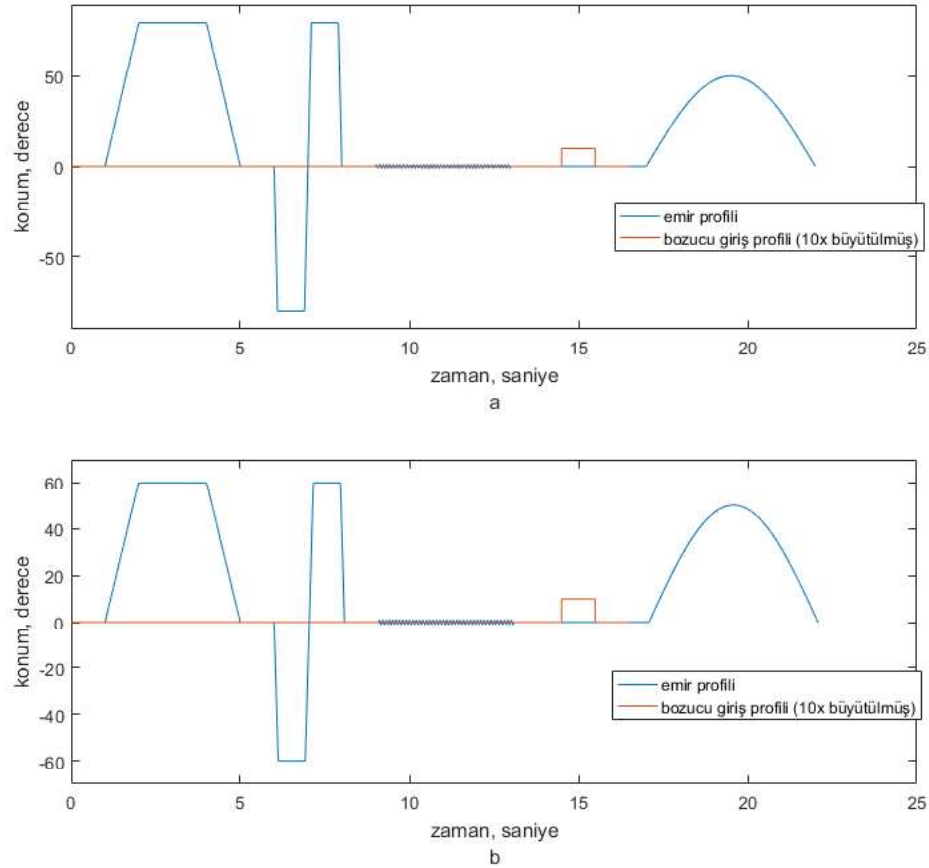
Örneğin, hatalı bir örnek olarak, ödül fonksiyonunu toplam hatanın minimum hali olarak ifade ettiğimizi varsayalım. Bu durumda, sistem Şekil 6.1’de görülen, osilasyonlu ve istenilen değere oturamayan bir kontrol sistemi türetebilir. Görüleceği üzere bu performans çok kötü olmasına rağmen, referans olan 1 değerinin altında ve üzerinde kalan hatalar eşit olduğu için, toplam hata sıfır olacak ve ödül fonksiyonu bu kontrol sisteminin en iyi olduğunu iddia edecektir. Bu basit örnek üzerinden, hata minimizasyonu yerine hatanın mutlak değerinin minimizasyonu çok daha iyi bir sistem ortaya çıkaracaktır.



Şekil 6.1. Yanlış bir şekilde optimize olmuş kontrol sistemi performansı

Bu durum, daha kompleks formlarda da sürekli ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, bu tez kapsamında hazırlanan ödül fonksiyonu, iteratif bir şekilde hazırlanmıştır. Öncelikle önerilen, alt başlıklarda belirtilecek kısıtların bir kısmı girilmiş, daha sonra

optimizasyon yapılmış, şayet optimizasyon sonucu ortaya çıkan kontrol sisteminin çok yanlış davrandığı bir yer/durum tespit edilirse, o duruma da ceza konulup veya o durumun cezasının güncellenip, yeniden optimizasyona sokulması şeklinde süreç tekrar etmiştir. Bu işlemler sonucunda, nihai olarak aşağıdaki prosedür ve katsayıları seçilmiştir.



Şekil 6.2 Dış (a) ve iç(b) eksenler için optimizasyon esnasında uygulanacak profil

Şekil 6.2’de sırasıyla dış ve iç eksenler için tanımlanan profiller gösterilmiştir. Belirli bir hız profili, ardından adım emirleri, sonrasında düşük frekans ve yüksek genlikte sinüs emirlerinden oluşan bir profil hazırlanmıştır. Her iki eksen için de profilin sonunda, sanal olarak bozucu giriş verilmiş, bu sayede tek bir profil üzerinden hem emir takip performansı hem de bozucu giriş karşısında sistemin göstereceği performans ölçülebilir ve puanlanabilir bir hale gelmiştir.

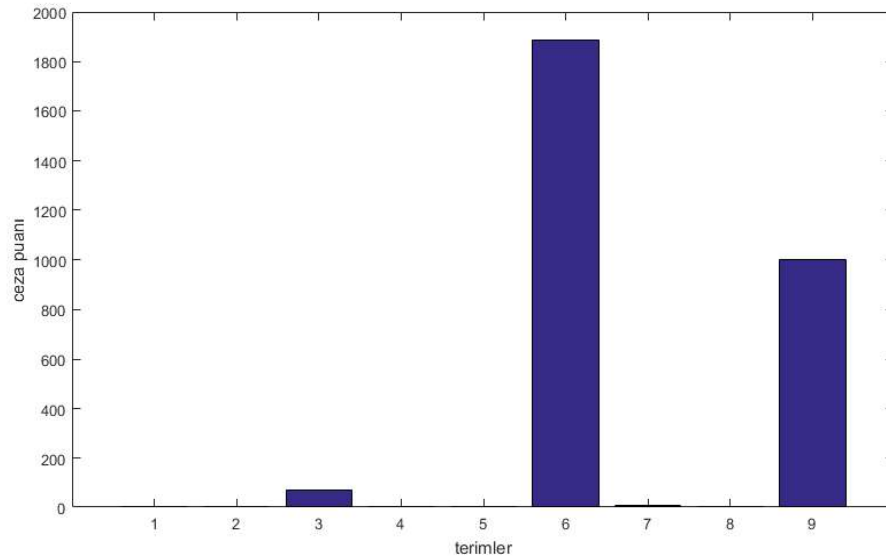
Çizelge 6.3. Dış eksen için ceza fonksiyonu bileşenleri

Gözlem numarası	Ölçülen değer	Senaryodaki süresi	Birimi
1	Adım emri aşımı	7.16-7.19 sn	Derece
2	Bozucu giriş karşısında maksimum sapma açısı	14.5-14.8 sn	Derece
3	Bozucu giriş boyunca yapılan toplam hata	14.5-14.9 sn	Derece*saniye
4	Düşük frekanslı sinüs sinyalinde yapılan toplam hata	17.2-21.95	Derece*saniye
5	Ortalama mutlak akım değeri	Tüm senaryo	Amper
6	Toplam mutlak hata	Tüm senaryo	Derece
7	Adım emri durağan duruma geçişte hata türevi	7.16-7.26 sn	Derece/saniye
8	10 Hz 1 derece sinüs sinyali karşısında aşım/sönüm miktarı	12.38-12.44 sn	Derece/saniye
9	Kontrolcü kazançları η , λ , $\gamma/20$ değerlerinin toplamı	-	-

Çizelge 6.3'te dış eksen optimizasyonu için ceza fonksiyonu bileşenleri belirtilmiştir. İç eksen de aynı kurguda olmakla birlikte, daha yavaş olması sebebiyle zaman aralıkları farklı olmaktadır. Maddeler sırası ile açıklanırsa, ilk madde adım emrine karşı aşımı minimize etmeye çalışmaktadır. İkinci madde bozucu girişte minimum savrulmaya sebep olmaktadır. Üçüncü madde, bozucu giriş karşısında toplam hatayı minimize eder. Dördüncü madde, düzenli düşük frekanslı bir emir karşısında düzgün bir takip performansını optimize eder. Beşinci madde, kontrol sinyalini minimize etmeye çalışır. Altıncı madde, toplam hatayı minimize eder. Yedinci madde, osilasyonları önleme yönünde çalışır. Sekizinci madde, kontrol sisteminin ilgili frekansta isterler dahilinde performans göstermesine çalışır. Dokuzuncu madde ise, kontrol sisteminin

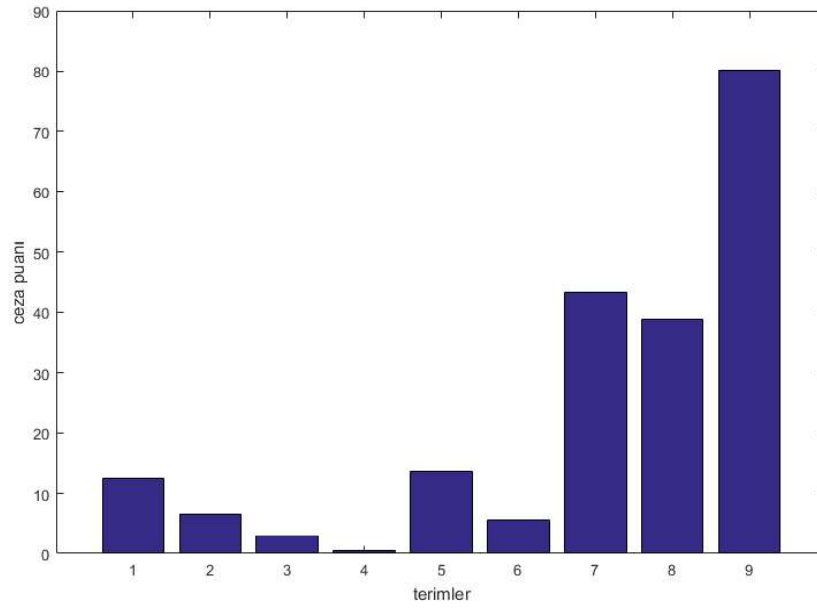
parametrelerinin çok yüksek tutulmamasına çalışır. γ terimi çok büyük değerler aldığı için, öteki parametreler ile benzer aralığa çekilmek adına 0.05 ile çarpılmıştır.

Her 9 madde Çizelge 6.3’de görüldüğü üzere farklı birimlere ve farklı mertebelere sahiptir. Çizelge 4.7’de bulunan el ile hesaplanan kontrol sistemi karşısında iç eksen için her bir terimin ceza fonksiyonuna katkısı Şekil 6.3’te görüldüğü gibidir. Mertebeleri birbirine yakın tutmak için, her bir madde için ağırlık kazancı tanımlanır.



Şekil 6.3. Ceza fonksiyonu katsayıları ayarlanmadan önce her bir terimin ceza puanına katkısı

Kazançla ilgili terimler çarpıldığında, Şekil 6.4’te görüleceği üzere dengeli bir dağılım sağlanmış olunur.



Şekil 6.4. Ceza fonksiyonu kaysatıları ayarlandıktan sonra her bir terimin ceza puanına katkısı

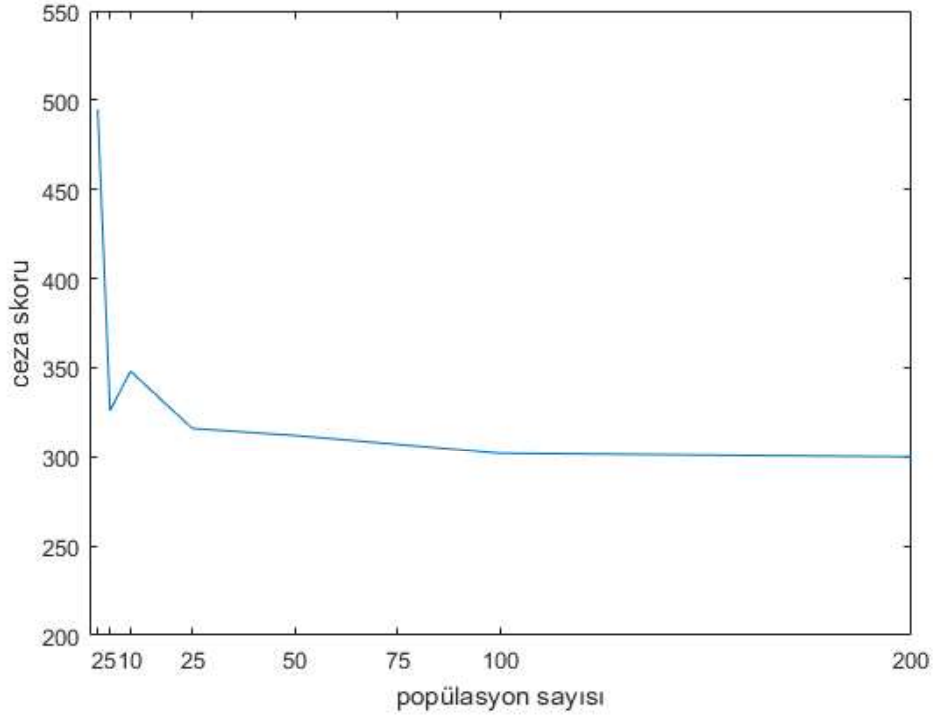
6.4 Eğitim Parametreleri

Belirlenen ceza fonksiyonunu minimize etmek için, genetik algoritma her iki eksen için de Çizelge 6.4’te belirtilen parametreler ile tasarlanmıştır.

Çizelge 6.4. Genetik algoritma parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Kromozom Sayısı</i>	50
<i>Jenerasyon</i>	30
<i>Elit Gen Sayısı</i>	1
<i>Çaprazlama olasılığı</i>	0.8
<i>Mutasyon Oranı</i>	0.3
<i>Seçim Yöntemi</i>	Rulet

Çizelge 6.4'te belirtilen parametreler arasında ayarlama işlemi popülasyon sayısı üzerinde yapılmıştır. Popülasyon sayısının optimizasyon sonucu üzerindeki etkisini görmek için farklı değerler ile testler yapılmış, sonuçlar Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı popülasyon sayılarının ceza skoruna etkisi

Optimizasyon parametreleri Çizelge 6.4'te görüldüğü gibi belirlendikten sonra, her iki eksen için de optimizasyon başlatılmış ve optimizasyon işlemi sonlandığında Çizelge 6.5'te belirtilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 6.5. Optimizasyon öncesi ve sonrası kontrol sistemi kazançları

Parametre	Optimizasyon öncesi değer	Optimizasyon sonrası değer
$\eta_{dtş}$	170	192
$\lambda_{dtş}$	90	85
$\gamma_{dtş}$	0.45	0.49

$n_{p_dış}$	6500	6654
$\eta_{iç}$	148	151
$\lambda_{iç}$	78	80
$\gamma_{iç}$	0.45	0.46
$n_{p_iç}$	2250	2368

Manuel olarak Çizelge 4.7’de belirtilen parametreler ile optimizasyon sonucu elde edilen parametreler çalıştırıldığında, ceza puanları Çizelge 6.6’da görülmektedir. Çizelge incelendiğinde görüleceği üzere, her iki eksen için de sistemin performansının iyileştiği gözlemlenmektedir.

Çizelge 6.6. Optimizasyon sonucu ceza puanında iyileşme

Eksen	Optimizasyon öncesi ceza puanı	Optimizasyon sonrası ceza puanı
Dış Eksen	215.02	204.06
İç Eksen	315.59	312.60

7. DENEY TASARIMI

Kontrol sistemi öncelikle benzetim ortamında test edilmiş, ardından gerçek sistem ile test edilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim ortamı, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi modellenmiştir. Bölüm 3’te elde edinilen parametreler ile sistemin modeli oluşturulmuş, ardından ölçer ve ilgili bozucu girişler de modellenip benzetim ortamına eklenmiştir. Genetik algoritma ile optimizasyon sırasında çok sayıda deneye ihtiyaç duyulacağı için, optimizasyon sanal olarak benzetim modeli üzerinde yapılmış, ardından elde edilen sonuçlar gerek benzetim gerek gerçek sistem üzerinde doğrulanmıştır.

Model ve ilgili alt sistemler doğrusal olarak tanımlandığı için, benzetim ortamı ile gerçek sistem arasında birtakım farklılıklar olabilmektedir.

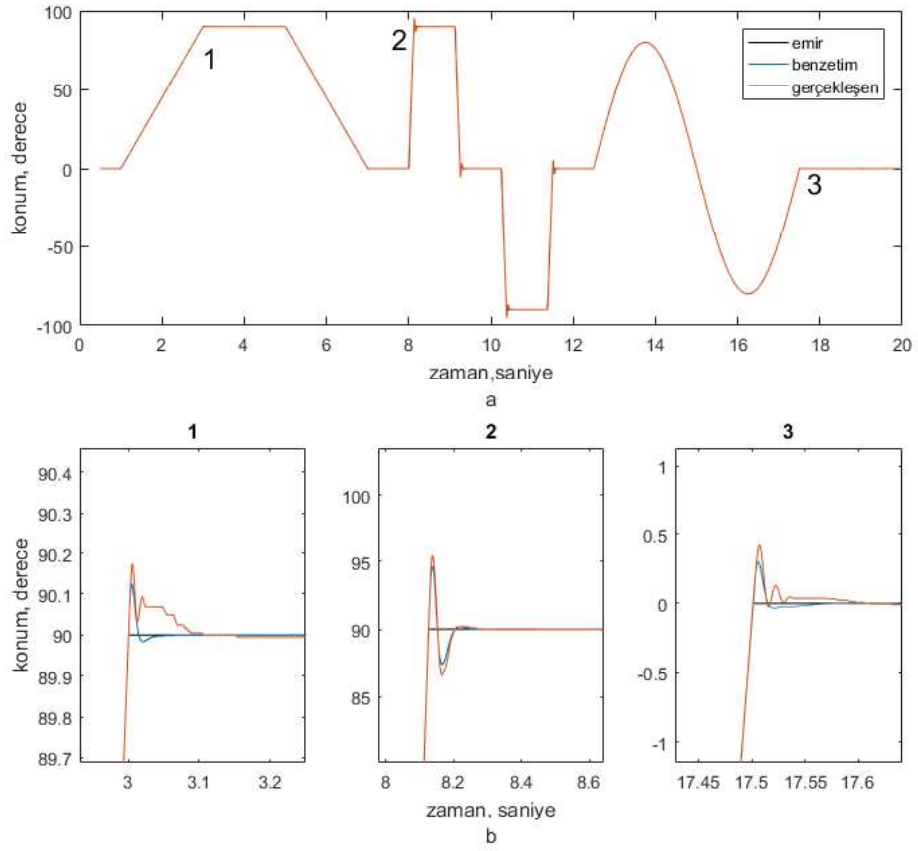
Asimetrik ve her bir yönde doğrusal olmayan sürtünme, gerçek zamanlı etkileşimde yaşanan gecikmeler, doğrusal olmayan sönümlleme katsayısı ve ortam şartlarına göre değişen sistem parametreleri doğrusal benzetim ortamında görülmeyen fenomenlerden birkaçıdır.

Doğrusal olmayan bu fenomenlerden bir kısmı teorik ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kazanımlar ile modellenebilmektedir. Geriye kalan değişkenlerin sebep olacağı etkilerin ise kontrol sisteminin gürbüzlüğü sayesinde kapatılması öngörülmektedir.

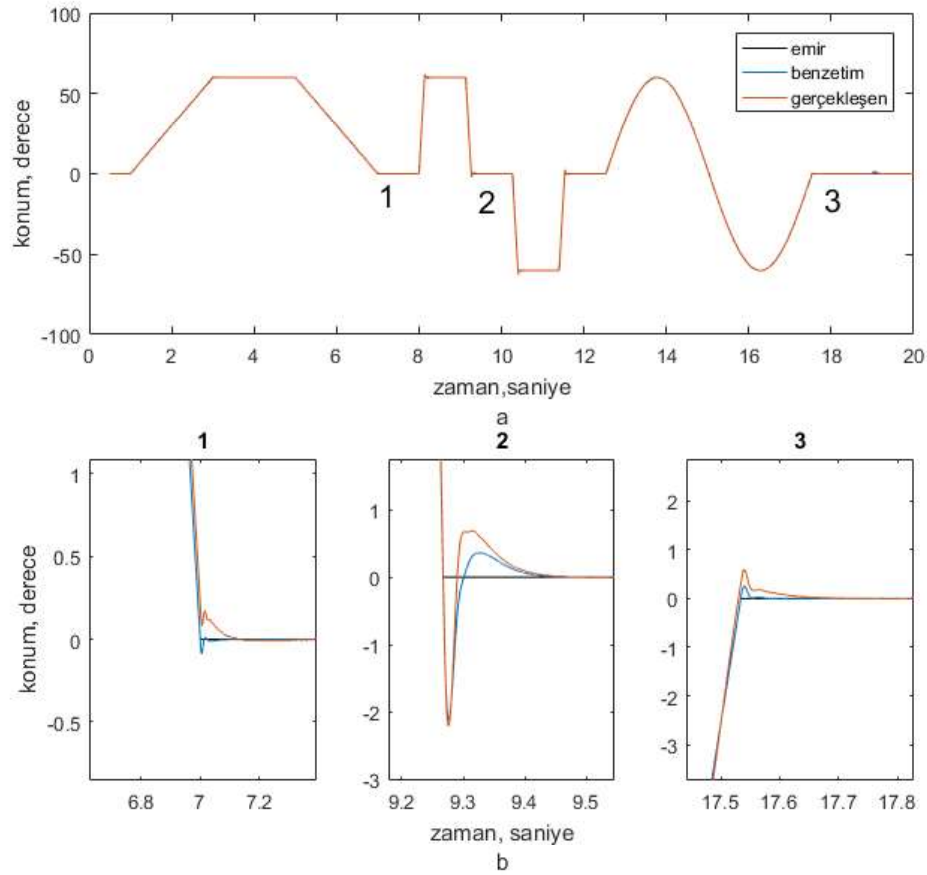
Modellemeye ek olarak, tasarımı nihai konfigürasyona, gerçek hayatta test edip benzetim ortamı ile tutarlı sonuçlar alındığı ve gerçek sistemde isterileri karşıladığı da doğrulanmalıdır. Bu isteri yerine getirmek için, MATLAB® Simulink Real Time® aracılığı ile, stabilize platform ve geliştirilen & optimize edilen kontrol sistemi döngüde donanım test sisteminde test edilmektedir. Döngüde donanım testinin icrası için, motor sürücüleri, ölçer okuyan kartlar ve endüstriyel analog/dijital okuma/yazma kartlarını barındıran bir sistem kullanılmaktadır. Simulink® ortamında geliştirilen kontrol sistemi, otomatik olarak C koduna çevrilip derlenmekte, hedef bilgisayara yüklenip, endüstriyel kartlar aracılığı ile gerçek zamanlı olarak stabilize platformu çalıştırmaktadır.

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1 Benzetim Ortamı ile Gerçek Sistemin Karşılaştırılması



Şekil 8.1. Dış eksen için benzetim ve gerçek sonuçların karşılaştırması (a) ve yakınlaştırılmış incelemesi (b)

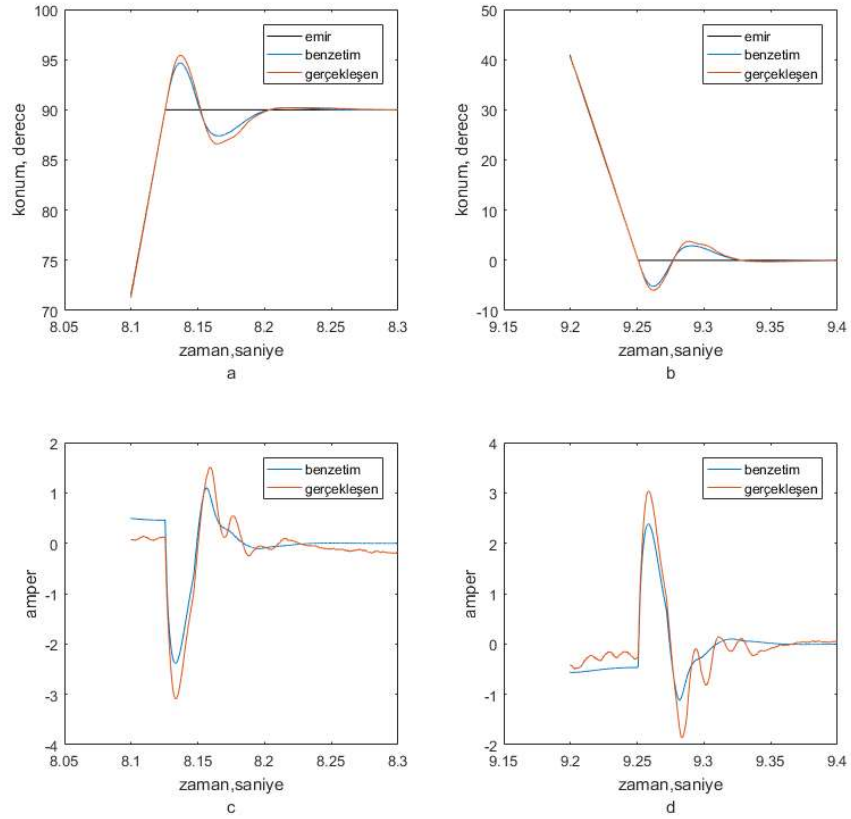


Şekil 8.2. İç eksen için benzetim ve gerçek sonuçların karşılaştırması (a) ve yakınlştırılmış incelemesi (b)

Tasarlanan kayan kipli kontrol sistemi, benzetim modelinde ve gerçek zamanlı döngüde donanım testinde test edilip sonuçları dış ve iç eksenler için sırasıyla Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de gösterilmiştir. Şekil 8.1-a’da, dış eksen için referans profil ve benzetim ve gerçek sistem üzerinden toplanan veriler çizdirilmiştir. Şekil 8.2’de ise aynı şekilde iç eksen için benzetim ve gerçek sistem sonuçları çizdirilmiştir. Görüleceği üzere, bilgisayar üzerindeki benzetim sisteminin ve gerçek sistemin genel profil takibi çok büyük ölçüde tutarlılık göstermektedir.

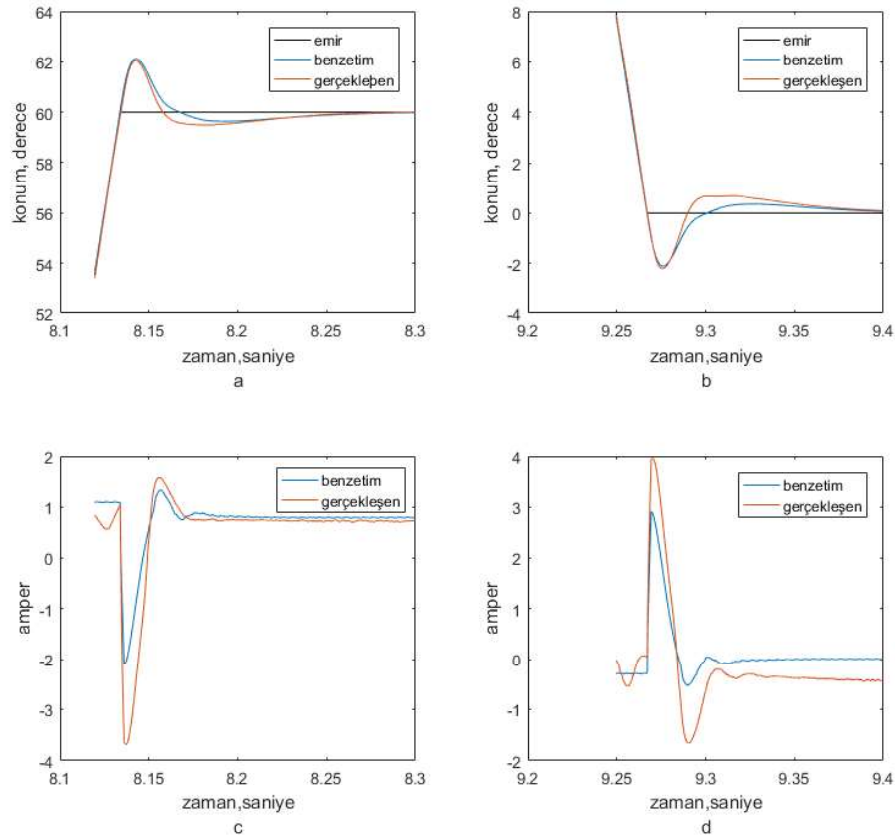
Benzetim ve gerçek sistem performansı daha yakından incelemek için, dış eksen için Şekil 8.3’te iki farklı adım emrinin oturma periyotları gösterilmiştir. Şekil 8.3 a ve b maddelerinde adım emrine karşılık gerçekleşen konumlar, c ve d maddelerinde ise sırasıyla bu adım emirleri esnasında istenilen akım değerleri çizdirilmiştir.

Konum performanslarına bakılırsa, benzetim ve gerçek sistemin yüksek oranda benzerlik taşıdığı gözlemlenmektedir. Akım değerlerinde ise, gerçek sistem için daha salınımlı ve gürültülü bir profil görülmektedir. Analog sinyallerdeki gürültüler ve sistem üzerindeki doğrusal olmayan bileşenler bu farklılığa sebep olarak gösterilebilir. Bu farklılıkların a ve b maddelerinde gösterilen konum performanslarına yansımaması ise kontrol sisteminin gürbüzlüğü ile açıklanabilir.



Şekil 8.3. Dış eksen için benzetim ve gerçek sonuçların yakından incelenmesi

Benzer sonuçlar, iç eksen için de Şekil 8.4'te gözlemlenebilir.



Şekil 8.4. İç eksen için benzetim ve gerçek sonuçların yakından incelenmesi

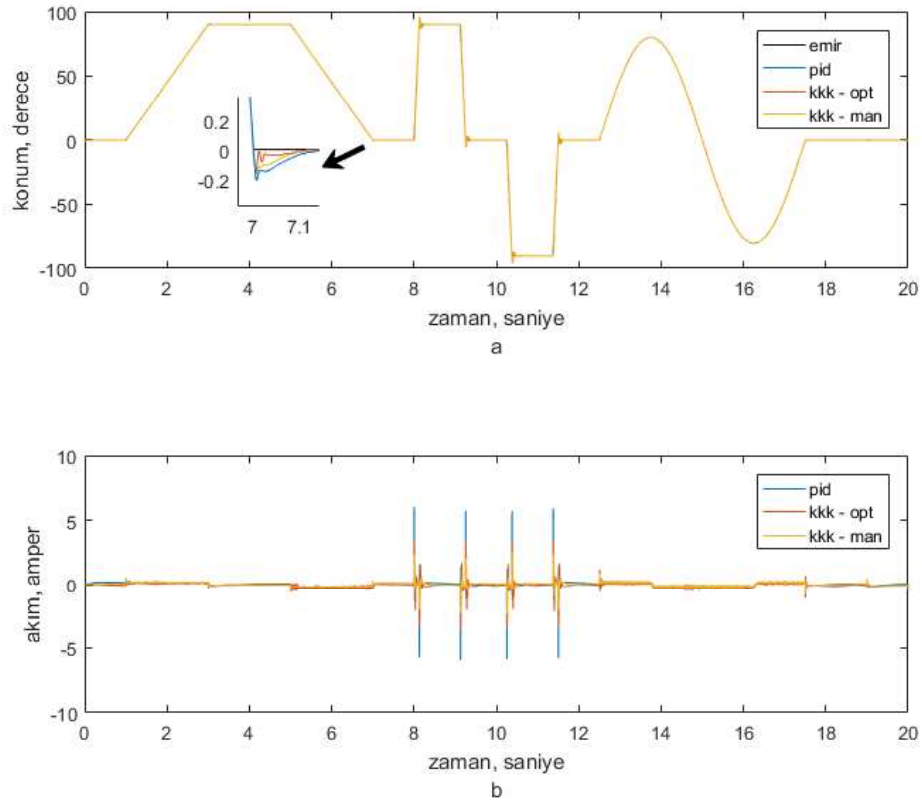
Dış eksene benzer şekilde, iç eksen için de Şekil 8.4'te a ve b maddelerinde iki farklı adım emrine karşı konum çıktıları gösterilmiş, c ve d maddelerinde ise sırasıyla her iki profil için istenilen akım emirleri görselleştirilmiştir. Motor ve sistemdeki modellenemeyen dinamiklerden dolayı konum çıktılarında ufak farklılıklar gözlemlenmekte, yalnız çok büyük ölçüde benzer performanslar alındığı görülmektedir. Akım emirlerinin de benzer şekilde, modellenemeyen etmenlerden dolayı gerçek sistem için bir miktar daha fazla olduğu görülmekte, yalnız genel profilin örtüştüğü gözlemlenmektedir.

Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'teki gösterimler ve ilgili açıklamalar ile, Bölüm 3'te elde edilen sistem parametrelerinin gerçek sistem ile tutarlılığı gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra, benzetim ortamında tasarlanılıp geliştirilen ve sonrasında optimize

edilen kontrol sistemlerinin performansı doğrudan gerçek sistem üzerinde gözlemlenip sonuçları değerlendirilmiştir.

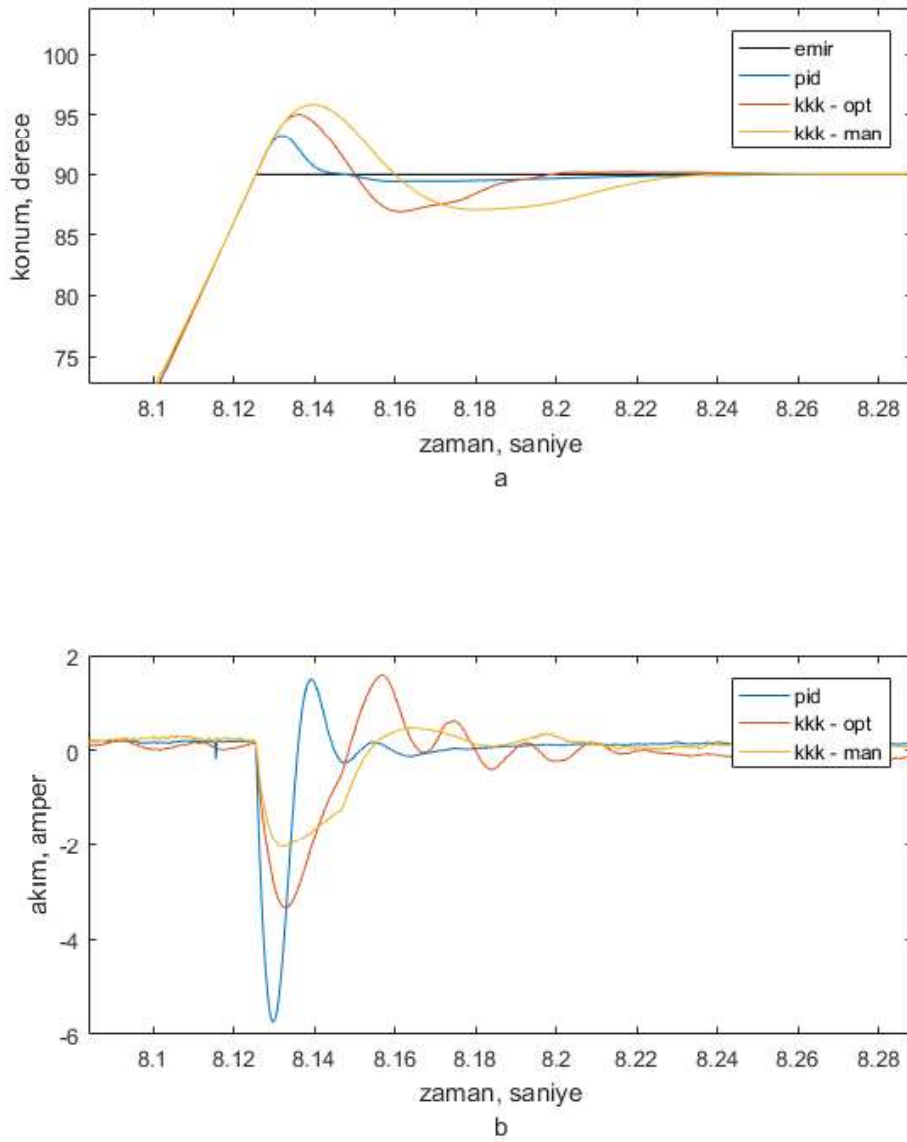
8.2 Tasarlanan Kontrol Sistemlerinin Gerçek Sistem Üzerinde Karşılaştırılması

Gösterimleri çoklamamak adına, benzetim sonuçları her bir kontrol sistemi için ayrıca gösterilmemiştir. Bölüm 8.1’de belirtildiği üzere aynı kontrol sistemi üzerinde benzetim ve gerçek sistem oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Bu bölümde, pid temelli kontrol sistemi, parametreleri manuel olarak bulunan kayan kipli kontrol sistemi (kkk-man) ve optimizasyon sonucu elde edilen kayan kipli kontrol sistemi (kkk-opt) gerçek sistem üzerinde dış ve iç eksenler için karşılaştırılmıştır.



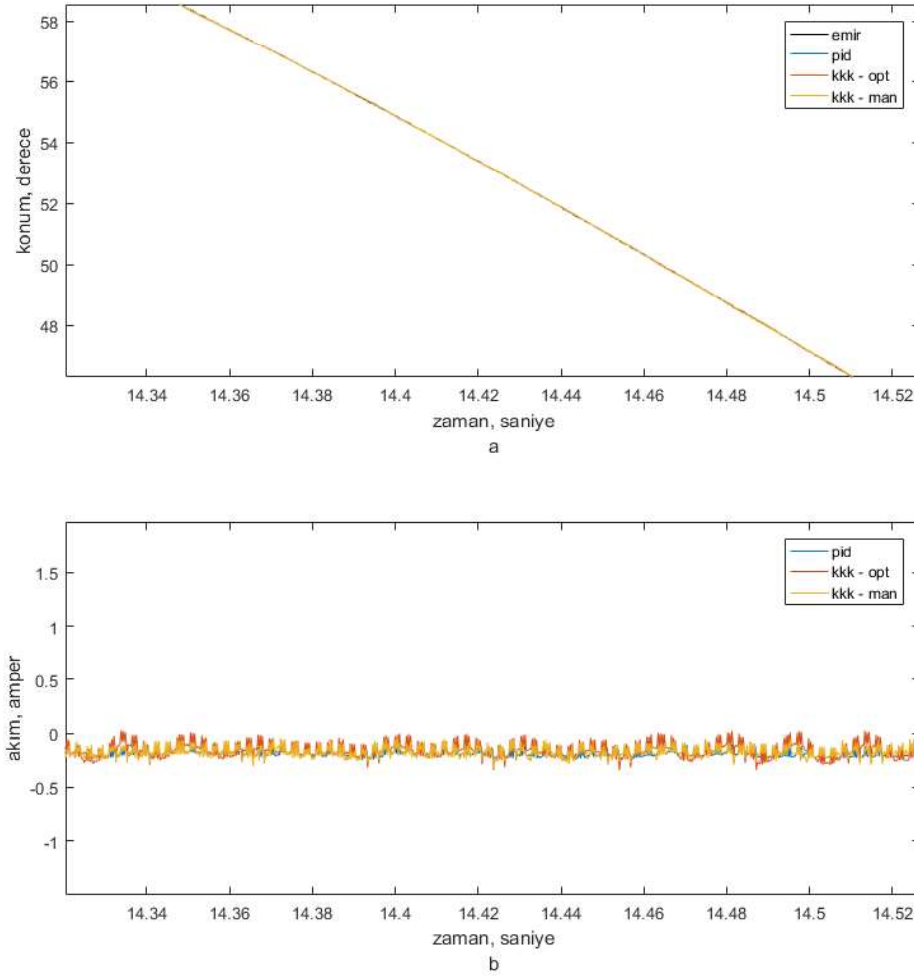
Şekil 8.5. Dış eksen için kontrol sistemlerinin gerçek sistemde konum (a) ve akım (b) performansı

Şekil 8.5'te, dış eksen için tasarlanan PID temelli kontrol sistemi, parametreleri manuel olarak bulunan kayan kipli kontrol sistemi ve optimizasyon sonucu elde edilen kayna kipli kontrol sisteminin performansı a maddesinde, akım isterileri ise b maddesinde gösterilmiştir. Genel resme bakıldığı zaman, her üç kontrol sisteminin de verilen emirleri yerine getirdiği, adım emirlerinde bir miktar aşım olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 8.6. Kontrol sistemlerinin dış eksen adım emri konum (a) ve akım (b) performansı

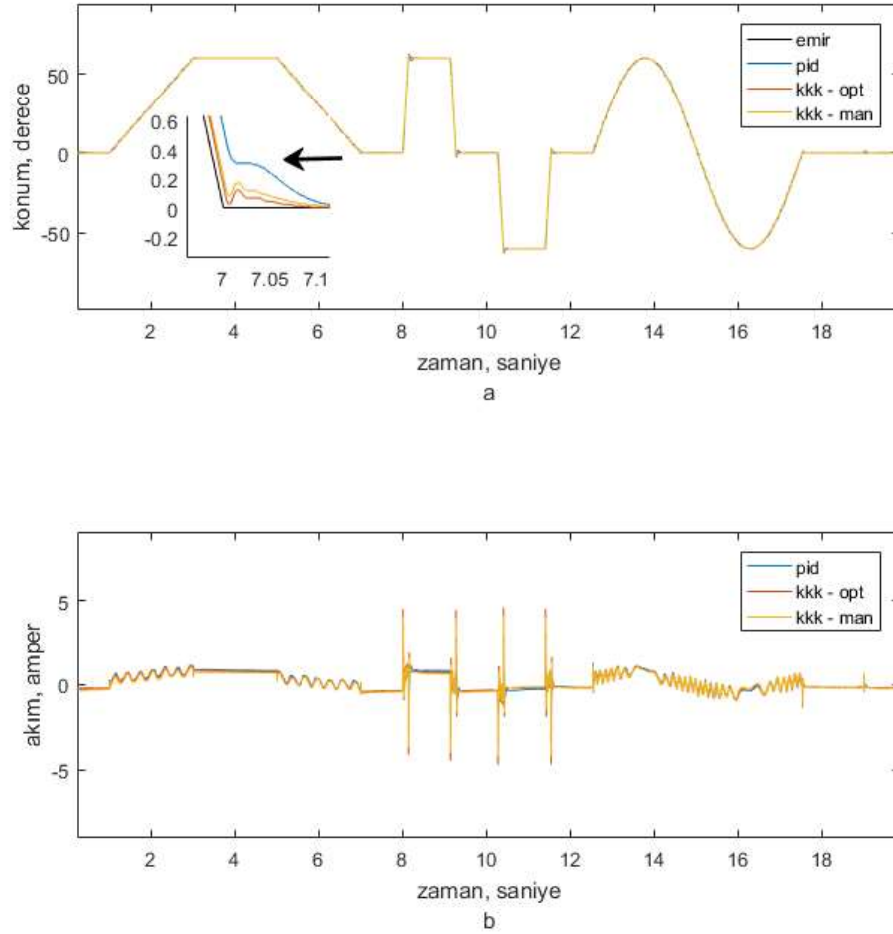
Şekil 8.6 incelenirse, pid temelli kontrol sisteminin adım emir karşısında en az aşım yaptığı, aynı zamanda en fazla akım istediği gözlemlenmektedir. Kayan kipli kontrol sisteminde ise, optimizasyon sonrasında aşımın azalıp aynı zamanda oturma süresinin de kısaldığı görülmektedir.



Şekil 8.7. Kontrol sistemlerinin dış eksen sinüs emri konum (a) ve akım (b) performansı

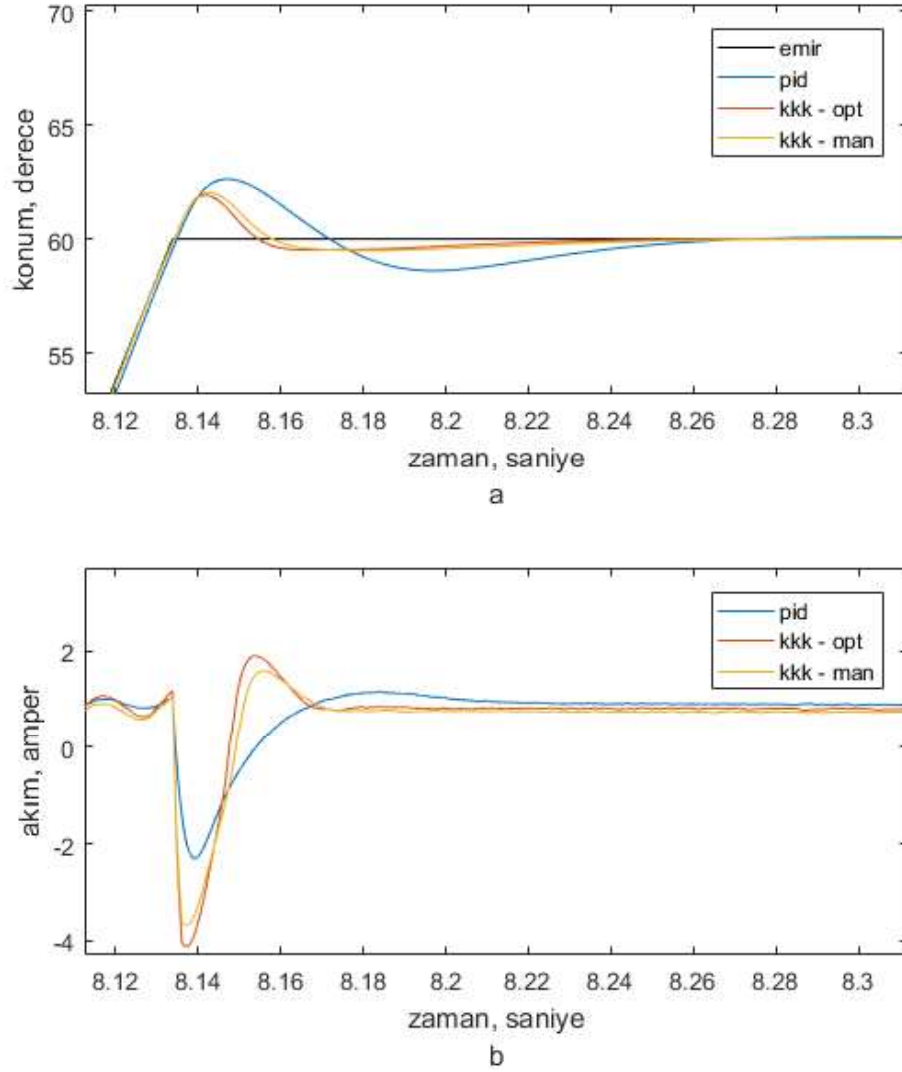
Şekil 8.7’de düşük frekanslı sinüs emrine karşı dış eksen kontrol sistemlerinin performansı görülmektedir. Şekil 8.7-a’da konum verisinde görüleceği üzere her üç kontrol sistemi de sıfıra yakın bir hata ile isteri yerine getirmektedir. Şekil 8.7-b’de

verilen akım isterileri incelenirse, kayan kipli kontrol sisteminin görece daha gürültülü bir akım emri türettiği gözlenebilir.



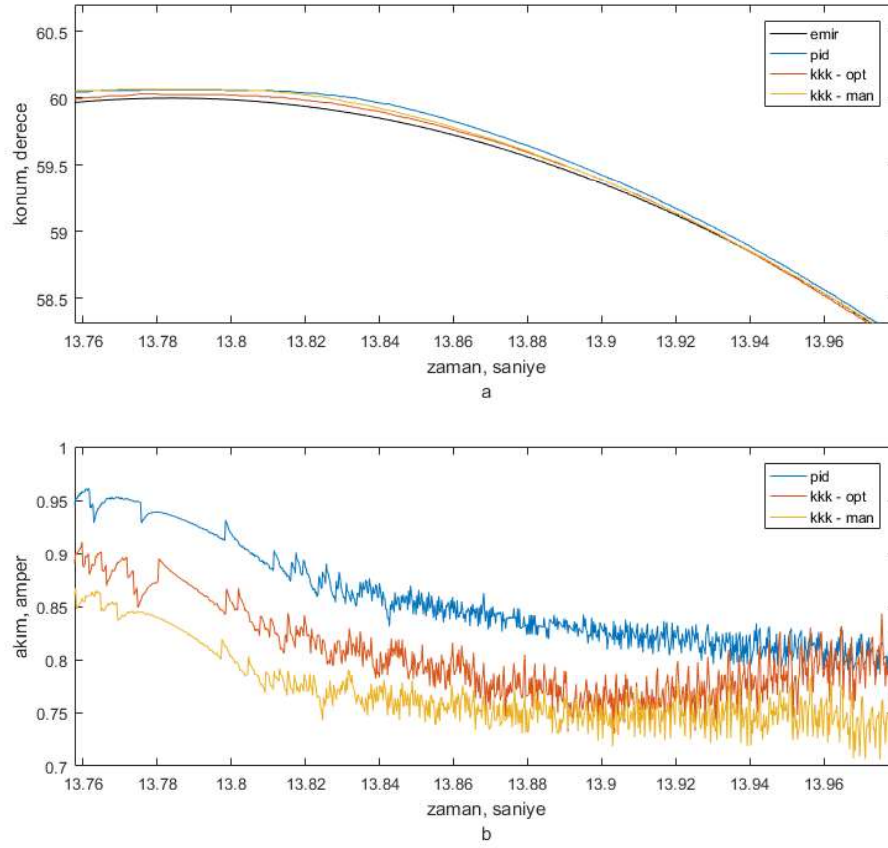
Şekil 8.8. İç eksen için kontrol sistemlerinin gerçek sistemde konum (a) ve akım (b) performansı

Şekil 8.8’de ise iç eksen için konum performansı ve akım isterileri gözlenebilir. Şekil 8.8-a’da görüleceği üzere her üç kontrol sistemi de verilen konum emrini yüksek doğruluk ile takip etmiştir. Şekil 8.8-b’de akım isterilerine bakılırsa, adım emirleri ve emrin türevinin sürekli olmadığı kısımlarda kısa süreli yüksek akım istendiği gözlemlenebilir.



Şekil 8.9. Kontrol sistemlerinin iç eksen adım emri performansı

Şekil 8.9'da iç eksen için adım emri karşısında konum verisi ve akım isteri görülebilir. İç ekseninde, pid temelli kontrol sisteminin hem fazla aşım yaptığı hem de oturma süresinin kayan kipli kontrol sisteminden uzun olduğu gözlemlenmektedir. Kayan kipli kontrol sistemi ise optimizasyon sonucu çok ufak bir iyileşme olmakla birlikte, %4'lük bir aşım ile adım emrini yerine getirmektedir.



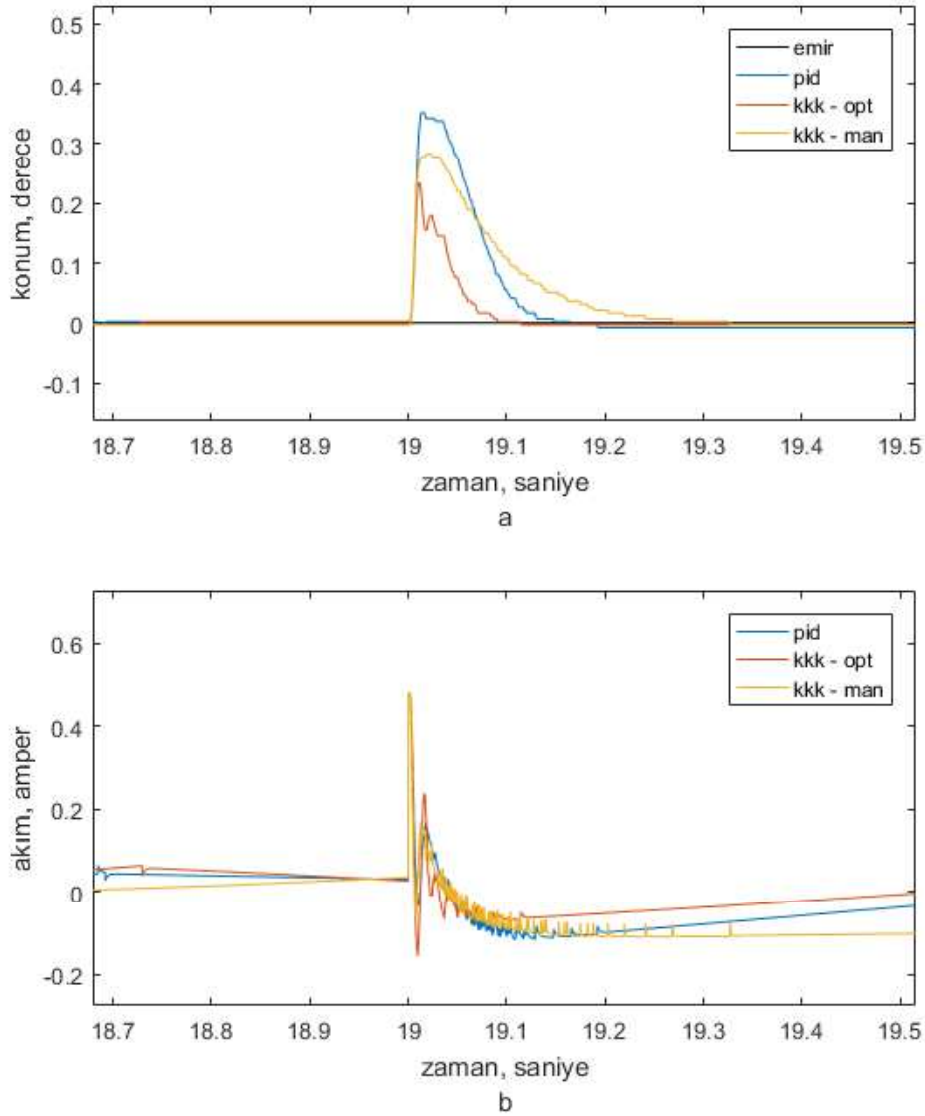
Şekil 8.10. Kontrol sistemlerinin iç eksen sinüs emri performansı

Şekil 8.10'da ise iç eksenin sinüs emrine karşı takibi gösterilmiştir. Motordaki doğrusal olmayan vuruntu momenti etkisinden dolayı konum takibinde küçük hataların bulunduğu gözlemlenebilir. Yalnız bu hatalar optimizasyon sonucu elde edilen kayan kipli kontrol sisteminde en az mertebede bulunmaktadır. Akım isterileri ise her üç kontrol sistemi için de birbirine yakın mertebelere sahiptir.

8.3 Bozucu Giriş Altındaki Performanslar

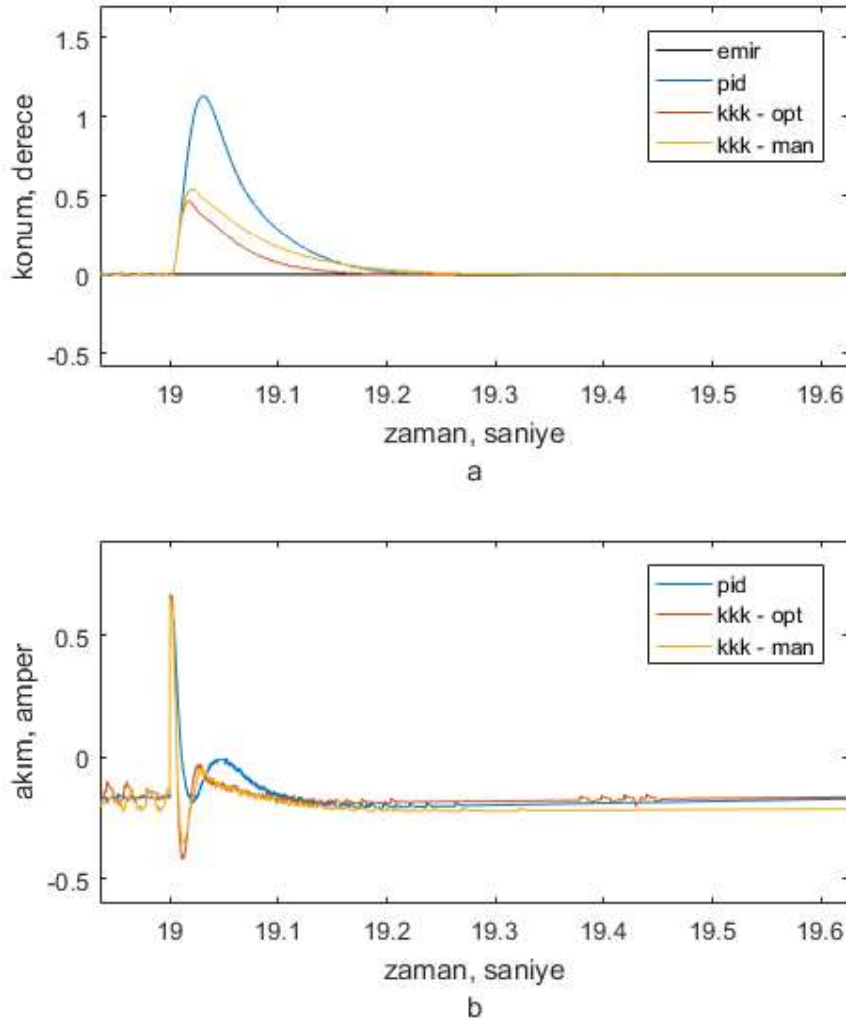
Bozucu giriş performanslarını gözlemlemek için, kontrol sistemlerinin akım çıkışına belirli sürelerde bozucu akım girişi adım emri olarak eklenmiş, kapalı çevrim

sistemin de bu hatayı telafi etmesi beklenmiştir. Dış eksen için bozucu giriş altındaki performans Şekil 8.11’de gözlemlenebilir.



Şekil 8.11. Dış eksen için kontrol sistemlerinin bozucu giriş altında konum (a) ve akım (b) performansı

Şekil 8.11– a’da görüleceği üzere pid temelli kontrol sistemi en yüksek miktarda savrulmuştur. Oturma süresi en uzun olan ise parametreleri el ile seçilmiş kayan kipli kontrol sistemidir. Optimizasyon sonucu elde edilen kontrol sistemi ise hem en az miktarda savrulmuş hem de en hızlı oturma süresine sahip kontrol sistemi olmuştur.



Şekil 8.12. İç eksen için kontrol sistemlerinin bozucu giriş altında konum (a) ve akım (b) performansı

Şekil 8.12’de ise iç eksen bozucu giriş performansı gösterilmiştir. Pid temelli kontrol sistemi hem en fazla sivrulmuş hem de en uzun oturma süresine sahip olduğu gözlenmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen kontrol sistemi ise hem sivrulma hem de oturma süresi olarak en iyi performansı veren kontrol sistemi olmuştur.

8.4 Değerlendirme

Her iki eksen için de 3'er adet kontrol sistemi aynı şartlar altında çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu testlerin sonunda, sonuçlar kısmında yapılan analizler dış eksen için Çizelge 8.1'de, iç eksen için ise Çizelge 8.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 8.1. Dış eksen için kontrol sistemleri değerlendirmesi

	PID	KKK-man	KKK-opt
Aşım yüzdesi	3.61	6.44	5.55
Oturma süresi (mili saniye)	16	60	89
Bozucu giriş altında savrulma (derece)	0.35	0.27	0.23
Bozucu giriş altında oturma süresi (mili saniye)	148	220	90
Bant Genişliği	19	17	18

Çizelge 8.2. İç eksen için kontrol sistemleri değerlendirmesi

	PID	KKK-man	KKK-opt
Aşım yüzdesi	4.33	3.41	3.2
Oturma süresi (mili saniye)	121	96	79
Bozucu giriş altında savrulma (derece)	1.13	0.54	0.47
Bozucu giriş altında oturma süresi (mili saniye)	220	240	175
Bant Genişliği	11	16	17

Dış eksen için, Çizelge 8.1'de görüleceği gibi, pid temelli kontrol sistemi adım emrinde gerek aşım gerek oturma süresi bakımından kayan kipli kontrol sistemine göre üstün performans sergilemiş, düşük frekanslı emirlerde de çok küçük hatalar ile emri yerine getirmiştir. Yalnız bozucu giriş altında optimizasyon sonucu elde edilen kayan

kipli kontrol sistemi en iyi sonucu vermiştir. Bant genişliği en yüksek olan kontrol sistemi pid temelli kontrol sistemi olmuştur.

İç eksen için ise, pid temelli kontrol sistemi, kayan kipli kontrol sistemi karşısında oldukça zayıf kalmıştır. Bunun sebebi, modellenmeyen doğrusal olmayan fenomenlerin iç ekseninde daha fazla görülmesi, bilinmeyen bu etkenler karşısında da kayan kipli kontrol sisteminin gürbüzlüğü sayesinde bu fenomenlere karşı baskın gelerek kapalı çevrim performansını başarılı bir seviyede tutmasına bağlıdır. Optimize edilen kayan kipli kontrol sistemi en yüksek bant genişliğine sahiptir.

İç ve dış eksenler birlikte değerlendirilirse, belirlenen kriterler ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen kayan kipli kontrol sisteminin iki ekseninde de oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenebilir. Bu iki eksenindeki benzetim ve gerçek sistem uyumluluğu ve performansından yola çıkılırsa, yeni bir sistemde tasarım kriterleri belirlendikten sonra, manuel bir efor gerektirmeden otonom bir şekilde optimizasyon ile gürbüz yapıda bir kayan kipli kontrol sistemi elde edilebileceği gösterilmiştir.

9. KAPANIŞ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, iki eksenli bir stabilize platformun kontrol sistem kurgusu ele alınmıştır. Öncelikle, stabilize platformun matematiksel modeli ve bu modelin parametreleri sistem tanımlama metodolojisi ile elde edilmiştir. Ardından pid temelli ve kayan kipli kontrol olmak üzere iki farklı kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen kayan kipli kontrol sisteminde optimum kazançları bulmak için, genetik algoritma ile optimizasyon altyapısı kurulmuş, bir ceza fonksiyonu, kriterleri ve katsayıları tasarlanmıştır. Ardından, her iki eksen için de tasarlanan kontrol sistemleri bu optimizasyon ile en iyileştirilmiş ve kurgulanan ceza fonksiyonuna göre en başarılı sonucu alan kazançlar elde edilmiştir. Sonraki aşamada, tasarlanan ve optimize edilen kontrol sistemleri benzetim ortamında ve gerçek sistem üzerinde test edilmiştir. Benzetim ve gerçek sistem üzerinde sonuçların çok yüksek bir korelasyonda tutarlı olduğu gösterilmiştir. Son olarak, gerçek sistem üzerinde kontrol sistemlerinin performansı gösterilmiş ve her bir eksen için başarımları analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın devamında, geliştirilebilecek konu başlıklarından bir kısmı aşağıda maddelendirilmiştir;

- Kayma yüzeyindeki tüm kazançların kayma yüzeyi ve hataya göre parametrik yapıp, o anki duruma göre kazanç elde edilmesi
- Genetik algoritmaya ek olarak konveks, sürü parçacık vb. optimizasyon yöntemlerinin de değerlendirilip sonuçlarının karşılaştırılması
- Bölgesel olarak daha iyi sonuç veren alternatif kontrol sistemlerinin sonuçlarının optimizasyon algoritmasına beslenip, kayan kipli kontrol sisteminin buna yakınsamasının sağlanması
- Doğrusal olmayan fenomenlerin de modellenip, optimizasyon sonucunun benzetim ortamından daha çok gerçek sistemin marjinal faydasını artıracak şekilde değişiminin sağlanması

KAYNAKLAR

- Abbasi, S. J., Kallu, K. D. and Lee, M. C., 2019, Efficient Control of Non-Linear System Using a Modified Sliding Mode Control, *Asian Control Conference*, 1248-1252.
- Anonymous, 1999, Selection of Electric Motors for Aerospace Applications, 5, *NASA – Preferred Reliability Practicecs*, PD-ED-1229., 1-6.
- Anonymous, 2019, Gimbaled Trust [online], NASA, <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/gimbaled.html>, [Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2020].
- Araki, M., 2009, PID Control, *Control Systems, Robotics, And Automation*, 2, 1-23.
- Doğan, H., 2019, Stirling Soğutuculu ve İki Serbestlik Dereceli Bir Kardan Mekanizmasının Gürbüz Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 35-160.
- Edwards, C., Fossas, E. and Fridman, L., 2006, Advances in Variable Structure and Sliding Mode Control, *Springer Verlag*, 107-121.
- Eker, İ. and Akınal, Ş., 2008, Sliding mode control with integral augmented sliding surface: Design and experimental application to an electromechanical system, *Electrical Engineering*, 90, 189-197.
- Garkushenko, V. and Lazareva, P., 2019, Stabilization System for the Camera Optical Axis in a Gimbal on a Moving Platform, *Russian Aeronautics*, 62, 722-728.
- Hazzab, A., Bousserhane, I. K. and Kamli, M., 2004, Design of a Fuzzy Sliding Mode Controller by Genetic Algorithms for Induction Machine Speed Control, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 1, 1-17.
- Hilkert, J. M., 2008, Inertially stabilized platform technology Concepts and principles, *Control Systems, IEEE*, 28, 26-46.
- Ioannides, C., Barrett, G. and Eder, K., 2010, Feedback-Based Coverage Directed Test Generation: An Industrial Evaluation, *Hardware and Software: Verification and Testing*, Berlin, Heidelberg, 112-128.
- Khalil, H. K., 2010, Nonlinear Systems, *Macmillan Publishing Company*, 111-132.
- Khater, M., 2007, Robust Chatter-Free Sliding Mode Observer of Sensorless Induction Motor Drives, *Engineering Research Journal (ERJ)*, 30, 9-15.
- Köse, E., Abaci, K., Kizmaz, H., Aksoy, S. and Yalcin, M. A., 2013, Sliding Mode Control Based on Genetic Algorithm for WSCC Systems Include of SVC, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 19, 19-24.
- Masten, M. K., 2008, Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems, *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, 47-64.
- Moin, N. H., Zinober, A. S. I. and Harley, P. J., 1995, Sliding mode control design using genetic algorithms, *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, UK, 238-244.

- Ogata, K., 2009, Modern Control Engineering, *Pearson Education*, 751-767.
- Özakalın, M. U., Salıncı, M. and Özkan, B., 2011, Sabit ve Değişken Kayma Yüzeyli Kayan Kipli Denetim Yönteminin Hidrolik Eyletimli Bir Kanat Yükleme Cihazına Deneysel Olarak Uygulanması, *Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı*, Gebze.
- Poyrazoğlu, E., 2017, Detailed Modeling and Control of a 2-DOF Gimbal System, Yüksek Lisans Tezi, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20-82.
- Rajesh, R. J. and Kavitha, P., 2015, Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms, *International Conference on Computer, Communication and Control*, Indore, 1-6.
- Rhif, A., 2012, A High Order Sliding Mode Control with PID Sliding Surface: Simulation on a Torpedo, *International Journal of Information Technology, Control and Automation*, 2, 145-158.
- Sangveraphunsiri, V., 2010, Control of Inertial Stabilization Systems Using Robust Inverse Dynamics Control and Sliding Mode Control, *International Conference on Automotive Engineering*, 1-11.
- Sarton, G., 1959, Hellenistic Science and Culture in the Last Three Centuries B.C, *Cambridge: Harvard University Press*, 349-350.
- Sener, I. E., 2015, Stabilization of an Image Based Tracking System, Yüksek Lisans Tezi, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-80.
- Slotine, J. J. E. and Li, W., 1991, Applied nonlinear control, *Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall*, 10-20.
- Smith, B., Schrenk, W., Gass, W. and Shtessel, Y., 1999, Sliding mode control in a two-axis gimbal system, *IEEE Aerospace Conference*, 457-470.
- Sofla, M. S., Parsa, M. and Golshanian, H., 2015, Stabilizing a camera mount using MEMS gyroscope and accelerometer, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38, 1345-1352.
- Soule, J., 2018, How a Gimbal Works [online], DJI, <https://store.dji.com/guides/camera-gimbal-stabilizer/>, [Ziyaret Tarihi: 10.05.2020].
- Utkin, V., 1977, Variable structure systems with sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22, 212-222.
- Utkin, V., 1993, Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives. IEEE Trans. Ind. Electr. 40, 23-36, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40, 23-36.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : M. Talha KORKMAZ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 1992
Telefon : 312 590 90 00
Faks : -
e-mail : talha.korkmaz@tubitak.gov.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Meram Fen Lisesi, Konya	2010
Üniversite	: Boğaziçi Üniversitesi Makine Mühendisliği, İstanbul	2015
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği, Konya	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016 - Güncel	TÜBİTAK SAGE – Optik Tasarım Birimi	Araştırmacı – Mühendis

UZMANLIK ALANI

Veri bilimi, uygulamalı makine öğrenmesi, kontrol sistemleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

<i>Yayın ismi</i>	<i>Yayın Yeri</i>	<i>Yayın Tarihi</i>
<i>Kardan Platformu için Kayan Kipli Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması</i>	Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı	2017
<i>Stabilize Kamera Platformu için PID ve Kayan Kipli Kontrol Sistemi Tasarımı ve Karşılaştırması</i>	GTRD	2020