

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

BARİYER LYAPUNOV FONKSİYON TABANLI KISITLI
GERİADIMLAMA KONTROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARUK DEMİRKİRAN

DENİZLİ, 2015

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI



BARİYER LYAPUNOV FONKSİYON TABANLI KISITLI
GERİADIMLAMA KONTROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARUK DEMİRKİRAN

DENİZLİ, 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Faruk Demirkıran tarafından hazırlanan “Bariyer Lyapunov Fonksiyon Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 26.05.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

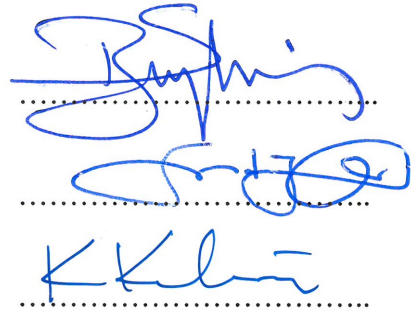
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Selami BEYHAN

Üye
Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ

Üye
Doç. Dr. Kadir KAVAKLIOĞLU



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
03/06/2015 tarih ve ...20/17... sayılı kararıyla onaylanmıştır..



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tez alışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) tarafından BAP 2014FBE063 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Faruk DEMİRKIRAN



ÖZET

**BARİYER LYAPUNOV FONKSİYON TABANLI KISITLI
GERİADIMLAMA KONTROL
YÜKSEK LISANS TEZİ
FARUK DEMİRKIRAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. SELAMİ BEYHAN)**

DENİZLİ, MAYIS - 2015

Tez çalışmasında, doğrusal olmayan sistemlerin kısıtlı geriadımlama kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kısıtlı geriadımlama kontrolün amacı, referans değişimindeki büyük olan izleme hatasını küçültmek ve hızlandırmak olup, bu doğrultuda istenilen sonuçlar elde edilmiştir. İlk olarak literatürde tanıtılan; bariyer Lyapunov fonksiyon (BLF) tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol, karesel Lyapunov fonksiyon (QLF) tabanlı geriadımlama kontrol ve BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol metotları; ilk defa hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak tek-giriş tek-çıkış (SISO) kararsız top-kiriş sistemine uygulanmıştır. İkinci olarak literatürde yer almayan ve bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kısıtlı geriadımlama kontrol metotları çok-giriş çok-çıkış (MIMO) iki-rotorlu helikopter sistemine uyarlanmıştır ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Tez çalışmasında elde edilen izleme sonuçları, mutlak hataların toplamı performansı ve izleme hatalarının şekilleri ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: bariyer Lyapunov fonksiyon tabanlı kısıtlı kontrol, geriadımlama kontrol, kısıtlı geriadımlama kontrol, üç aşama anahtarlama kontrol, top-kiriş sistemi, iki-rotorlu helikopter sistemi.

ABSTRACT

BARRIER LYAPUNOV FUNCTION BASED CONSTRAINED BACKSTEPPING CONTROL

MSC THESIS

FARUK DEMİRKİRAN

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR:YRD. DOÇ. DR. SELAMİ BEYHAN)**

DENİZLİ, MAY - 2015

In this thesis, studies were made on the constrained backstepping control of nonlinear systems. The purpose on the constrained backstepping control which is great in reference changes to reduce the tracking error and speed up, accordingly desired results were obtained. Firstly introduced in the literature; barrier Lyapunov function (BLF) based constrained backstepping control, quadratic Lyapunov function (QLF) based backstepping control and BLF based three stage switching controlled constrained backstepping control methods; the first time in the literature is applied to single input-single output (SISO) unstable ball-beam system in simulation and in real time. Secondly, the constrained control methods which are not included in the literature as a method performed within this thesis are adapted to multi input-multi output (MIMO) twin-rotor helicopter system and simulation results were obtained. The tracking results obtained in the thesis are compared the sum of absolute error performance and with the shapes of the tracking error.

KEYWORDS: barrier Lyapunov function based constrained control, backstepping control, constrained backstepping control, three stage switching control, ball-beam system, twin-rotor helicopter system.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KISITLI GERİADIMLAMA KONTROL.....	3
2.1 Kontrol Sistemlerinde Kısıt Gereksinimi	4
2.2 Geriadımlama Kontrol.....	5
2.2.1 Problem Tanımı	6
2.2.2 Geriadımlama Kontrol Algoritması	6
2.2.3 Geriadımlama Kontrol Kararlılık Analizi.....	7
2.3 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol	9
2.3.1 Problem Tanımı	10
2.3.2 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol Algoritması	11
2.3.3 Bariyer Lyapunov Fonksiyonu ile Kararlılık Analizi.....	12
2.4 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrol.....	14
2.4.1 Problem Tanımı	14
2.4.2 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrol Algoritması	15
2.4.3 Karesel Lyapunov Fonskiyonu ile Kararlılık Analizi.....	16
2.5 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahatarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol.....	16
2.5.1 Problem Tanımı	17
2.5.2 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol Algoritması.....	18
2.5.2.1 Birinci Aşama Kontrol Algoritması.....	18
2.5.2.2 İkinci Aşama Kontrol Algoritması.....	21
2.5.2.3 Üçüncü Aşama Kontrol Algoritması.....	23
3. DENEYSEL SİSTEMLER	24
3.1 Top-Kiriş Sistemi	24
3.2 İki-Rotorlu Helikopter Sistemi	26
4. KISITLI GERİADIMLAMA KONTROL UYGULAMA SONUÇLARI.....	35
4.1 Top-Kiriş Sistemi Kontrolü.....	35
4.1.1 Top-Kiriş Sistemi Benzetim Sonuçları	35
4.1.1.1 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması.....	35
4.1.1.2 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması	42

4.1.1.3	BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması	50
4.1.2	Top-Kiriş Sistemi için Gerçek Zamanlı Sonuçlar.....	54
4.1.2.1	BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması.....	54
4.1.2.2	BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması	57
4.2	İki-Rotorlu Helikopter Sistemi Kontrolü Benzetim Sonuçları	61
4.2.1	BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması	61
4.2.2	QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması	66
4.2.3	BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması.....	71
5.	UYGULAMA SONUÇLARI PERFORMANS ANALİZİ.....	78
5.1	Benzetim Ortamında Top-Kiriş Sistemine Uygulanılan Kısıtlı Geriadımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi.....	78
5.2	Gerçek Zamanlı Top-Kiriş Sistemine Uygulanılan Kısıtlı Geriadımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi.....	80
5.3	Benzetim Ortamında İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanılan Lyapunov Fonksiyon Tabanlı Geriadımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi	81
6.	SONUÇ.....	85
7.	KAYNAKLAR.....	86
8.	ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Bariyer Lyapunov fonksiyonunun karakteristik eğrisi	9
Şekil 3.1: Top-kiriş sistemi	24
Şekil 3.2: İki-rotorlu helikopter sistemi	27
Şekil 3.3: İki-rotorlu helikopter sisteminin mekanik-elektriki modeli.....	28
Şekil 4.1: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)	36
Şekil 4.2: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF).....	36
Şekil 4.3: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	36
Şekil 4.4: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	37
Şekil 4.5: Kontrol sinyali (BLF)	37
Şekil 4.6: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)	38
Şekil 4.7: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF).....	38
Şekil 4.8: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	39
Şekil 4.9: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	39
Şekil 4.10: Kontrol sinyali (BLF)	39
Şekil 4.11: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)	40
Şekil 4.12: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF).....	41
Şekil 4.13: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	41
Şekil 4.14: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	41
Şekil 4.15: Kontrol sinyali (BLF)	42
Şekil 4.16: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	43
Şekil 4.17: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	43
Şekil 4.18: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)	44
Şekil 4.19: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF).....	44
Şekil 4.20: Kontrol sinyali (QLF)	44
Şekil 4.21: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	45
Şekil 4.22: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	46
Şekil 4.23: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)	46
Şekil 4.24: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF).....	46
Şekil 4.25: Kontrol sinyali (QLF)	47
Şekil 4.26: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	48
Şekil 4.27: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	48
Şekil 4.28: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)	48
Şekil 4.29: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF).....	49
Şekil 4.30: Kontrol sinyali (QLF)	49
Şekil 4.31: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)	50
Şekil 4.32: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF).....	51
Şekil 4.33: Kontrol sinyali (TSBLF).....	51
Şekil 4.34: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF).....	52
Şekil 4.35: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF).....	52
Şekil 4.36: Kontrol sinyali (TSBLF).....	53
Şekil 4.37: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı BLF)	54
Şekil 4.38: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı BLF) .	55
Şekil 4.39: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı BLF)	55

Şekil 4.40: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı BLF)	56
Şekil 4.41: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı BLF)	56
Şekil 4.42: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı BLF)	57
Şekil 4.43: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı TSBLF).....	58
Şekil 4.44: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı TSBLF).....	58
Şekil 4.45: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı TSBLF)	59
Şekil 4.46: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı TSBLF).....	60
Şekil 4.47: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı TSBLF).....	60
Şekil 4.48: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı TSBLF)	60
Şekil 4.49: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)	62
Şekil 4.50: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF).....	62
Şekil 4.51: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	63
Şekil 4.52: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	63
Şekil 4.53: Kontrol sinyalleri (BLF)	63
Şekil 4.54: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)	64
Şekil 4.55: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF).....	65
Şekil 4.56: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	65
Şekil 4.57: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)	65
Şekil 4.58: Kontrol sinyalleri (BLF)	66
Şekil 4.59: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)	67
Şekil 4.60: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	67
Şekil 4.61: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)	68
Şekil 4.62: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF).....	68
Şekil 4.63: Kontrol sinyalleri (QLF).....	68
Şekil 4.64: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)	69
Şekil 4.65: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF).....	70
Şekil 4.66: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)	70
Şekil 4.67: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF).....	70
Şekil 4.68: Kontrol sinyalleri (QLF).....	71
Şekil 4.69: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF).....	72
Şekil 4.70: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)	72
Şekil 4.71: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF).....	73
Şekil 4.72: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)	73
Şekil 4.73: Kontrol sinyalleri (TSBLF)	73
Şekil 4.74: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF).....	75
Şekil 4.75: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)	75
Şekil 4.76: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF).....	75
Şekil 4.77: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)	76
Şekil 4.78: Kontrol sinyalleri (TSBLF)	76

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Top-kiriş sisteminin parametreleri.....	25
Tablo 3.2: İki-rotorlu helikopter sisteminin parametreleri.....	30
Tablo 5.1: Top-kiriş sistemine 0.07 referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı.....	78
Tablo 5.2: Top-kiriş Sistemine 0 referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı.....	79
Tablo 5.3: Top-kiriş sistemine 0.07 referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı.....	80
Tablo 5.4: Top-kiriş sistemine 0 referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı.....	81
Tablo 5.5: İki-rotorlu helikopter sistemine [0.07;0.01] referans değerinde uygulanan kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı..	82
Tablo 5.6: İki-rotorlu helikopter sistemine [0;0] referans değerinde uygulanan kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı..	83

SEMBOL LİSTESİ

x_n	:	Sistemin n. durum değişkeni
z_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin izleme hatası
α_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin denge fonksiyonu
V_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin Lyapunov fonksiyonu
\dot{V}_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin Lyapunov fonksiyonunun türevi
u	:	Kontrol sinyali
y	:	Sistem çıkışı
k_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin kontrol parametresi
k_{bn}	:	Sistemin n. durum değişkeninin izleme hatası sınır değeri
b	:	İzleme hatasının sıfıra yakınsaması için gerekli bir pozitif kısıt parametresi
\bar{z}_n	:	Sistemin n. durum değişkeninin izleme hatası
d	:	İki sınır parametresinden oluşan bir sabit
d_1	:	Birinci sınır sabiti
d_2	:	İkinci sınır sabiti
L_1	:	Kararlı durum kazancı
τ	:	Zaman sabiti
L_{beam}	:	Kirişin uzunluğu
m	:	Topun ağırlığı
J_b	:	Topun momenti
R	:	Topun yarıçapı
g	:	Yerçekimi ivmesi
r_{arm}	:	Motor ile dişli vidasının mesafesi
I_1	:	Dikey ekseninde rotorun eylemsizlik momenti
I_2	:	Yatay ekseninde rotorun eylemsizlik momenti
a_1	:	Statik karakteristik parametresi
b_1	:	Statik karakteristik parametresi
a_2	:	Statik karakteristik parametresi
b_2	:	Statik karakteristik parametresi
M_g	:	Yerçekimi ivmesi
$B_{1\psi}$:	Sürtünme kuvveti ivmesi
$B_{1\psi}$:	Sürtünme kuvveti ivmesi
$B_{1\phi}$:	Sürtünme kuvveti ivmesi
$B_{2\phi}$:	Sürtünme kuvveti ivmesi
K_{gy}	:	Jiroskopik ivme parametresi
k_1	:	Birinci motorun kazancı
k_2	:	İkinci motorun kazancı
T_{11}	:	Birinci motorun payda parametresi
T_{10}	:	Birinci motorun payda parametresi
T_{21}	:	İkinci motorun payda parametresi
T_{20}	:	İkinci motorun payda parametresi
T_p	:	Çarpaz reaksiyon ivme parametresi
T_0	:	Çarpaz reaksiyon ivme parametresi
k_c	:	Çarpaz reaksiyon ivme kazancı

KISALTMALAR LİSTESİ

- SISO** : Tek girişli-tek çıkışlı sistem
MIMO : Çok girişli-çok çıkışlı sistem
BLF : Bariyer Lyapunov fonksiyonu
QLF : Karesel Lyapunov fonksiyonu
TSBLF : Üç aşama anahtarlama bariyer Lyapunov fonksiyonu

ÖNSÖZ

Yüksek lisans dönemimde; bilimsel katkıları ve akademik deneyimleri ile eğitim sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç Dr. Selami BEYHAN'a ve akademik tecrübelerinden faydalandığım Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ'ye en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca koşulsuz bir şekilde her zaman yanımda olan, bana her konuda güvenen ve destek veren aileme bütün kalbimle teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Geriadımlama kontrol yöntemi, literatürde son zamanlarda kaskat sistemlerde en sık uygulanan doğrusal olmayan kontrol yöntemleri arasında yer alır. Bu yöntemin çalışma mantığı, uygulanmış oldukları sistemin her bir durum değişkeninin bir diğer durum değişkenini kararlılaştırması prensibine dayanmaktadır. Bu şekilde tasarlanan bir denetleyici sayesinde her bir durum değişkeninin sırasıyla kararlılığı ve aynı zamanda referans izleme kontrolü gerçekleştirilmektedir. Geriadımlama kontrol yönteminin kararlılık analizi Lyapunov tabanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle geriadımlama kontrol yöntemleri literatürde Lyapunov teoremi esaslı kontrol yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Lyapunov fonksiyonları, temel olarak bir adi diferansiyel denklemin denge noktasının kararlılığını sağlayabilmek için kullanılmakta olan skaler fonksiyonlardır. Sistemlerde kararlılık ve performans analizi gibi işlemlerde kullanılmaktadırlar. Genel olarak bir sistemde kullanılan Lyapunov fonksiyonları uygulanmış oldukları sistemin hem kararlılıklarını hem de üst düzey bir performansta çalışmalarını gerçekleştirmektedir. Lyapunov fonksiyonları; kontrol mühendisliğinde, geriadımlama kontrolünde, uyarlamalı bulanık mantık kontrolünde, kayan-kip kontrol yöntemi ve diğer birçok kontrol yöntemlerinde kararlılığı sağlayabilmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışmasında; standart geriadımlama kontrol yöntemi BLF tabanlı olarak iyileştirilmesi ile kısıtlı denetleyici olarak kullanılması amaçlanmıştır. BLF tabanlı kısıtlı denetleyici sayesinde referans sinyali değişimlerinde oluşan büyük izleme hatalarının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Diğer bir ifadeyle izleme hataları hızlandırılmış ve sınırlandırılmıştır. Tezin bilimsel katkıları şu şekildedir.

- Bilinen BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol, QLF tabanlı geriadımlama kontrol ve BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol; top-kiriş sistemine (SISO) hem gerçek zamanlı hem de benzetim ortamında uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Verilen kontrol metotları iki-rotor helikopter sistemine (MIMO) uyarlanmış ve benzetim ortamında uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır.
- Genel olarak uygulanan kontrol metotlarının kararlılık analizleri verilmiştir.

İkinci bölümde, Lyapunov Fonksiyon tabanlı geriadımleme yöntemleri ile ilgili literatür araştırması, yöntemlerin formülizasyonları ve Lyapunov fonksiyonları ile kararlılık analizleri verilmiştir. Ayrıca kısıtlı kontrol hakkında temel bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, top-kiriş sistemi ve iki-rotorlu helikopter sisteminin literatürdeki önemleri üzerinde durularak, sistemlerin matematiksel modelleriyle birlikte parametreleri tablolar halinde verilmiştir. Ayrıca, literatüre katkı olarak bu tez çalışması kapsamında önerilen; MIMO bir sistemin SISO bir sistem haline dönüştürülmesi işlemi bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrol, QLF tabanlı geriadımleme kontrol ve BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımleme kontrol yöntemlerinin; hem gerçek zamanlı hem de benzetim ortamında top-kiriş sistemine ve sadece benzetim ortamında ise iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu sonuçlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, tez çalışmasında yer alan Lyapunov fonksiyon tabanlı geriadımleme kontrol yöntemlerinin; top-kiriş sistemi ve iki-rotorlu helikopter sistemleri üzerinde uygulanması ile elde edilen performans sonuçları hakkında detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Sonuç bölümünde ise tez çalışmasının uygulama sonuçlarını yorumlayan detaylı bir analiz ve değerlendirme kısmı yer almaktadır.

2. KISITLI GERİADIMLAMA KONTROL

Lyapunov fonksiyonu kullanılarak tasarlanan kontrol yöntemleri, “Lyapunov teoremi esaslı kontrol yöntemleri” olarak adlandırılabilir. Bu yöntemlerden biri de geriadımlama kontrol yöntemidir. Geriadımlama kontrol, kontrol teorisinde 1990 yılında Petar V. Kokotovic tarafından önerilen ve birçok araştırmacının da son yıllarda ilgisini çeken bir kontrol yöntemidir. Kaynak (Freeman ve Kokotović 1993), (Bridges ve diğ. 1995) ve (Krstic ve diğ. 1995) çalışmaları geriadımlama yöntemini tam anlamıyla derinlemesine incelemekte ve yöntemin avantajlarını göz önüne koymaktadır. Frazzoli bir çalışmada (Frazzoli ve diğ. 2000), küçük ölçekli bir helikopter sistemi için geriadımlama yöntemini kullanarak bir izleme kontrolü gerçekleştirmiştir. Diğer bir çalışma olan (Olfati ve diğ. 1998), kontrolü gerçekleştirilen top-kiriş sistemini, geriadımlama kontrol yöntemi kullanarak, sistem dinamiklerini bir üçgen yapıya ihtiyaç duymayacak şekilde iki alt sistem halinde kontrol ederek literatüre bir yenilik getirmiştir. Diğer bir çalışma olan (Jiang ve Nijmeijer 1997), zaman gecikmeli geri beslemeli, iki serbestlik dereceye sahip mobil robot üzerinde, geriadımlama kontrol yöntemi kullanılarak benzetim ortamında izleme kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Geriadımlama kontrolün temelinde her durum değişkeninin bir diğer durum değişkenini kararlılaştırması esasına dayanmaktadır. Bu şekilde yapılan bir denetleyici tasarımı sayesinde her bir durum değişkeninin kararlılığı sağlanmış olmaktadır. Genel mantık, sistemin sahip olduğu tüm durum değişkenlerinin bir zincir gibi birbirine bağlı olacak şekilde bir düzene sahip olmasını gerektirmektedir. Geriadımlama yönteminin bu tasarım gerekliliği nedeniyle istenen kontrol kuralının tanımlanabilmesi için bazı durumlarda sanal durum değişkenleri oluşturulması yoluna da gidilebilmektedir. Bu sayede sistem, kaskat bir sistem haline gelip geriadımlama kontrol yöntemi uygulanabilir hale gelmektedir.

Kontrol teorisinde, Lyapunov fonksiyonları bir adi diferansiyel denklemin denge noktasının kararlılığını sağlayabilmek için kullanılmakta olan skaler fonksiyonlardır. Rus matematikçi ‘Aleksandr Mikhailovich Lyapunov’ tarafından önerilen ve önerildiği tarih olan 1982’lerden bu yana; doğrusal olmayan sistem

tasarımları için kararlılık ve performans analizi gibi işlemlerde çok önemli bir noktaya gelmiştir. Kaynak (Pyatnitskiy ve Skorodinskiy 1982), (Blinov 1985), (Stalford 1981), (Komarova ve Leonov 1985), (Veretennikov ve Zaitsev 1984) ve (Kumpati ve James 1968) farklı sistemlerin kararlılıklarının sağlanmasında kullanılan Lyapunov fonksiyonlarını tam anlamıyla derinlemesine incelemektedir. Lyapunov fonksiyonları; kontrol sistemlerinin tasarımı, kararlılığı ve performans analizi gibi işlemlerde güçlü bir araçtır. Lyapunov yapısı, doğrusal olmayan sistemler için pek de kolay bir yapı değildir. Lyapunov fonksiyonları genellikle deneme yanılma prosesidir ve ayrıca fonksiyonlar üzerinde sistematik metodların eksikliği vardır. Lyapunov fonksiyonların farklı seçilmesi, farklı kontrol yapıları ve kontrol performanslarına yol açabilir. Lyapunov fonksiyonları çoğu bağlamda, dinamik geri beslemeli sistemlerde, çıkış geri beslemeli sistemlerde, uyarlamalı kontrol sistemlerinde ve diğer birçok sistemde kararlılığı sağlayabilmek amacıyla kullanılmaktadır.

2.1 Kontrol Sistemlerinde Kısıt Gereksinimi

Endüstriyel sistemlerde otomatik olarak kontrol edilen sistemlerin maliyeti ve dolayısıyla güvenliği ön plana çıkmaktadır. Güvenli çalışmaları bazı durumlarda sistemde kullanılan kontrol metodlarına dayalı olmasından dolayı bu kontrol metodlarının sistemin çalışma sınırlarını dikkate alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Çünkü doğrusal olmayan sistemlerin girişi ve çıkışı üzerinde her zaman fiziksel sınırlar vardır. Bu sınırlar sistemin fiziksel olarak çalışma aralığını belirlemektedir. Bu kısıtların aşılması durumunda sisteme zarar veren kararsızlık durumları, kazalar ve ciddi maddi hasarlar oluşmaktadır. Örnek olarak; robot kollarının belli sınırlar içerisinde çalışması, PH nötralizasyon sürecinde PH değerinin sınırlı olması, nükleer soğutma sistemlerinde kazanın sıcaklık değerinin sınırlı kalması gibi örnekler verilebilir. Bunun yanında, sistem çalışırken ya da kontrol edilirken sistemin çıkışına kısıt koymak fiziksel olarak mümkün değildir. Fiziksel sınır yerine, sistem çıkışı belli değere ulaşması durumunda giriş sinyaline müdahale edilmesi ile sistem çıkışına kısıt koyulmaktadır.

Literatürde, kısıtlı kontrol metotları ile sistemlerin güvenli çalışması sağlanmaktadır. Bu konuda ilk olarak optimal kontrol metodu önerilmiştir. Optimal kontrolde, maliyet fonksiyonu sistemin girişi ve durumları ile oluşturularak optimize edilmekte ve en uygun kontrol sinyali bulunmaktadır. Optimal kontrole benzer olarak model öngörülü kontrol metodu ile yine maliyet fonksiyonu ile giriş ve durumlarına kısıt uygulanmaktadır. Fakat iki yöntemde de maliyet fonksiyonu üzerinden kısıt uygulamak, kontrolün yavaşlamasına neden olabilmektedir. Bunun yanında optimal kontrol metodunun doğrusal olmayan sistemlere uygulanması, doğrusallaştırmadan dolayı süreksizlik gibi durumlardan dolayı tercih edilmemektedir. Model öngörülü kontrolde ise MIMO veya kaskat sistemlere uygulanmasında işlemsel yoğunluk oldukça fazla olup kararlılık gibi temel şartlar tüm sistemler için sağlanamamaktadır.

Son zamanlarda, optimal ve model öngörülü kontroldeki kısıt yaklaşımına alternatif olarak BLF tabanlı kısıtlı kontrol metotları önerilmiştir. Metodun temelinde, sistemin izleme hatası üzerinden kontrol işaretine müdahale edilerek izleme hatasına ve dolayısıyla çıkışa doğal bir kısıt uygulanması vardır. Eğer izleme hatası istenen bir kısıt değerine ulaşırsa bu sınır değer üzerinden giriş sinyali üretilmeye devam edilmekte ve izleme hatasının değeri kısıtlanmakta dolayısıyla sistemin durumları da sınırlandırılmış olmaktadır. İzleme hatasının kısıtlandırılması, doğal olarak sistemin çıkışını da sınırlandırdığı için kararlılık ve güvenlik açısından önem arz etmektedir. Literatürde, BLF tabanlı yaklaşım ilk defa geriadım kontrol yöntemine uyarlanmıştır ve SISO bir sistem üzerinde uygulanmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan kontrol yöntemleri sırasıyla aşağıda formülizasyonları ve kararlılık analizleriyle birlikte açıklanmaktadır.

2.2 Geriadımlama Kontrol

Geriadımlama kontrol, kullanıldığı doğrusal olmayan sistemlerde, her durum değişkeninin bir diğer durum değişkenini kararlılaştırması prensibiyle çalışmaktadır. Bu çalışma mantığıyla kontrolü gerçekleştirilen sistemin her bir durum değişkenin böylece kararlılığı sağlanmış olmaktadır (Ezzabi ve diğ. 2013).

2.2.1 Problem Tanımı

Problem; tek giriş-tek çıkış (SISO), tam geri beslemeli, doğrusal olmayan sistemler için tasarlanmıştır. Bu sistemler, aşağıdaki genel ifade ile gösterilmektedir.

$$\dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad n \geq 2 \quad (2.1)$$

$$\dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u \quad (2.2)$$

Sistem çıkışı ise,

$$y = x_1 \quad (2.3)$$

x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası aşağıda gösterilmiştir.

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.4)$$

\bar{x}_i , durum vektörlerini $[x_1, x_2, \dots, x_i]^T$ ifade etmektedir.

2.2.2 Geriadımlama Kontrol Algoritması

Aşağıda, geriadımlama kontrol yönteminin doğrusal olmayan sistemlere uygulanması için gereken formülizasyonlar adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası,

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.5)$$

Adım 2: Birinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-f_1 - k_1 z_1 + \dot{x}_{1d}) \quad (2.6)$$

Adım 3: İkinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-f_2 - k_2 z_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (2.7)$$

Adım 4: i . durum değişkeninin izleme hatalarının genel ifadesi ise,

$$z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.8)$$

Adım 5: j . durum değişkeninin denge fonksiyonlarının genel ifadesi ise,

$$\alpha_j = \frac{1}{g_j}(-f_j - k_j z_j + \dot{\alpha}_{j-1}), \quad j = 2, \dots, i \quad (2.9)$$

Adım 6: Denge fonksiyonlarının sonuncusu olan kontrol sinyalinin ifadesi ise şu şekildedir,

$$u = \alpha_n = \frac{1}{g_n}(-f_n - k_n z_n + \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.10)$$

2.2.3 Geriadımlama Kontrol Kararlılık Analizi

Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan n . durum değişkeninde yer alan k_n kontrol parametresi, Lyapunov kararlılığın sağlanabilmesi için; $k_n > 0$ olacak şekilde seçilmelidir.

Adım 1: Birinci Lyapunov fonksiyonunun ifadesi,

$$V_1(z_1) = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (2.11)$$

Adım 2: İkinci Lyapunov fonksiyonunun ifadesi,

$$V_2(z_1, z_2) = V_1(z_1) + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (2.12)$$

Adım 3: Üçüncü Lyapunov fonksiyonunun ifadesi,

$$V_3(z_1, z_2, z_3) = V_2(z_1, z_2) + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (2.13)$$

Adım 4: Dördüncü Lyapunov fonksiyonunun ifadesi,

$$V_4(z_1, z_2, z_3, z_4) = V_3(z_1, z_2, z_3) + \frac{1}{2}z_4^2 \quad (2.14)$$

Adım 5: n . durum değişkeninin Lyapunov fonksiyonunun genel ifadesi ise,

$$V_n(z_n) = V_{n-1}(z_{n-1}) + \frac{1}{2}z_n^2 \quad (2.15)$$

Adım 6: Birinci Lyapunov fonksiyonunun türevinin ifadesi,

$$\dot{V}_1(z_1) = z_1\dot{z}_1 \quad (2.16)$$

Adım 7: İkinci Lyapunov fonksiyonunun türevinin ifadesi,

$$\dot{V}_2(z_1, z_2) = \dot{V}_1(z_1) + z_2\dot{z}_2 \quad (2.17)$$

Adım 8: Üçüncü Lyapunov fonksiyonunun türevinin ifadesi,

$$\dot{V}_3(z_1, z_2, z_3) = \dot{V}_2(z_1, z_2) + z_3\dot{z}_3 \quad (2.18)$$

Adım 9: Dördüncü Lyapunov fonksiyonunun türevinin ifadesi,

$$\dot{V}_4(z_1, z_2, z_3, z_4) = \dot{V}_3(z_1, z_2, z_3) + z_4\dot{z}_4 \quad (2.19)$$

Adım 10: n . durum değişkeninin Lyapunov fonksiyonunun türevinin genel ifadesi,

$$\dot{V}_n(z_n) = \dot{V}_{n-1}(z_{n-1}) + z_n\dot{z}_n \quad (2.20)$$

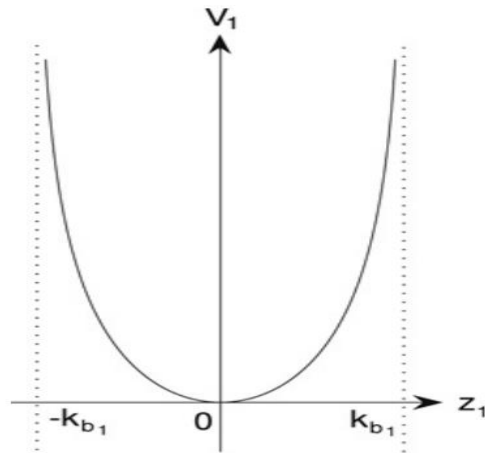
Denklem (2.11), (2.12), (2.13), (2.14) ve genel ifade olarak (2.15)'de görüldüğü gibi geriadımlama kontrolü için Lyapunov fonksiyonu ifadeleri yer almaktadır. Durum değişkenlerinin izleme hatalarının sifıra yakınsaması ve kararlı olabilmeleri için; n . durum değişkeninin Lyapunov fonksiyonu $V_n(z_n) = 0$ olmalıdır.

Denklem (2.16), (2.17), (2.18), (2.19) ve genel ifade olarak (2.20)'de görüldüğü gibi geriadımlama kontrolü için Lyapunov fonksiyonunun türev ifadeleri yer almaktadır. Her bir durum değişkeninin Lyapunov kararlılık esasına göre kararlı olabilmeleri için; $\dot{V}_n(z_n) \leq 0$ koşulunu sağlamaları gerekmektedir.

2.3 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol

BLF, sistemlerin durum değişkenleri üzerinde oluşan izleme hatalarının sınırlandırılması işlemine dayanır. Kaynak (Tee ve diğ. 2009), (Ngo ve diğ. 2009), (Niu ve Zhao 2013), (Tee ve Ge 2009), (Tee ve Ge 2011)'da görüldüğü gibi çeşitli sistemlerde istenilen fiziksel sınır değeri aralığında bir çalışma gerçekleştirebilmek için kullanılan BLF'nin avantajları ve çalışma mantığı açıklanmaktadır. BLF, izleme hatalarına getirdiği kısıt işlemleri vasıtasıyla sistemlerin istenilen fiziki sınır değerleri aralığında kararlı bir şekilde çalışmasını gerçekleştirmektedir. Bu çalışmadaki kullanılma amacı da, top-kiriş sistemi ve iki-rotorlu helikopter sisteminin durum değişkenleri üzerinde oluşan izleme hatalarını BLF'ye özgü bir rampa değeri ile sınırlandırıp, izleme hatasını talep edilen sınır değerine göre orjine yakınsatmaktır. Bariyer Lyapunov fonksiyonları; uzay araçlarında, insansız hava uçaklarının belirlenen yörüngeyi takip etme işlemlerinde ve füze teknolojisi gibi birçok sektörde kararlılık ve üst düzey performans sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle askeri alanlarda hataya tahammül toleransı minimum olduğundan dolayı, hatanın sınırlandırılması gerekmektedir. Bu işlemler de BLF tabanlı kontrol yöntemleri vasıtası ile gerçekleştirilmektedir.

Şekil 2.1'de bariyer Lyapunov fonksiyonunun karakteristik eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Bariyer Lyapunov fonksiyonunun karakteristik eğrisi

Şekil 2.1'den görüldüğü gibi izleme hatası ' z_1 ', BLF kararlılık esasına göre $\pm k_{b1}$ fiziksel sınır değerleri aralığında sınırlandırılmıştır. Lyapunov fonksiyonun

' V_i ', kararlı olabilmesi için izleme hatasının seçilen sınır değerlerinden hiçbir zaman büyük olmaması gerekmektedir. Bu şekilde izleme hatası da bu fiziksel sınır değerleri arasında kısıtlandırılarak, sistemin optimum performansta çalışması gerçekleştirilmektedir.

Bu kontrolde sistemdeki izleme hataları, BLF vasıtası ile istenilen sınır değer aralığında sınırlandırılarak, geriadımlama kontrol yönteminin uygulanması ile kısıtlı bir geriadımlama kontrol gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda BLF tabanlı geriadımlama kontrolün SISO sistemlere nasıl uygulanılacağı gösterilmektedir.

2.3.1 Problem Tanımı

Problem; SISO, tam geri beslemeli, doğrusal olmayan sistemler için tasarlanmıştır. Bu sistemler, aşağıdaki genel ifade ile gösterilmektedir.

$$\dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1, \quad n \geq 2 \quad (2.21)$$

$$\dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u \quad (2.22)$$

Sistem çıkışı ise,

$$y = x_1 \quad (2.23)$$

x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası aşağıda gösterilmiştir.

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.24)$$

\bar{x}_i , durum vektörlerini $[x_1, x_2, \dots, x_i]^T$ ifade etmektedir.

2.3.2 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol Algoritması

Aşağıda, BLF tabanlı geriadımlama kontrol yönteminin doğrusal olmayan sistemlere uygulanması için gereken formülizasyonlar adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: y_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası,

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.25)$$

Adım 2: Birinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-f_1 - k_1 z_1 + \dot{x}_{1d}) \quad (2.26)$$

Adım 3: İkinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-f_2 - k_2 z_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (2.27)$$

Adım 4: i . durum değişkeninin izleme hatalarının genel ifadesi ise,

$$z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.28)$$

Adım 5: Birinci izleme hatasının türev ifadesi,

$$\dot{z}_1 = f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{x}_{1d} \quad (2.29)$$

Adım 6: İkinci izleme hatasının türev ifadesi,

$$\dot{z}_2 = f_2 + g_2(z_3 + \alpha_2) - \dot{\alpha}_1 \quad (2.30)$$

Adım 7: İzleme hatasının genel türev ifadesi,

$$\dot{z}_i = f_i + g_i(z_{i+1} + \alpha_i) - \dot{\alpha}_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (2.31)$$

Adım 8: j . durum değişkeninin denge fonksiyonlarının genel ifadesi,

$$\alpha_j = \frac{1}{g_j}(-f_j - k_j z_j + \dot{\alpha}_{j-1}), \quad j = 2, \dots, i \quad (2.32)$$

Adım 9: Denge fonksiyonlarının sonuncusu olan kontrol sinyalinin ifadesi ise şu şekildedir,

$$u = \alpha_n = \frac{1}{g_n}(-f_n - k_n z_n + \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.33)$$

Adım 10: Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan k_1 kontrol parametresinin seçimi,

$$k_1^2 > -\frac{2g_1^2 k_{b2}^2}{(k_{b1}C)} + 2 \quad (2.34)$$

Adım 11: Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan j . durum değişkeninde yer alan k_j kontrol parametresi ise aşağıdaki ifadeye göre seçilir.

$$k_j^2 > -\frac{2g_j^2 k_{b(j+1)}^2}{(k_{bj}C)} + 2 \quad (2.35)$$

İfadede yer alan C parametresi, $(0-1)$ aralığında seçilen bir skaler sabittir.

2.3.3 Bariyer Lyapunov Fonksiyonu ile Kararlılık Analizi

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.36)$$

Otonom sistemi ele alındığında, $x = 0$ noktası yukarıdaki sistemin bir denge noktası olduğu varsayıldığında, $D \subset R^n$, $x = 0$ noktasını içeren bir açık küme olmak üzere sürekli türetilir. $V: D \rightarrow R$ fonksiyonu tanımlandığında eğer,

$$V(0) = 0, V(x) > 0, x \in D/\{0\} \quad (2.37)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0, x \in D \quad (2.38)$$

(2.33) ve (2.34)'deki koşullar sağlanıyorsa $x = 0$ denge noktası kararlıdır.

İlaveten,

$$\dot{V}(x) < 0, x \in D/\{0\} \quad (2.39)$$

(2.35)'deki ifade sağlanıyor ise sistem $x = 0$ denge noktasında asimtotik kararlıdır.

Yukarıda açıklanan Lyapunov kararlılık teoreminden görüldüğü üzere sistemin kararlılığını sağlayabilmek adına formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı

geriadımlama kontrol yönteminin Lyapunov kararlılığı aşağıda adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: Birinci BLF'nin seçimi,

$$V_1 = \frac{1}{2} \log \frac{k_{b1}^2}{k_{b1}^2 - z_1^2} \quad (2.40)$$

Bu ifadede birinci durum değişkeninin izleme hatası olan z_1 , k_{b1} rampa değeri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlandırma işleminin gerçekleşebilmesi için; $k_{b1} > |z_1(0)|$ koşulu sağlanmalıdır. (Burada geçen $z_1(0)$, birinci izleme hatasının başlangıç değeridir.)

Adım 2: Birinci BLF'nin türev ifadesi ve kararlılığının sağlanması aşağıda ifade edilmiştir.

$$\dot{V}_1 = -\frac{k_1 z_1^2}{k_{b1}^2 - z_1^2} + \frac{g_1 z_1 z_2}{k_{b1}^2 - z_1^2} \quad (2.41)$$

Lyapunov kararlık esasına göre kararlılığın sağlanabilmesi için $\dot{V}_1 \leq 0$ ve $k_{b1} > |z_1(0)|$ olması gerekmektedir.

Adım 3: n . durum değişkeninin BLF genel ifadesi ise şu şekildedir,

$$V_n = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - z_j^2} \quad (2.42)$$

Bu genel ifadede j . durum değişkeninin izleme hatası olan z_j , k_{bj} parametresi ile sınırlandırılmaktadır. Kararlılığın sağlanabilmesi için $k_{bj} > |z_j(0)|$ olmalıdır.

Adım 4: BLF'nin türevinin genel ifadesi şu şekildedir,

$$\dot{V}_n = \sum_{j=1}^{n-1} -\frac{k_j z_j^2}{8(k_{bj}^2 - z_j^2)} - \frac{k_n z_n^2}{2(k_{bn}^2 - z_n^2)} \quad (2.43)$$

Bu genel ifadede; j . durum değişkeninin izleme hatası olan z_j , k_{bj} ile n . durum değişkeninin izleme hatası olan z_n ise k_{bn} rampa değerleri ile sınırlandırılmaktadır. Lyapunov kararlık şartına göre sistemin kararlı olabilmesi için $\dot{V}_n \leq 0$ koşulunun sağlanmış olması gerekmektedir. Lyapunov kararlılığın

sağlanabilmesi için $k_{bj} > |z_j(0)|$ ve $k_{bn} > |z_n(0)|$ olmalıdır.

2.4 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrol

Karesel Lyapunov fonksiyonları kontrol teorisinde; kararlılık analizi, performans analizi, kontrol sentezi ve sistem tanılama işlemlerinde kullanılan Lyapunov tabanlı bir fonksiyon çeşididir. Kaynak (Açıkmeşe ve Corless 2008), (Corless 1994), (Manuel ve diğ. 2015)'de görüldüğü gibi çeşitli derecedeki sistemlerin kararlılık analizlerinin yapıldığı gibi bu sistemler üzerinde başarılı tanılama işlemleri de gerçekleştirilmektedir. QLF; uzay araçlarında, insansız hava uçaklarının yörüngeyi takip etme işlemlerinde ve füze teknolojisi gibi birçok sektörde kararlılığı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kontrol parametresi olmayan ve kareselleştirmeye esaslı QLF tabanlı geriadımlama kontrol sistemlerde kararlılığın sağlanması amacıyla kullanılmaktadırlar.

Aşağıda QLF tabanlı geriadımlama kontrolün SISO sistemlere nasıl uygulanacağı gösterilmektedir.

2.4.1 Problem Tanımı

Problem, SISO tam geri beslemeli, doğrusal olmayan sistemler için tasarlanmıştır. Bu sistemler, aşağıdaki genel ifade ile gösterilmektedir.

$$\dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad n \geq 2 \quad (2.44)$$

$$\dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u \quad (2.45)$$

Sistem çıkışı ise,

$$y = x_1 \quad (2.46)$$

x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası aşağıda gösterilmiştir.

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.47)$$

\bar{x}_i , durum vektörlerini $[x_1, x_2, \dots, x_i]^T$ ifade etmektedir

2.4.2 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrol Algoritması

Aşağıda, QLF tabanlı geriadımlama kontrol yönteminin doğrusal olmayan sistemlere uygulanması için gereken formülizasyonlar adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: y_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası,

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.48)$$

Adım 2: Birinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-f_1 - 2z_1 + \dot{x}_{1d}) \quad (2.49)$$

Adım 3: İkinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-f_2 - z_1 - 3z_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (2.50)$$

Adım 4: Üçüncü denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_3 = \frac{1}{g_3}(-f_3 - z_1 - z_2 - 4z_3 + \dot{\alpha}_2) \quad (2.51)$$

Adım 5: Dördüncü denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_4 = \frac{1}{g_4}(-f_4 - z_1 - z_2 - z_3 - 5z_4 + \dot{\alpha}_3) \quad (2.52)$$

Adım 6: i . durum değişkeninin izleme hatalarının genel ifadesi,

$$z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i, i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (2.53)$$

Adım 7: i . durum değişkeninin denge fonksiyonunun genel ifadesi,

$$\alpha_i = \frac{1}{g_i}(-f_i - z_1 - z_2 - \dots - z_{i-1} - (i + 1)z_i + \dot{\alpha}_{i-1}), \quad i = 2, \dots, i \quad (2.54)$$

Adım 8: Denge fonksiyonlarının sonuncusu olan kontrol sinyalinin ifadesi ise şu şekildedir,

$$u = \alpha_n = \frac{1}{g_n}(-f_n - z_1 - z_2 - \dots - (i + 1)z_i + \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.55)$$

2.4.3 Karesel Lyapunov Fonksiyonu ile Kararlılık Analizi

Aşağıdaki sistem ele alındığında.

$$\dot{x} = Ax \quad (2.56)$$

P ve Q reel, simetrik, pozitif kesin matrisler olmak üzere

$$A^T P + PA = -Q \quad (2.57)$$

Denkleminin çözümünün olması (2.56)'de gösterilen denklemin asimtotik kararlı olması için gerek ve yeter koşuldur. Bu denklemin sağlanması durumunda,

$$V(x) = x^T P x \quad (2.58)$$

sisteme dair Lyapunov fonksiyondur. Teoremden sağlanması gereken (2.57) denklemi olarak; (2.58)'deki denkleminde Lyapunov fonksiyonu yapısı sebebiyle, QLF olarak adlandırılmaktadır.

2.5 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol

Denge noktası olmayan, geçici yörünge şekil verme problemi; doğrusal olmayan, tam geri beslemeli SISO sistemler için üç aşama anahtarlamalı kontrol metodu ile gerçekleştirilmektedir (Yan ve Wang 2012). Bu kontrol metodu üzerinden doğrusal olmayan sistemin çıkış izleme hatası, denge noktasına yaklaştığı an itibarıyla, önceden uygun bir şekilde belirlenmiş bir dizi sınır aşamaları aracılığı ile kısıtlandırılmaktadır. Detaylı bir şekilde açıklamak gerekirse; üç aşama anahtarlamalı kontrol metodunda izleme hatasına birinci kontrol

aşamasında bir rampa sabiti ‘ $\pm k_{bi}$ ’ uygulanmaktadır. İkinci kontrol aşaması, zamanla değişen fonksiyonların iki üstel ifadeye yakınsaması prensibine dayanmaktadır. Üçüncü kontrol aşamasında ise, küçük bir rampa sabiti vasıtası ile sırasıyla üç aşamanın her biri, izleme hatasına şekilli bir kısıt işlemi gerçekleştirmektedir. Sistemin izleme hatasının yörüngesi, geçici hal dönemler esnasındaki sınırlandırma işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Kontrol sinyalinin büyüklüğü; uygun kontrol kaynağı ve sistemin geçici hal performansı esnasında her bir kontrol aşamasında sırasıyla kontrol edilerek formülize edilmiştir (Yan ve Wang, 2010), (Tee ve diğ. 2009).

Bu kontrolde sistem çıkışı, üç aşama anahtarlamalı kısıt işlemi vasıtası ile sınırlandırılarak geriadımlama kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir. BLF tabanlı geriadımlama kontrol yöntemi ile durum değişkenlerinin izleme hatalarını şekilli bir şekilde kısıtlandırmak için izleme hatalarına üç aşamalı bir kısıt işlevi uygulanmaktadır. Bu yöntem sadece sınırlandırma işlemi değil, aynı zamanda izleme hatalarının değişimine göre izleme hatasının talep edilen fiziksel sınır çerçevesinde azalmasını hızlandırmaktır.

Özellikle tıp ve askeri alanlardaki kontrol işlemlerinde hataya tahammül toleransı çok az olduğundan dolayı, sistemdeki hatanın istenilen fiziksel sınırlar çerçevesinde sınırlandırılması gerekmektedir. Bu işlem BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi vasıtası ile istenilen sınır bölgesi aralığında belirlenen yörüngede, en kısa süreçte hatanın minimize edilmesi işlemi ile gerçekleştirilmektedir

Aşağıda BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrolün SISO sistemlere nasıl uygulanacağı gösterilmektedir.

2.5.1 Problem Tanımı

Problem, SISO tam geri beslemeli, doğrusal olmayan sistemler için tasarlanmıştır. Bu sistemler, aşağıdaki genel ifade ile gösterilmektedir.

$$\dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1, \quad n \geq 2 \quad (2.59)$$

$$\dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u \quad (2.60)$$

Sistem çıkışı ise,

$$y = x_1 \quad (2.61)$$

x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası aşağıda gösterilmiştir.

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.62)$$

\bar{x}_i , durum vektörlerini $[x_1, x_2, \dots, x_i]^T$ ifade etmektedir.

2.5.2 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrol Algoritması

Aşağıda, BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol yönteminin doğrusal olmayan sistemlere uygulanması için gereken formülizasyonlar aşamalar halinde gösterilmiştir.

2.5.2.1 Birinci Aşama Kontrol Algoritması

Bu aşamada, 2.3. bölümde yer alan BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama yöntemi ile kontrol uygulanmaktadır. Seçilen bir rampa sabiti ' $\pm k_{bi}$ ' ile izleme hatası sınırlandırılmalıdır. Bu aşamanın uygulanabilmesi için $z_1(0)$, birinci durum değişkeninin izleme hatası olmak koşuluyla, $z_1(0) > 0$ olması gerekmektedir. Ancak $z_1(0) < 0$ ise, tüm koşul ifadelerinin tersi alınarak kısıt işlevi gerçekleştirilmektedir.

Adım 1: y_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası,

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.63)$$

Adım 2: Birinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-f_1 - k_1 z_1 + \dot{x}_{1d}) \quad (2.64)$$

Adım 3: İkinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-f_2 - k_2 z_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (2.65)$$

Adım 4: i . durum değişkeninin izleme hatalarının genel ifadesi ise,

$$z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.66)$$

Adım 5: Birinci izleme hatasının türev ifadesi,

$$\dot{z}_1 = f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{x}_{1d} \quad (2.67)$$

Adım 6: İkinci izleme hatasının türev ifadesi,

$$\dot{z}_2 = f_2 + g_2(z_3 + \alpha_2) - \dot{\alpha}_1 \quad (2.68)$$

Adım 7: İzleme hatasının genel türev ifadesi,

$$\dot{z}_i = f_i + g_i(z_{i+1} + \alpha_i) - \dot{\alpha}_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (2.69)$$

Adım 8: j . durum değişkeninin denge fonksiyonlarının genel ifadesi,

$$\alpha_j = \frac{1}{g_j}(-f_j - k_j z_j + \dot{\alpha}_{j-1}), \quad j = 2, \dots, i \quad (2.70)$$

Adım 9: Denge fonksiyonlarının sonuncusu olan kontrol sinyalinin ifadesi ise şu şekildedir,

$$u = \alpha_n = \frac{1}{g_n}(-f_n - k_n z_n + \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.71)$$

Adım 10: Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan k_1 kontrol parametresinin seçimi,

$$k_1^2 > -\frac{2g_1^2 k_{b2}^2}{(k_{b1}C)} + 2 \quad (2.72)$$

Adım 11: Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan j . durum değişkeninde yer alan k_j kontrol parametresi ise aşağıdaki ifadeye göre seçilir.

$$k_j^2 > -\frac{2g_j^2 k_{b(j+1)}^2}{(k_{bj}C)} + 2 \quad (2.73)$$

İfadede yer alan C parametresi, (0-1) aralığında seçilen bir skaler sabittir.

2.3.3'de anlatılan Lyapunov kararlılık analizine göre BLF'nin kararlılığı aşağıda adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: Birinci BLF'nin seçimi,

$$V_1 = \frac{1}{2} \log \frac{k_{b1}^2}{k_{b1}^2 - z_1^2} \quad (2.74)$$

Bu ifadede birinci durum değişkeninin izleme hatası olan z_1 , k_{b1} rampa değeri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlandırma işleminin gerçekleşebilmesi için; $k_{b1} > |z_1(0)|$ koşulu sağlanmalıdır. (Burada geçen $z_1(0)$, birinci izleme hatasının başlangıç değeridir.)

Adım 2: Birinci BLF'nin türev ifadesi ve kararlılığının sağlanması aşağıda ifade edilmiştir.

$$\dot{V}_1 = -\frac{k_1 z_1^2}{k_{b1}^2 - z_1^2} + \frac{g_1 z_1 z_2}{k_{b1}^2 - z_1^2} \quad (2.75)$$

Lyapunov kararlılık esasına göre kararlılığın sağlanabilmesi için; $\dot{V}_1 \leq 0$ ve $k_{b1} > |z_1(0)|$ olması gerekmektedir.

Adım 3: BLF'nin genel ifadesi ise şu şekildedir,

$$V_n = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - z_j^2} \quad (2.76)$$

Bu genel ifadede j . durum değişkeninin izleme hatası olan z_j , k_{bj} parametresi ile sınırlandırılmaktadır.

Adım 4: BLF'nin türevinin genel ifadesi şu şekildedir,

$$\dot{V}_n = \sum_{j=1}^{n-1} -\frac{k_j z_j^2}{8(k_{bj}^2 - z_j^2)} - \frac{k_n z_n^2}{2(k_{bn}^2 - z_n^2)} \quad (2.77)$$

Bu genel ifadede; j . durum değişkeninin izleme hatası olan z_j , k_{bj} ile n . durum değişkeninin izleme hatası olan z_n ise k_{bn} rampa değerleri ile

sınırlandırılmaktadır. Lyapunov kararlılık esasına göre sistemin kararlı olabilmesi için $\dot{V}_n \leq 0$ olması gerekmektedir. Lyapunov kararlılığın sağlanabilmesi için $k_{bj} > |z_j(0)|$ ve $k_{bn} > |z_n(0)|$ olmalıdır.

Aşağıdaki koşullar sağlanana kadar yukarıda algoritması verilen BLF tabanlı kısıtlı geriadım kontrol uygulanacaktır. (2.78) ve (2.79)'deki koşullar sağlandığı anda ise ikinci aşamadaki kontrol işlemi devreye girecektir.

$$z_1 > 0 \quad (2.78)$$

$$\dot{z}_1 < -bz_1 \quad (2.79)$$

Şartta verilen 'b', z_1 'in sifıra yakınsaması için gereken bir pozitif kısıt parametresidir.

2.5.2.2 İkinci Aşama Kontrol Algoritması

Birinci aşamada yer alan (2.78) ve (2.79)'deki koşullar sağlandığı an bu aşamadaki kontrol yöntemi uygulanacaktır. Aşağıda bu aşamaya ait kontrol yönteminin algoritması adım adım gösterilmiştir.

Adım 1: x_d , istenilen referans olmak koşuluyla; birinci izleme hatası,

$$\bar{z}_1 = z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.80)$$

Adım 2: Birinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1} (-f_1 - k_1 \bar{z}_1 + \dot{x}_{1d}) \quad (2.81)$$

Adım 3: İkinci denge fonksiyonunun seçimi,

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2} (-f_2 - k_2 \bar{z}_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (2.82)$$

Adım 4: İkinci izleme hatasının seçimi,

$$\bar{z}_2 = z_2 = \frac{x_1 - y_d}{x_1 - y_d} + d \quad (2.83)$$

Adım 5: i . durum değişkeninin izleme hatalarının genel ifadesinin seçimi,

$$\zeta_i = z_i = x_i, \quad i = 3, \dots, n \quad (2.84)$$

Adım 6: Birinci izleme hatasının türevinin seçimi,

$$\dot{\zeta}_1 = \dot{z}_1 = (\zeta_2 - d)z_1 \quad (2.85)$$

Adım 7: İkinci izleme hatasının türevinin seçimi,

$$\dot{\zeta}_2 = \dot{z}_2 = \left(\frac{f_1 + g_1 x_2 - y_d}{x_1 - y_d} + d \right)' \quad (2.86)$$

Adım 8: i . durum değişkeninin izleme hatalarının türevlerinin genel seçimi,

$$\dot{\zeta}_i = \dot{x}_i = f_i(x_i) + g_i(x_i)x_{i+1}, \quad i = 3, \dots, n - 1 \quad (2.87)$$

Adım 9: j . durum değişkeninin denge fonksiyonlarının genel ifadesi ise,

$$\alpha_j = \frac{1}{g_j} (-f_j - k_j \zeta_j + \dot{\alpha}_{j-1}), \quad j = 2, \dots, i \quad (2.88)$$

Adım 10: Denge fonksiyonlarının sonucusu olan kontrol sinyalinin ifadesi ise şu şekildedir,

$$u = \alpha_n = \frac{1}{g_n} (-f_n - k_n \zeta_n + \dot{\alpha}_{n-1}) \quad (2.89)$$

Denge fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılan k_n kontrol parametresi ise (2.82)'deki ifadeye göre seçilir.

$$k_n > \frac{2g_{n-1}^2 k_{bn}^2}{k_1 (k_{b(n-1)})^2 - (k_{b(n-1)} C)^2} \quad (2.90)$$

İfadede yer alan C parametresi, (0-1) aralığında seçilen bir skaler sabittir.

Yukarıda gösterilen ikinci kontrol aşamasında kullanılan ' b ' kısıt parametresi (2.91)'de yer alan ifadeye göre seçilen küçük bir sabit olarak seçilmektedir. ' b_1 ' ve ' b_2 ' sabitleri ise seçilen ' b ' parametresine bağlı olarak (2.91)'deki kurala göre oluşturulur. Bu aşamada kullanılan ' d ' ise (2.92)'de görüldüğü gibi bu iki

parametreden elde edilen bir skaler sabittir.

$$0 < b_1 < b < b_2 \quad (2.91)$$

$$d = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (2.92)$$

Yukarıda seçilen b_1 ve b_2 parametrelerine göre ikinci aşamada izleme hatasının takip edeceği yörünge, (2.93)'deki ifade ile üstel iki sınır değeri aralığında gerçekleştirilmektedir.

$$-z_{1,0}e^{-b_2 t} < z_1 < z_{1,0}e^{-b_1 t} \quad (2.93)$$

Denklem (2.94)'deki koşul sağlandığı anda ise ikinci aşamada yer alan kontrol yöntemi sonlanıp, üçüncü aşamada yer alan kontrol yöntemi uygulanacaktır.

$$|z_1| = L_{b_1} - \Delta L_{b_1} > 0 \quad (2.94)$$

Koşulda yer alan L_{b_1} ve ΔL_{b_1} , sırasıyla üçüncü aşamaya geçilmesi istenilen sınır değeri ve tampon bölge değeridir. İzleme hatasının sıfıra yaklaştığı anda devreye gireceği için bu değerler çok küçük seçilmelidir.

2.5.2.3 Üçüncü Aşama Kontrol Algoritması

Bu aşamada ise, ikinci aşamada yer alan (2.94)'deki koşul sağlandığı anda kontrol işleminin sonuna dek, birinci aşamada kullanılan 2.5.2.1. bölümde yer alan BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol uygulanacaktır.

İkinci aşamada yer alan koşul sağlandığı itibaren BLF bu aşamada aşağıdaki form haline gelmektedir.

$$V_{s3} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{L_{bi}^2}{L_{bi}^2 - z_i^2} \quad (2.95)$$

Bu ifadede i . durum değişkeninin izleme hatası olan z_i , seçilen L_{bi} rampa değeri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlandırma işleminin gerçekleşebilmesi için; $L_{bi} > |z_i(0)|$ koşulu sağlanmalıdır. (Burada geçen $z_i(0)$, i . izleme hatasının başlangıç değeridir.

3. DENEYSEL SİSTEMLER

3.1 Top-Kiriş Sistemi

Top-kiriş sistemi; kontrol mühendisliğinin öğretiminde ve bilimsel araştırmalarda kullanılan, popüler, doğrusal olmayan ve kararsız labaratuvar modellerinden biridir. Top-kiriş sistemi; geniş bir kiriş düzlemi üzerinde tek boyutta ve serbestçe hareket edebilen çelik bir topun hareket etmesi prensibine dayanır. Günümüzde yeni geliştirilen kontrol yöntemleri için test sistemlerinden biridir. Şekil 3.1’de top-kiriş sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Top-kiriş sistemi

Top-kiriş sistemi Şekil 3.1’den görüldüğü üzere; çelik bir topun uzun bir kirişin üzerindeki hareketine bağlı olarak geliştirilen bir sistemdir. Sistemde kiriş, bir elektrik motorunun çıkış miline bağlıdır. Bu nedenle kiriş, kontrol sinyalinin motor amplifikatörüne uygulanması ile sahip olduğu merkez ekseninde eğilenebilmektedir. Kiriş üzerindeki topun pozisyonu, özel bir sensör kullanılarak ölçülmektedir. Sistemdeki kontrol, kirişin açısının değişimi ile kiriş üzerindeki topun pozisyonunun otomatik bir şekilde düzeltilmesi işlemine dayanmaktadır. Bu kontrol işlemi, çelik topun kiriş üzerinde sabit kalmaması sebebiyle zordur. Kirişin eğimiyle orantılı olarak top, kiriş üzerinde hareket etmektedir. Kontrol teknolojisinde top-kiriş sistemi, açık döngü kararsız bir sistemdir. Çünkü, sistem çıkışı (topun pozisyonu) sabit bir çıkış (kirişin açısı) için belirlenen limitler dışında da artmaktadır. Genellikle kiriş üzerindeki topun belirlenen referansı takip edebilmesi için geri beslemeli

kontrol kullanılmaktadır (Koo ve diğ. 2012), (Wellstead 2010).

Top-kiriş sisteminin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir (Quanser 2008).

$$\ddot{r} = \frac{mr_{arm}gR^2}{L_{beam}(mR^2+J_b)} \sin Q - \frac{m}{\frac{J_b}{R^2}+m} r \dot{Q}^2 \quad (3.1)$$

$$\ddot{Q} = -\frac{1}{\tau} \dot{Q} + \frac{L_1}{\tau} u \quad (3.2)$$

Matematiksel ifadedeki parametreler, Tablo 3.1'de değerleriyle birlikte gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Top-kiriş sisteminin parametreleri

L_1	Kararlı durum kazancı	16 rad/sv
τ	Zaman sabiti	0.0285 s
L_{beam}	Kirişin uzunluğu	42.55 cm
m	Topun ağırlığı	0.064 kg
J_b	Topun momenti	$4.129 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
R	Topun yarıçapı	1.27 cm
g	Yerçekimi ivmesi	$9.81 \text{ m} / \text{s}^2$
r_{arm}	Motor ile dişli vidasının mesafesi	2.54 cm

Doğrusal olmayan kaskat, SISO bir sistem olan top-kiriş sisteminin dört adet doğrusal olmayan durum değişkeni vardır. İlk ikisi topun dinamikleri, son ikisi ise servo motorun dinamikleridir. Sistemin girişi servo motora uygulanan voltaj, çıkışı ise topun pozisyonudur.

$x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (r, \dot{r}, Q, \dot{Q})^T$ olmak koşulu ile top-kiriş sisteminin doğrusal olmayan durum değişkenleri denklem (3.3)'de gösterilmektedir.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = K_{bb} \sin x_3 - Hx_1x_4^2 \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{\tau} x_4 + \frac{L_1}{\tau} u$$

Durum değişkenleri içerisinde yer alan K_{bb} ve H ifadeleri denklem (3.4)'de gösterilmektedir.

$$K_{bb} = \frac{mr_{arm}gR^2}{L_{beam}(mR^2 + J_b)} \quad (3.4)$$

$$H = \frac{m}{\frac{J_b}{R^2} + m}$$

Aşağıda tek giriş-tek çıkış (SISO) bir sistem olan top-kiriş sisteminin durum değişkenlerine ait durum uzayları gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} F_1 &= [0] & G_1 &= [1] \\ F_2 &= [-Hx_1x_4^2] & G_2 &= [K_{bb}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} F_3 &= [0] & G_3 &= [1] \\ F_4 &= \left[-\frac{1}{\tau}x_4\right] & G_4 &= \left[\frac{L_1}{\tau}\right] \end{aligned}$$

Denklem (3.3)'de gösterilen top-kiriş sisteminin doğrusal olmayan durum değişkenlerinden; 'x₁' ve 'x₃' sırasıyla topun ve servo motorun pozisyonunu, 'x₂' ve 'x₄' ise sırasıyla topun ve servo motorun hızlarını ifade etmektedir.

3.2 İki-Rotorlu Helikopter Sistemi

MIMO sistemler, kontrol teorisinde her zaman önemli bir konumda yer almıştır. Çok giriş-çok çıkış gerektiren kontrol sistemleri arasında, helikopter sistemleri MIMO sistemlerden biridir. İki rotora sahip olması gereken uçakların, bir yörünge doğrultusunda hareket eden füze sistemlerinin gökyüzünde manevra kontrolü yapabilmesi için; bu tür araçlarda MIMO bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. SISO sistemler talep edilen bu manevra kontrolünü gerçekleştirememektedir (Chalupa ve diğ. 2015), (Feedback 2010). Şekil 3.2'de iki-rotorlu helikopter sistemi gösterilmektedir.



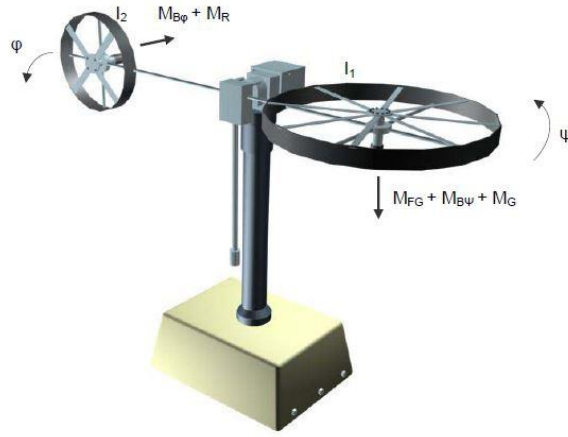
Şekil 3.2: İki-rotorlu helikopter sistemi

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi iki-rotorlu helikopter çalışmaları, gerçek bir helikopterin modeli aracılığıyla kontrol teorisine bilimsel araştırmalar sebebiyle takdim edilmiştir. Bununla birlikte sistemde bazı önemli basitleştirilmeler yapılmıştır. Bunlardan birincisi; iki-rotorlu helikopter sisteminin bir kuleye bağlı olduğu gerçeği ve ikinci olarak ise helikopterin pozisyonu ve hızının, rotor hız varyasyonları üzerinden kontrol edilebilmesidir. Gerçek helikopter sisteminde; hız rotorunun daha az sabiti vardır ve itme kuvveti, rotor bıçaklarının modifikasyon açısıyla değişmektedir.

Ne yazık ki bir helikopterdeki çoğu dinamik karakteristiklerin çoğu ikirotorlu helikopter sisteminde gerçekleştirilememektir. Bu da sistemin bir dezavantajıdır. Gerçek bir helikopter sistemine benzer olarak, iki rotor arasında önemli bir çarpaz bağlantı vardır. Eğer dikey pozisyon rotoru aktif edilirse, helikopter yatay düzlemde de dönebilecektir.

Labaratuvar çalışmaları için; rotarlara uygulanan gerilim değerleri sistemin girişleri, yatay-dikey açılar ve açısız hız ise sistemin çıkışları olmak üzere doğrusal olmayan bir sistem olan iki-rotorlu helikopter sistemi genel olarak bakıldığında kontrol mühendisliği için mükemmel bir sistemdir.

Doğrusal olmayan iki-rotorlu helikopter sisteminin Şekil 3.3'de mekanik-elektriki modelinden görüldüğü üzere matematiksel modeli aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.3: İki-rotorlu helikopter sisteminin mekanik-elektriki modeli

Denklem (3.6)'daki ifade, doğrusal olmayan sistemin dikey hareketini gerçekleştirir.

$$I_1 \cdot \ddot{\psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \quad (3.6)$$

Burada,

Doğrusal olmayan statik karakteristiği,

$$M_1 = a_1 \cdot \tau_1^2 + b_1 \cdot \tau_1 \quad (3.7)$$

Yerçekimi ivmesi,

$$M_{FG} = M_G \cdot \sin\psi \quad (3.8)$$

Sürtünme kuvveti ivmesi,

$$M_{B\psi} = B_{1\psi} \cdot \dot{\psi} + B_{2\psi} \cdot \text{sign}(\dot{\psi}) \quad (3.9)$$

Jiroskopik ivme ifadesi,

$$M_G = K_{gy} \cdot M_1 \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\psi \quad (3.10)$$

Jiroskop sensörü, ivmeölçere benzer ama aralarında büyük bir fark vardır. İvmeölçer cihazın ivmesini ölçerken, jiroskop 3 koordinatın (X, Y, Z) dönüş hızını ölçmektedir. İvmeölçerde tek bir koordinat üzerinden ivme ölçülürken jiroskopta üç koordinata göre dönüş hızı ölçümü yapılır. Bunu yaparken **Vector3** isimli bir sınıftan yararlanılır. Bu sınıf X, Y, Z koordinatlarına sahip olan nesneyi üzerinde 3D işlemler yaptırmak üzere hazırlanmaktadır. Örnekleme gerekirse, **Vector3.Zero** X, Y ve Z koordinatlarına '0' değerini atar (Geleceği Yazanlar Ekibi 2014).

Motor ve elektriki kontrol devresi, birinci derece transfer fonksiyonu ile yaklaşıklandırılır. Böylece motor momenti laplas domeninde denklem (3.11)'deki ifade haline gelmektedir.

$$\tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s+T_{10}} \cdot u_1 \quad (3.11)$$

Benzer eşitlik yatay düzlem hareket için de uygulanmaktadır. Denklem (3.12)'deki ifade doğrusal olmayan sistemin yatay hareketini gerçekleştirmektedir.

$$I_2 \cdot \ddot{\psi} = M_2 - M_{B\varphi} - M_R \quad (3.12)$$

Burada,

Doğrusal olmayan statik karakteristiği,

$$M_2 = a_2 \cdot \tau_2^2 + b_2 \cdot \tau_2 \quad (3.13)$$

Sürtünme kuvveti ivmesi,

$$M_{B\varphi} = B_{1\varphi} \cdot \dot{\psi} + B_{2\psi} \cdot \text{sign}(\dot{\psi}) \quad (3.14)$$

Çarpaz reaksiyon momenti yaklaşıklandırma ile denklem (3.15)'deki ifade haline gelmektedir.

$$M_R = \frac{k_2}{T_{21}s+T_{20}} \cdot u_2 \quad (3.15)$$

Tekrardan motor ve elektriki kontrol devresi, birinci derece transfer fonksiyonu ile yaklaşıklandırılır. Böylece motor momenti laplas domeninde denklem

(3.16)'daki ifade haline gelmektedir.

$$\tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}s + T_{20}} \cdot u_2 \quad (3.16)$$

Matematiksel ifadedeki parametreler, Tablo 3.2'de değerleriyle birlikte gösterilmiştir.

Tablo 3.2: İki-rotorlu helikopter sisteminin parametreleri

I_1	Dikey eksen de rotorun eylemsizlik momenti	$6.8 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_2	Yatay eksen de rotorun eylemsizlik momenti	$2 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
a_1	Statik karakteristik parametresi	0.0135
b_1	Statik karakteristik parametresi	0.0924
a_2	Statik karakteristik parametresi	0.02
b_2	Statik karakteristik parametresi	0.09
M_G	Yerçekimi ivmesi	0.32 N·m
$B_{1\psi}$	Sürtünme kuvveti ivmesi	$6 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$
$B_{2\psi}$	Sürtünme kuvveti ivmesi	$1 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$
$B_{1\phi}$	Sürtünme kuvveti ivmesi	$1 \cdot 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$
$B_{2\phi}$	Sürtünme kuvveti ivmesi	$1 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$
K_{gy}	Jiroskopik ivme parametresi	0.05 s/rad
k_1	Birinci motorun kazancı	1.1
k_2	İkinci motorun kazancı	0.8

Tablo 3.2 (Devam): İki-rotorlu helikopter sisteminin parametreleri

T_{11}	Birinci motorun payda parametresi	1.1
T_{10}	Birinci motorun payda parametresi	1
T_{21}	İkinci motorun payda parametresi	1
T_{20}	İkinci motorun payda parametresi	1
T_p	Çarpaz reaksiyon ivme parametresi	2
T_0	Çarpaz reaksiyon ivme parametresi	3.5
k_c	Çarpaz reaksiyon ivme kazancı	-0.2

Doğrusal olmayan, kaskat MIMO bir sistem olan iki-rotorlu helikopter sisteminin altı adet durum değişkeni vardır. Birinci ve ikinci durum değişkenleri ana motorun dinamikleri, ikinci ve üçüncü durum değişkenleri yardımcı motorun dinamikleri ve son iki durum değişkeni ise torkları (u_1 ve u_2) ifade etmektedir. Sistemin girişi servo motorlara uygulanan voltaj, çıkışı ise ana ve yardımcı pervanelerin pozisyonlarıdır.

İki rotorlu helikopter sisteminin doğrusal olmayan durum değişkenleri denklem (3.17) ve (3.18)'de gösterilmiştir.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G}{L_1} \quad (3.17)$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{M_2 - M_{B\varphi} - M_R}{L_2}$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{T_{10}}{T_{11}}x_5 + \frac{k_1}{T_{11}}u_1 \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_6 = -\frac{T_{20}}{T_{21}}x_6 + \frac{k_2}{T_{21}}u_2$$

Durum değişkenlerindeki parametre ifadeleri denklem (3.19)' da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} M_1 &= a_1x_5^2 + b_1x_5 \\ M_{FG} &= M_g \sin x_1 \\ M_{B\psi} &= B_{1\psi}x_2 + B_{2\psi} \text{sign}(x_2) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$M_G = K_{gy} M_1 x_4 \cos x_1$$

$$M_2 = a_2x_6^2 + b_2x_6$$

$$M_{B\varphi} = B_{1\varphi}x_2 + B_{2\varphi} \text{sign}(x_4)$$

$$M_R = \frac{k_c(T_0S+1)}{(T_P S+1)} x_5$$

İki-rotorlu helikopter sisteminin durum değişkenlerinden görüldüğü üzere; doğrusal olmayan, MIMO bir sistem olan iki-rotorlu helikopter sisteminin altı adet durum değişkeni vardır. Bu durum değişkenlerinden 'x₁' ve 'x₃', ana ve yardımcı pervanenin pozisyonlarını, 'x₂' ve 'x₄' ise ana ve yardımcı pervanelerin hızlarını ifade etmektedir. 'x₅' ve 'x₆' ise rotorlara uygulanan tork ifadeleridir. İki rotorlu helikopter sistemi çift giriş ve çift çıkışa sahip olduğundan dolayı top-kiriş sisteminden farklı olarak çıkışlar; y₁ = x₁ ve y₂ = x₃ 'dür.

Denklem (3.20), (3.21) ve (3.22)'de görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemi, literatürde yer almayan ve bu tez çalışmasında önerilen bir yöntem olan MIMO bir sistemin SISO bir sistem haline dönüştürülmesi işlemi ile üç durum değişkenli SISO bir sistem haline getirilerek, kısıtlı Lyapunov fonksiyonu tabanlı geriadımlama yöntemleri uygulanmıştır.

İlk olarak ana ve yardımcı pervane pozisyonlarının durum değişkenleri denklem (3.20) 'A' vektöründe, 2x1'lik bir vektör halinde ifade edilmiştir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

İkinci olarak ana ve yardımcı pervane hızlarının durum değişkenleri denklem (3.21) 'B' vektöründe, 2x1'lik bir vektör halinde ifade edilmiştir.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Ve son olarak rotorlara uygulanan torkların durum değişkenleri ise denklem (3.22) 'C' vektöründe, aynı şekilde 2x1'lik bir vektör halinde ifade edilmiştir.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Yukarıda ifade edildiği gibi MIMO bir sistemin SISO bir sistem haline dönüştürme işlemi yapıldığında, iki-rotorlu helikopter sisteminin durum uzay vektörleri denklem (3.23), (3.24) ve (3.25)'deki gibi oluşturulmaktadır.

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-M_g \sin x_1 - B_{1\psi} x_2 - B_{2\psi} \text{sign}(x_2)}{L_1} \\ \frac{-B_{1\varphi} x_2 - B_{2\varphi} \text{sign}(x_4)}{L_2} \end{bmatrix}$$

(3.24)

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} \frac{a_1 x_5 + b_1 - K_{gy} (a_1 x_5 + b_1) x_4 \cos x_1}{L_1} & 0 \\ -\frac{M_R}{L_2} & \frac{a_2 x_6 + b_2}{L_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{T_{10}}{T_{11}} x_5 \\ \frac{T_{20}}{T_{21}} x_6 \end{bmatrix}$$

(3.25)

$$\mathbf{G}_3 = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{T_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{T_{21}} \end{bmatrix}$$

4. KISITLI GERİADIMLAMA KONTROL UYGULAMA SONUÇLARI

4.1 Top-Kiriş Sistemi Kontrolü

Top-kiriş sistemi üzerinde; hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak kontroller gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Top-Kiriş Sistemi Benzetim Sonuçları

4.1.1.1 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.1. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan dört adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan top-kiriş sistemine uygulanan, 2.3. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

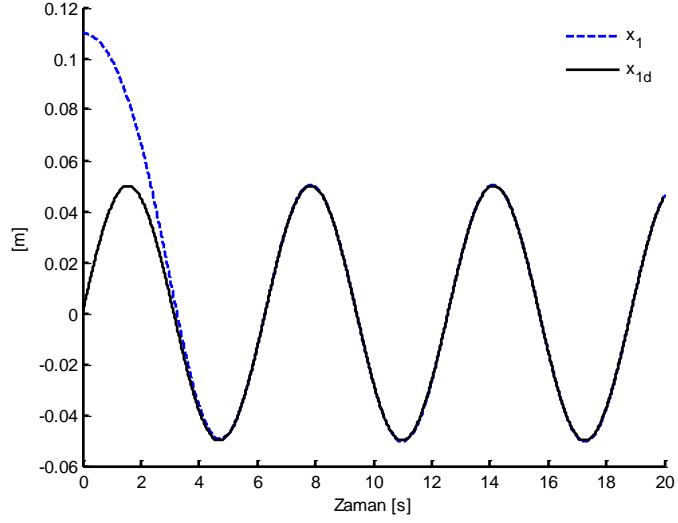
Şekillerde, birinci durum değişkeni ' x_1 ': topun pozisyonunu, üçüncü durum değişkeni ' x_3 ': servo motorun pozisyonunu, ' z_1 ': birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ' z_3 ': üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını ve ' u ': kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.1 - Şekil 4.5) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

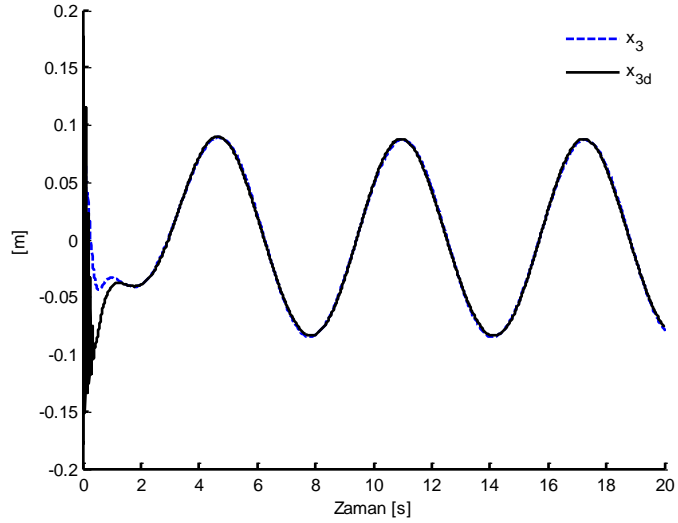
$$x_d = 0.05 \sin(t)$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

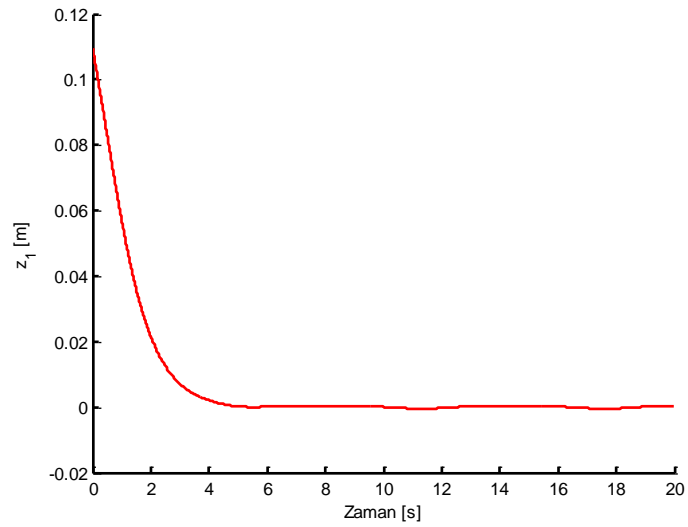
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



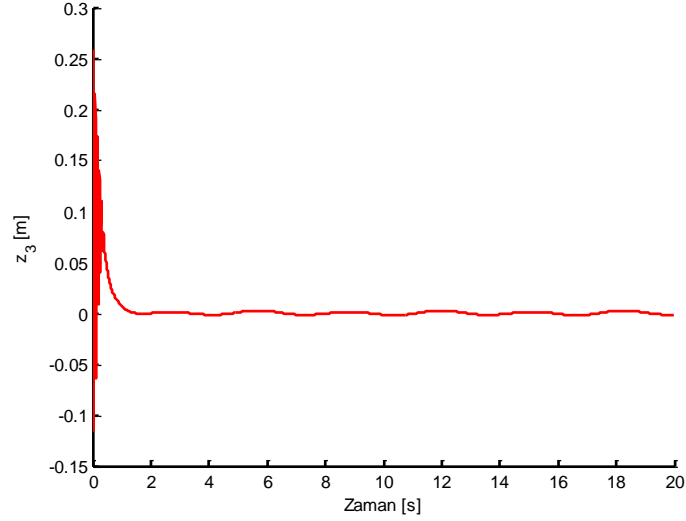
Şekil 4.1: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



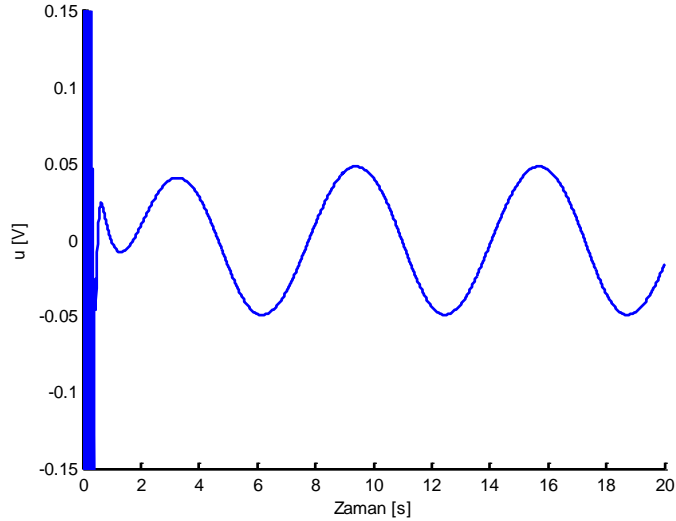
Şekil 4.2: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



Şekil 4.3: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.4: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.5: Kontrol sinyali (BLF)

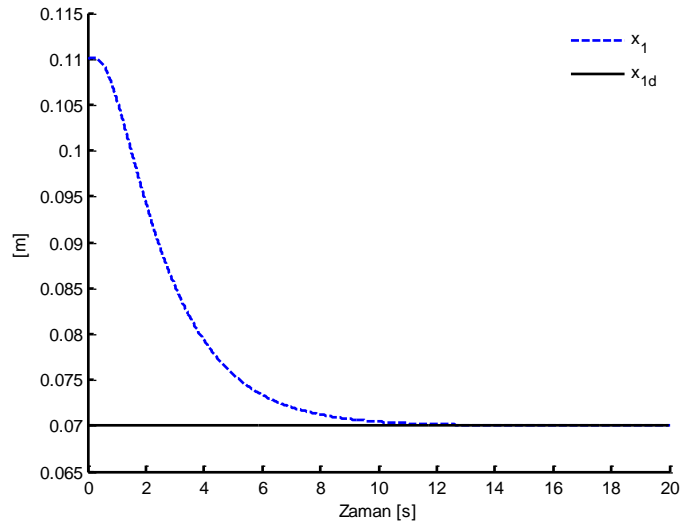
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.05\sin(t)$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansı iyi bir şekilde izlemiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 4. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.2’de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 2. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.5’de kontrol sinyali de verilen referansa göre bir çıkış vermektedir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’den görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.6 - Şekil 4.10) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

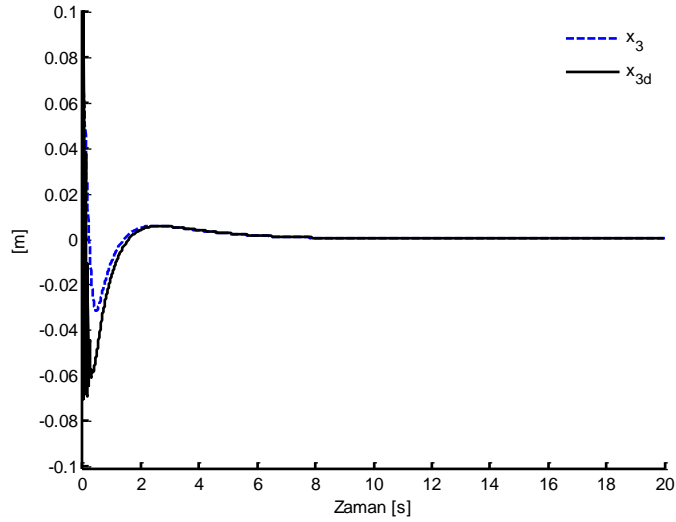
$$x_d = 0.07$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

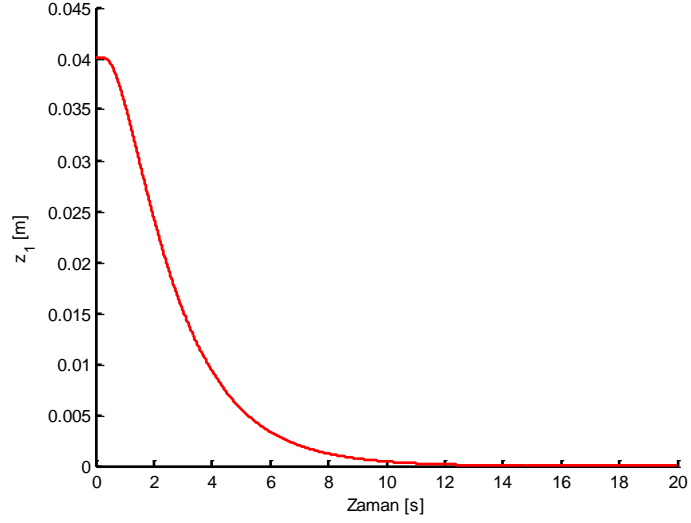
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



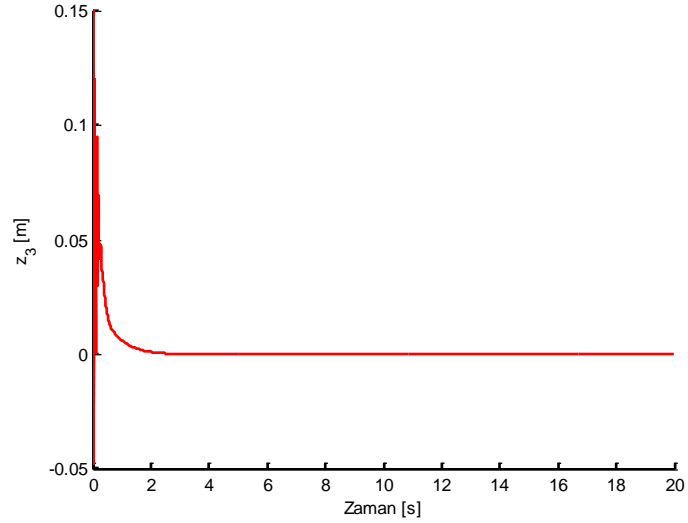
Şekil 4.6: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



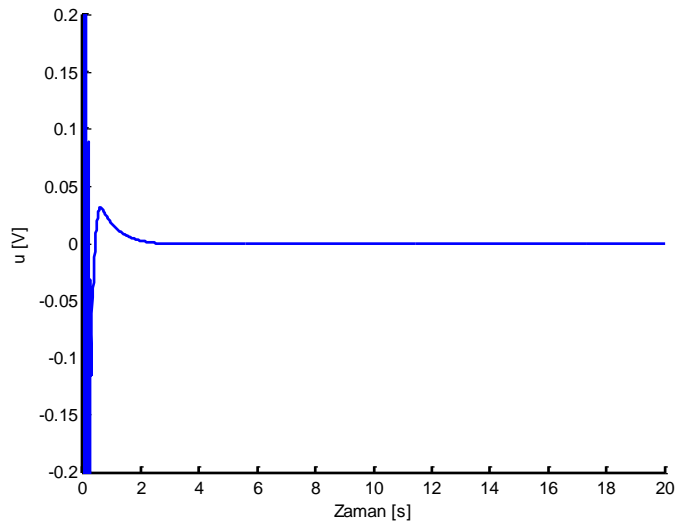
Şekil 4.7: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



Şekil 4.8: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.9: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.10: Kontrol sinyali (BLF)

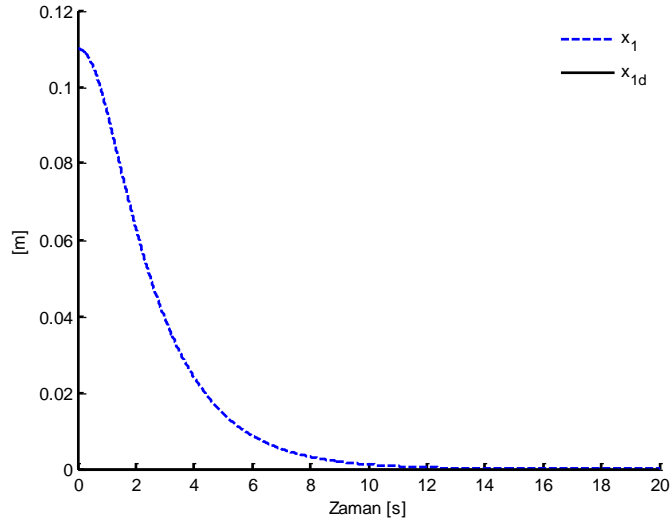
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.07$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 11. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.7’de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 2. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.10’da kontrol sinyali de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sıfıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi izleme hatalarında sıfıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.11 - Şekil 4.15) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

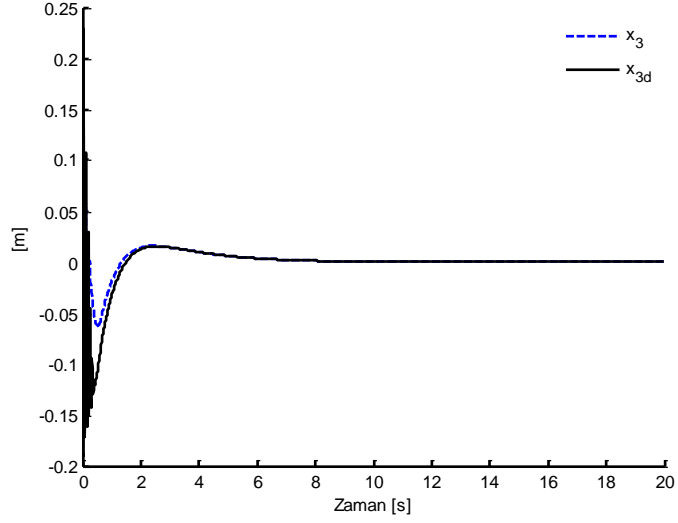
$$x_d = 0$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

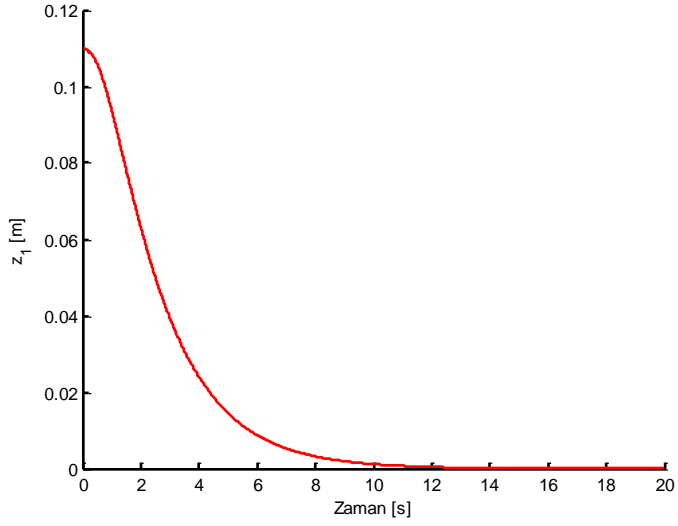
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



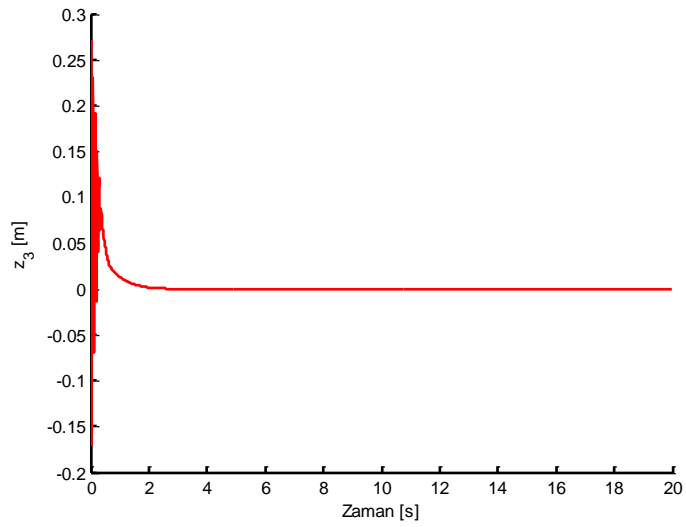
Şekil 4.11: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



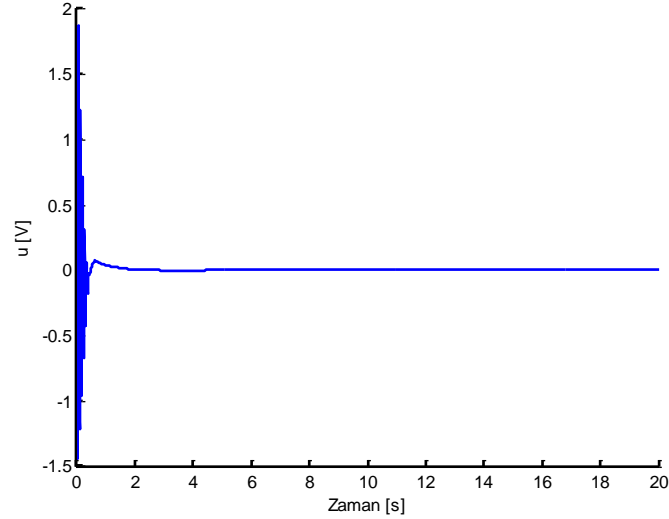
Şekil 4.12: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



Şekil 4.13: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.14: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.15: Kontrol sinyali (BLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 11. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.12’de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 2. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.15’de kontrol sinyali de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’den görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

4.1.1.2 QLF Tabanlı Geriadımleme Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.1. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan dört adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan top-kiriş sistemine uygulanan, 2.4. bölümde formülizasyonu açıklanan QLF tabanlı geriadımleme kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

Şekillerde, birinci durum değişkeni ‘ x_1 ’: topun pozisyonunu, üçüncü durum değişkeni ‘ x_3 ’: servo motorun pozisyonunu, ‘ z_1 ’: birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ‘ z_3 ’: üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme

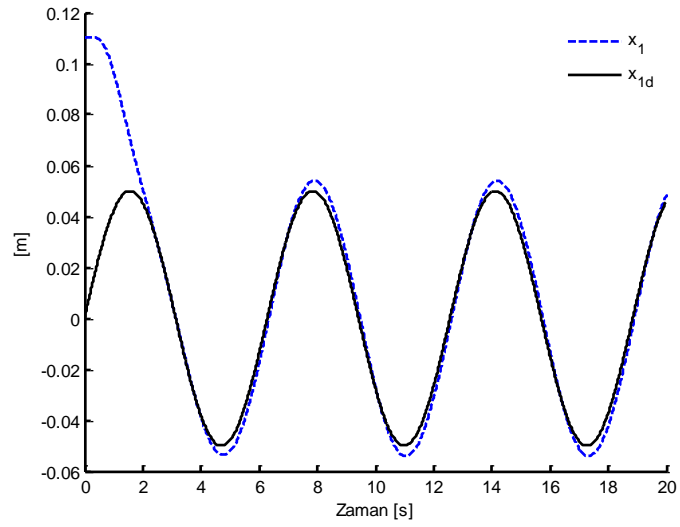
hatasını ve 'u': kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.16 - Şekil 4.20) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

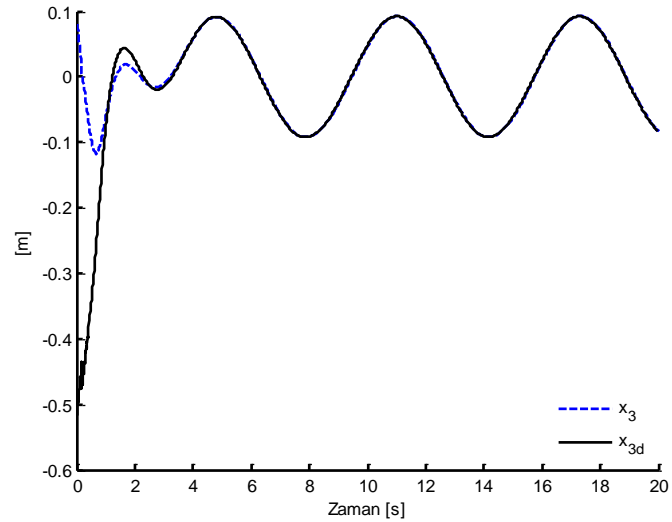
$$x_d = 0.05\sin(t)$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

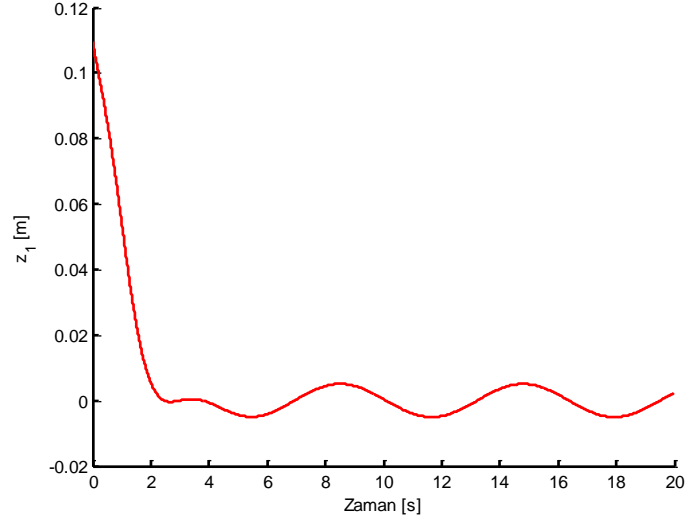
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



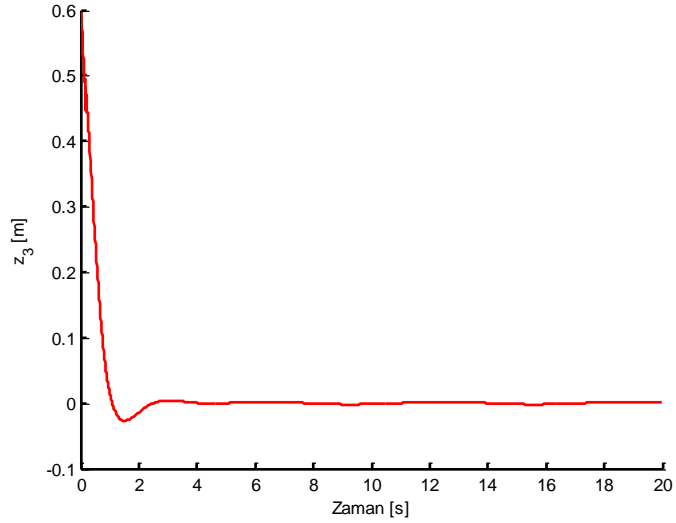
Şekil 4.16: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



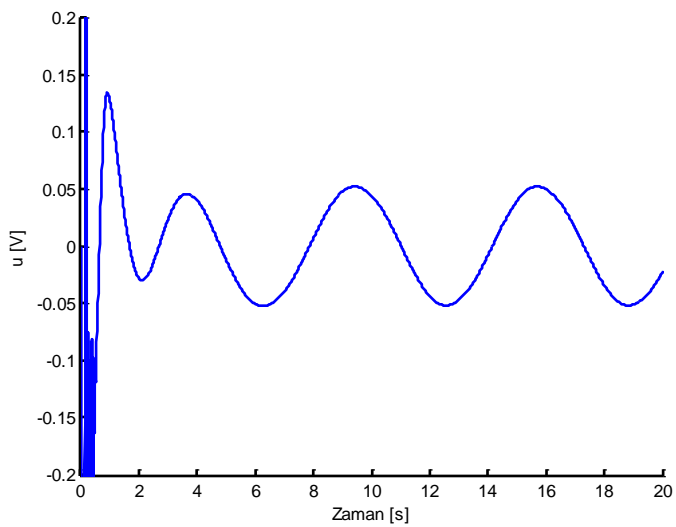
Şekil 4.17: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



Şekil 4.18: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.19: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.20: Kontrol sinyali (QLF)

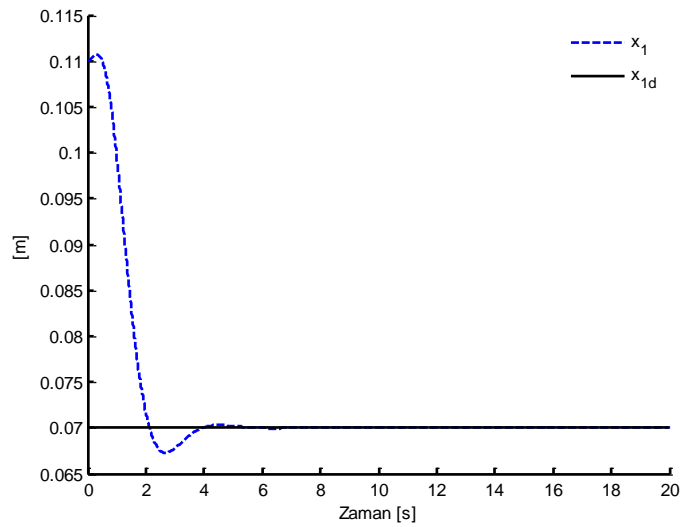
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.05\sin(t)$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, QLF tabanlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen sinüs referansın alt ve üst tepe noktalarında tam olarak izleme gerçekleştirememiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 2. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.17'de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 1. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.20'de kontrol sinyali de verilen referansa göre bir çıkış vermiştir. Şekil 4.18'de sistemin birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatası, kontrol parametresi olmayan QLF tabanlı kontrolün izleme kontrolü esnasında oluşan hatalar nedeniyle az da olsa hatalı bir şekilde sifıra yakınsamaktadır. Şekil 4.19'de ise sistemin üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatası sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.21 - Şekil 4.25) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

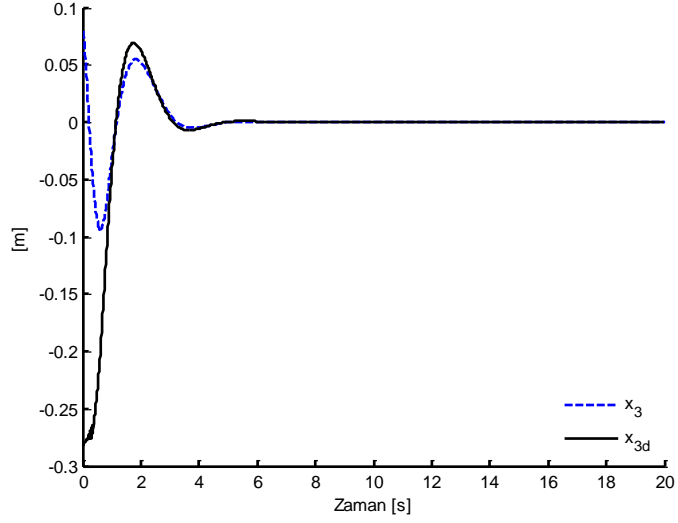
$$x_d = 0.07$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

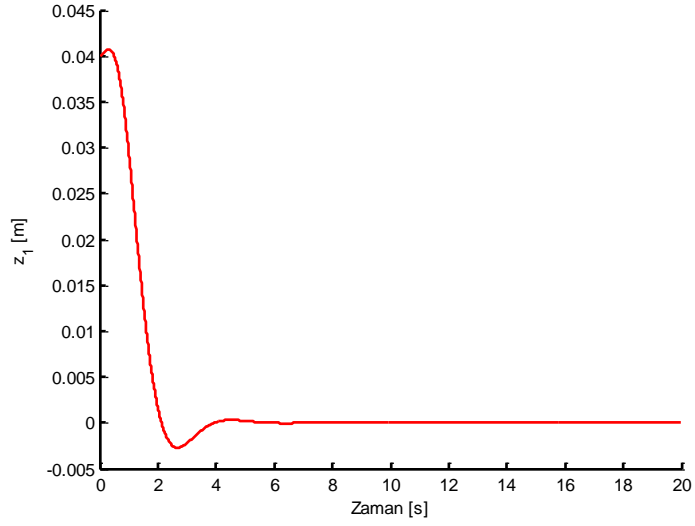
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



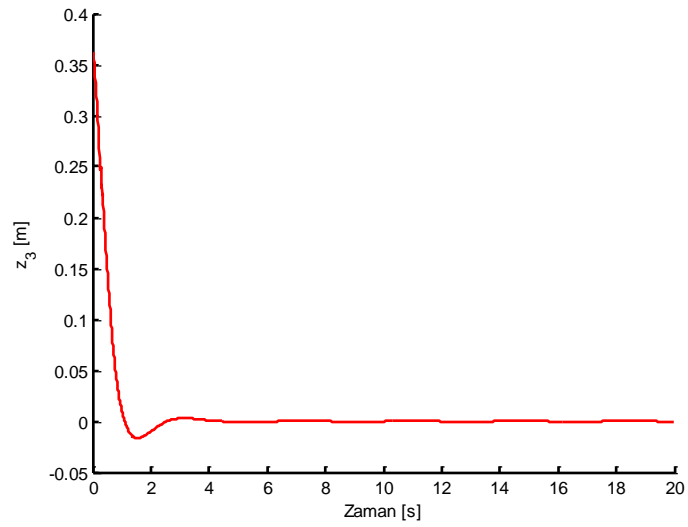
Şekil 4.21: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



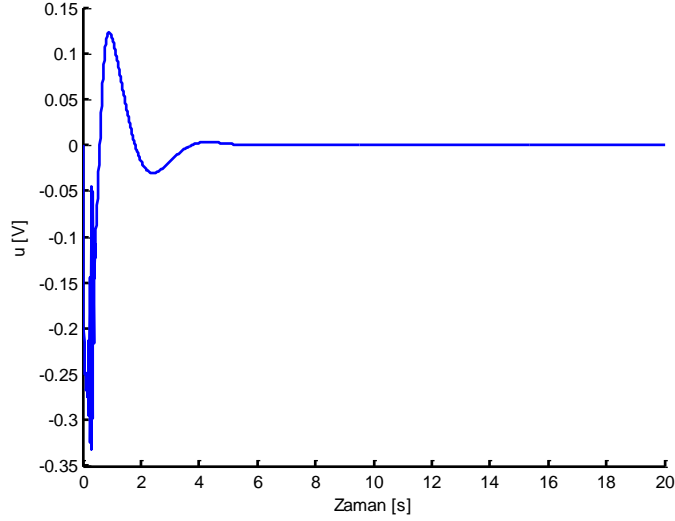
Şekil 4.22: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



Şekil 4.23: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.24: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.25: Kontrol sinyali (QLF)

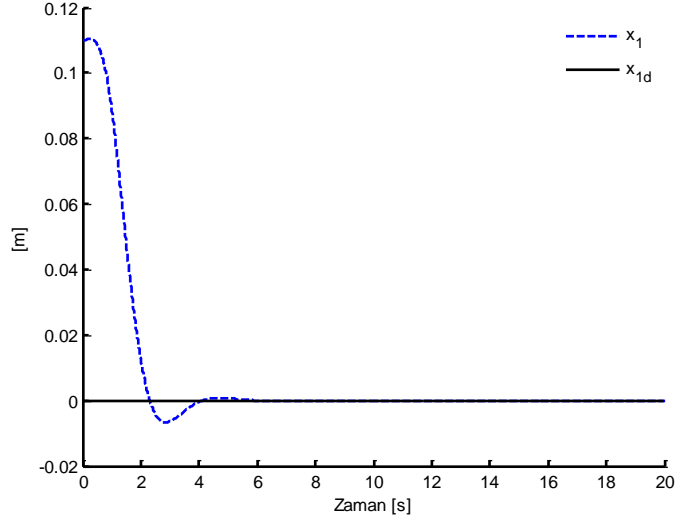
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.07$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, QLF tabanlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.21’de görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 4. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.22’de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 1. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.25’de kontrol sinyali de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’den görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.26 - Şekil 4.30) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

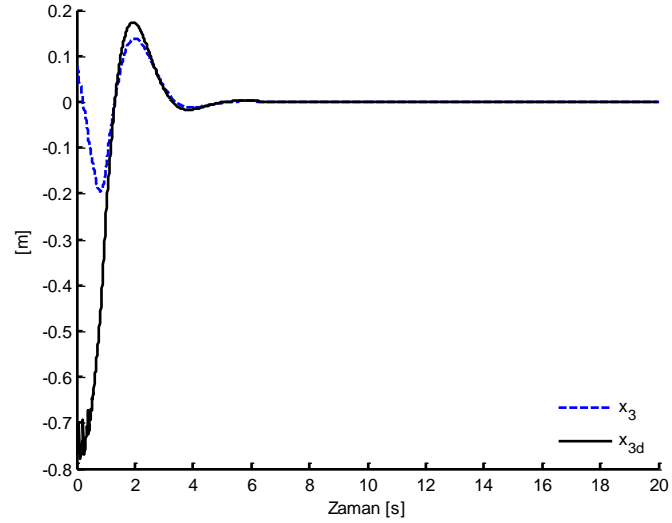
$$x_d = 0$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

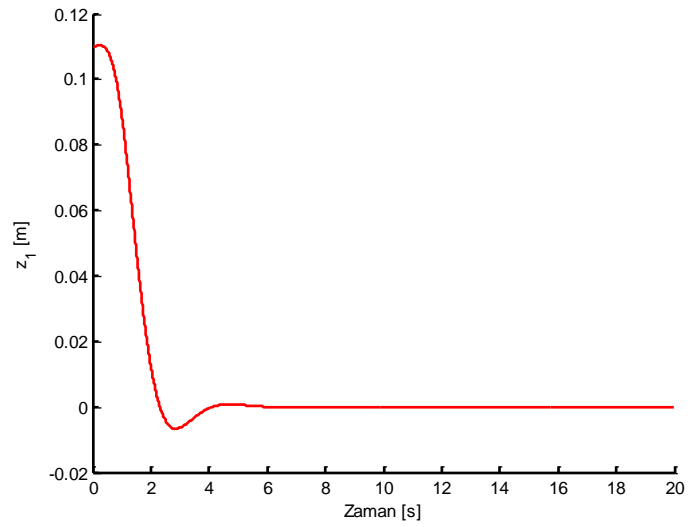
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



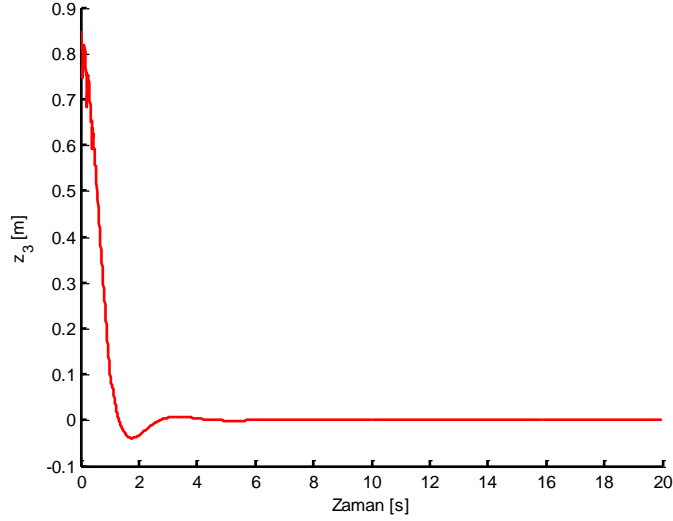
Şekil 4.26: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



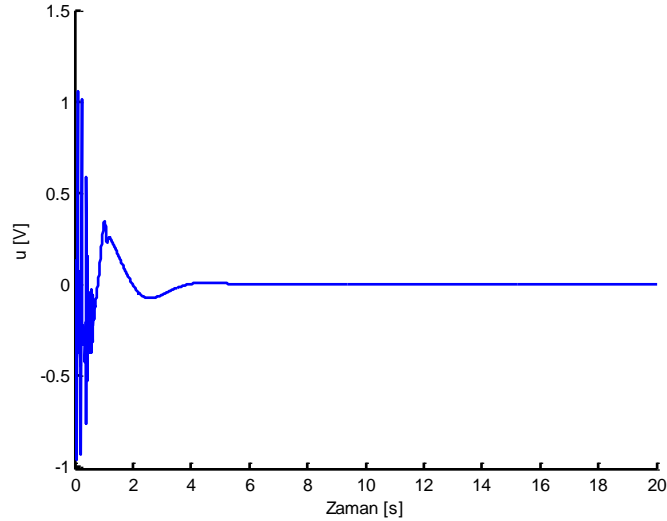
Şekil 4.27: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



Şekil 4.28: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.29: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.30: Kontrol sinyali (QLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, QLF tabanlı geriadımllama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 4. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.27'de sistemin üçüncü durum değişkeni (servo motorun konumu) x_3 ise topu 1. saniyede yakalamaktadır. Şekil 4.30'da kontrol sinyali de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 'dan görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

4.1.1.3 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.1. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan dört adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan top-kiriş sistemine uygulanan, 2.5. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

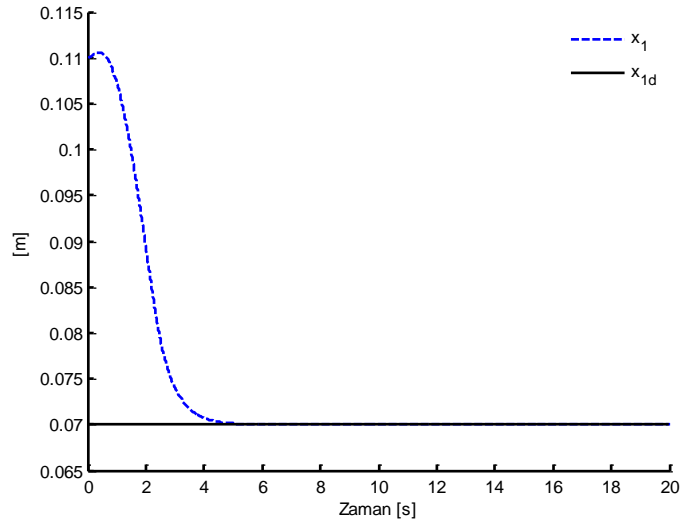
Şekillerde, birinci durum değişkeni ' x_1 ': topun pozisyonunu, ' z_1 ': birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını ve ' u ': kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.31 - Şekil 4.33) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

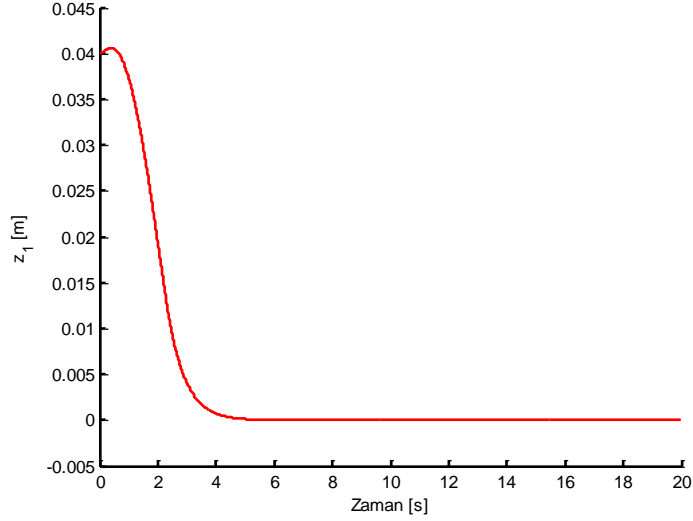
$$x_d = 0.07$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

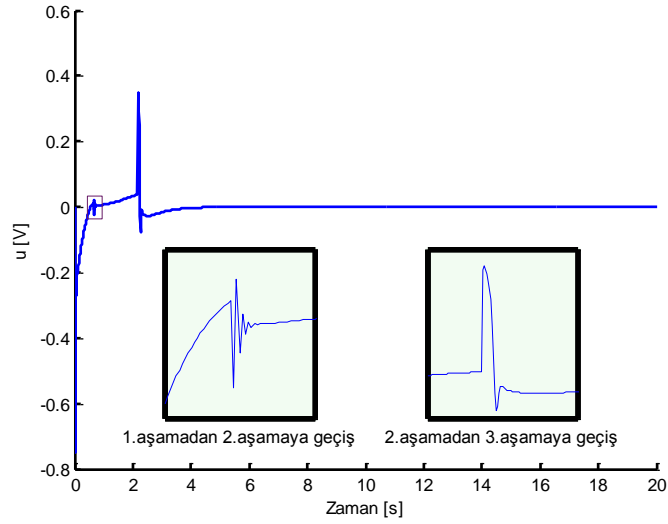
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



Şekil 4.31: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



Şekil 4.32: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.33: Kontrol sinyali (TSBLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.07$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadım kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır sınır işlemleri vasıtasıyla izleme hatası bir yörünge dahilinde sıfıra yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlama kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.041$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1, b_1 = 0.6$, $b_2 = 1.1$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.0162$, $\Delta L_{b1} = 0.0002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.31'den görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hatası sayesinde iyi bir stabilizasyon

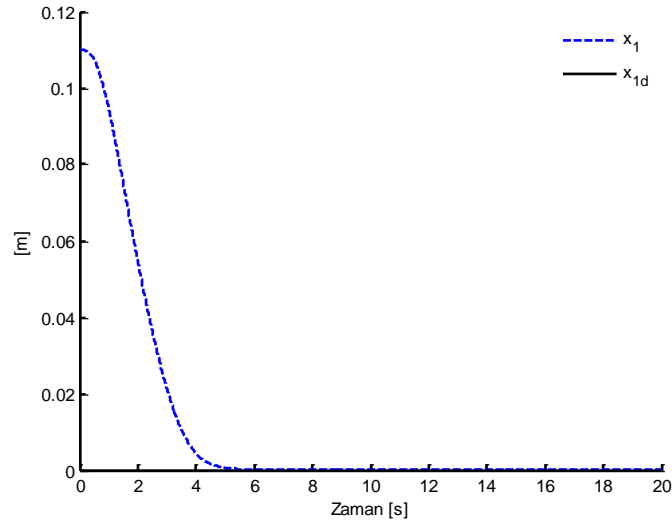
gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 5. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.33'de kontrolde yer alan tüm aşamaların görüldüğü gibi belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.32'den görüldüğü gibi izleme hatası da belirlenen yörünge dahilinde sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.34 - Şekil 4.36) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

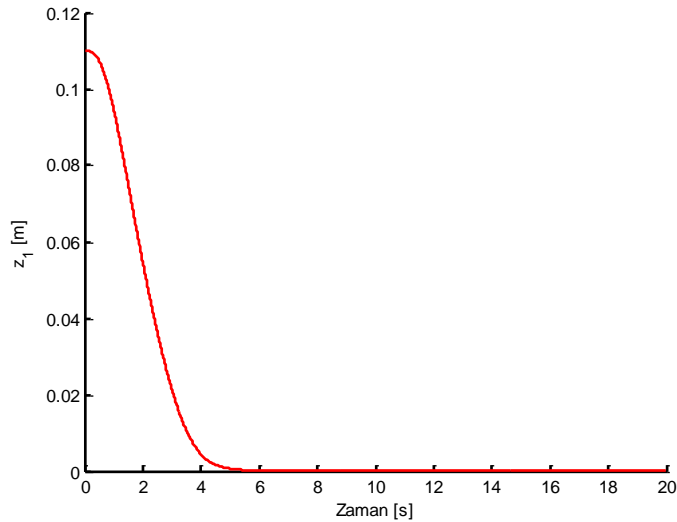
$$x_d = 0$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

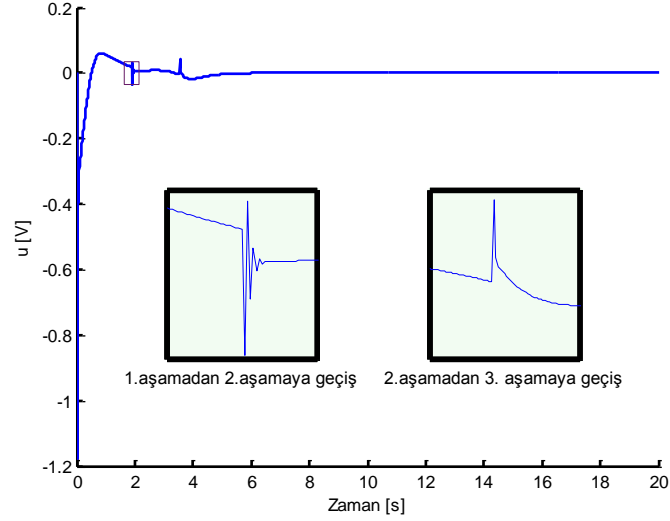
$$x_1 = 0.11, x_2 = 0, x_3 = 0.08, x_4 = 0$$



Şekil 4.34: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



Şekil 4.35: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.36: Kontrol sinyali (TSBLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadım kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır işlemi vasıtasıyla izleme hatası bir yörünge dahilinde sifira yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlama kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.11$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1.2$ $b_1 = 0.7$, $b_2 = 1.4$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.0162$, $\Delta L_{b1} = 0.0002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.34’de görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hatası sayesinde iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 5. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.36’da kontrolde yer alan tüm aşamaların görüldüğü gibi belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.35’den görüldüğü gibi izleme hatası da belirlenen yörünge dahilinde sifira yakınsamaktadır.

4.1.2 Top-Kiriş Sistemi için Gerçek Zamanlı Sonuçlar

4.1.2.1 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.1. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan dört adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan top-kiriş sistemine uygulanan, 2.3. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrolün gerçek zamanlı sonuçları yer almaktadır.

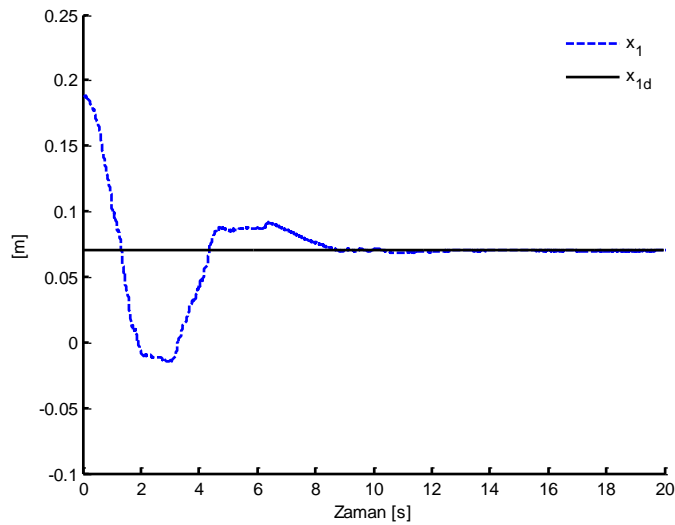
Şekillerde, birinci durum değişkeni ' x_1 ': topun pozisyonunu, ' z_1 ': birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını ve ' u ': kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda gerçek zamanlı sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.37 - Şekil 4.39) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

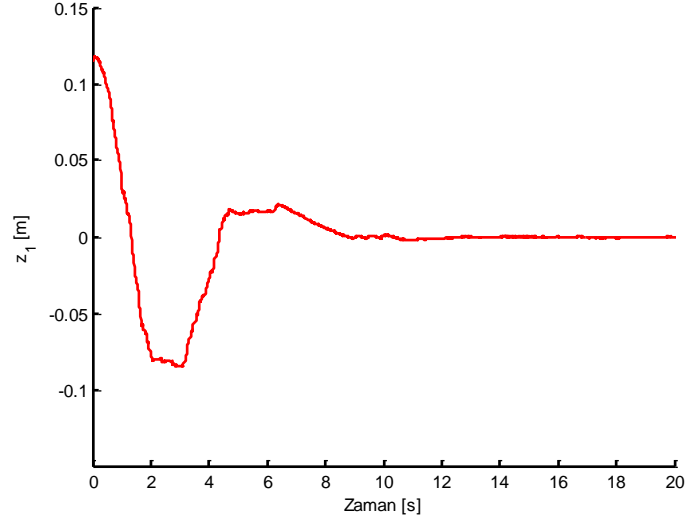
$$x_d = 0.07$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

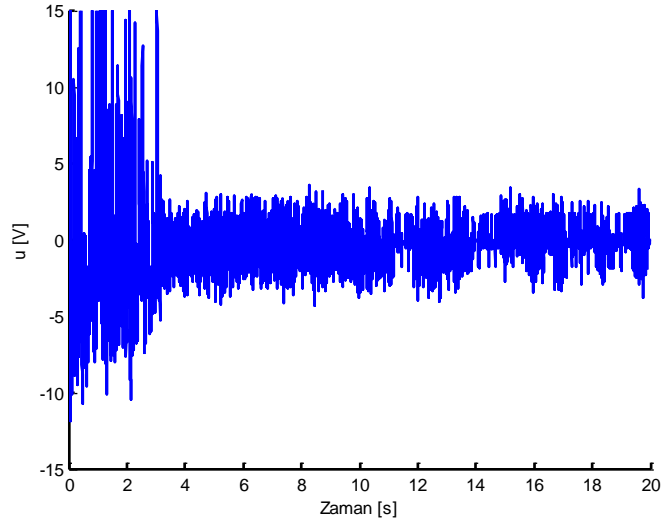
$$x_1 = 0.19, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0$$



Şekil 4.37: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı BLF)



Şekil 4.38: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı BLF)



Şekil 4.39: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı BLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0.07$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot ve 0.001 sn örnekleme zamanında gerçek zamanlı olarak BLF tabanlı kısıtlı geriadımılama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.37'den görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre başlarda gecikmeli ancak iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Gerçek zamanlı top-kiriş sisteminde çalışırken topun belirlenen referansı takip etmesi pek de kolay gerçekleşmemektedir. Çünkü topun pozisyonuna göre değişen servo motorun açısal konumu, topun denge noktasına ulaşmasına dek bir müddet süre geçmektedir. Çünkü bir kiriş düzlemi üzerinde hareket eden bir çelik topun dengede durmasını gerçekleştirmek kolay bir işlem değildir. Sistemin birinci

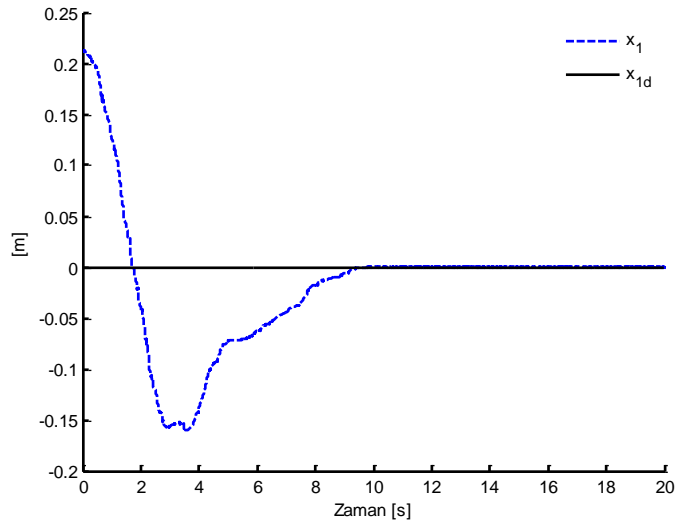
durum değişkeni (topun pozisyonu) verilen referansı 9. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.39’da talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.38’den görüldüğü gibi izleme hatası da sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda gerçek zamanlı sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.40 - Şekil 4.42) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

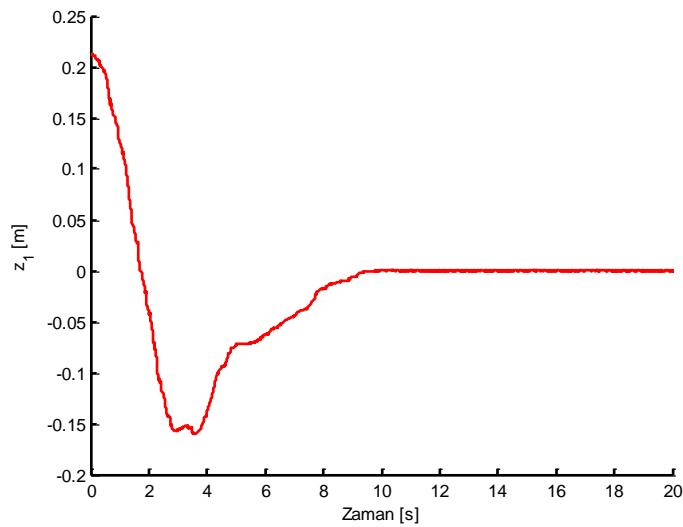
$$x_d = 0$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

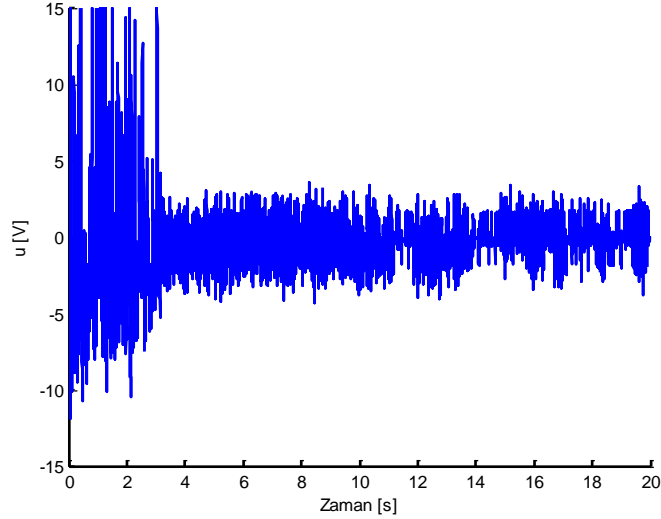
$$x_1 = 0.21, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0$$



Şekil 4.40: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı BLF)



Şekil 4.41: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı BLF)



Şekil 4.42: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı BLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere top-kiriş sistemine; $x_d = 0$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot ve 0.001 sn örnekleme zamanında gerçek zamanlı olarak BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.40’da görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , verilen referansa göre başlarda gecikmeli ancak iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) verilen referansı 10. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.42’de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.41’den görüldüğü gibi izleme hatası da sifıra yakınsamaktadır.

4.1.2.2 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlama Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün Top-Kiriş Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.1. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan dört adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan top-kiriş sistemine uygulanan, 2.5. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrolün gerçek zamanlı sonuçları yer almaktadır.

Şekillerde, birinci durum değişkeni ‘ x_1 ’: topun pozisyonunu, ‘ z_1 ’: birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını ve ‘ u ’: kontrol sinyalini ifade

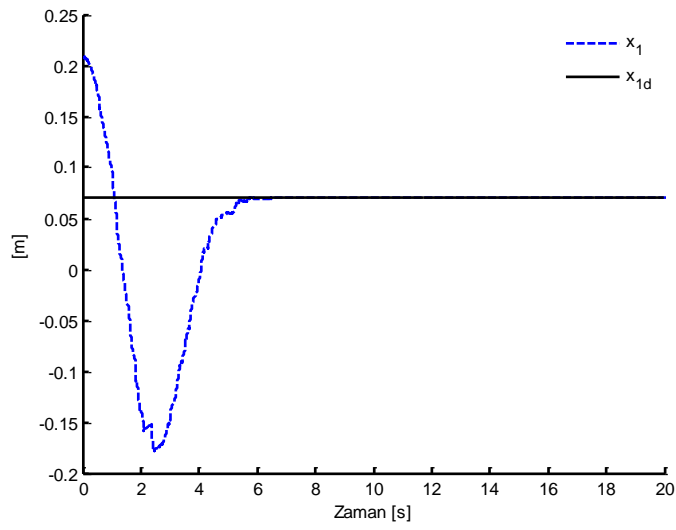
etmektedir.

Aşağıda gerçek zamanlı sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.43 - Şekil 4.45) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

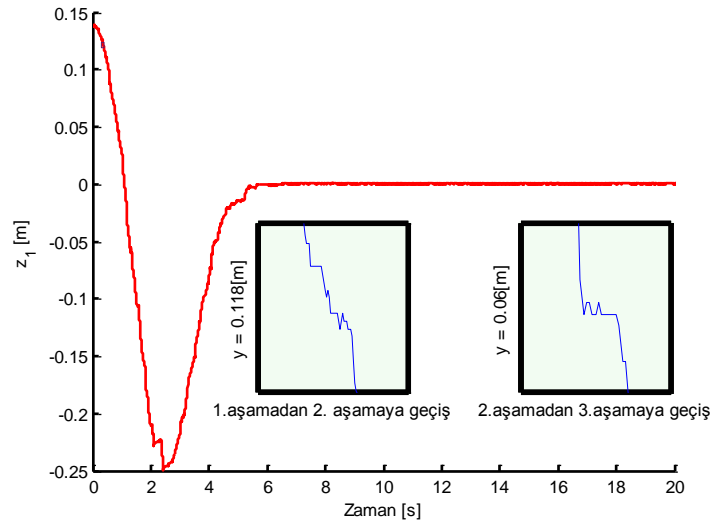
$$x_d = 0.07$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

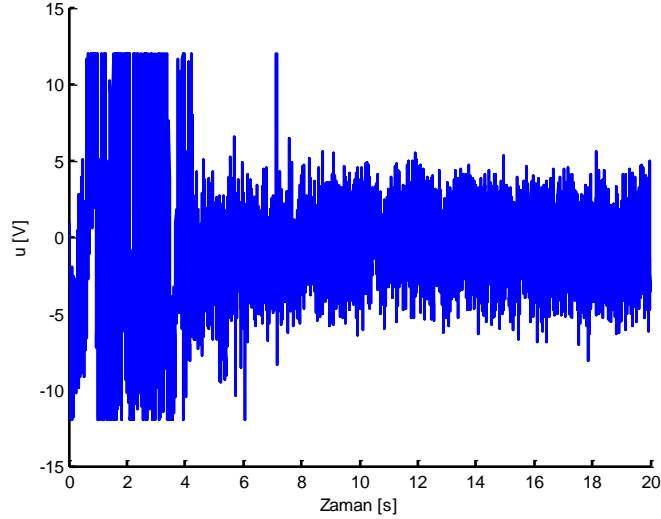
$$x_1 = 0.21, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0$$



Şekil 4.43: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı TSBLF)



Şekil 4.44: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı TSBLF)



Şekil 4.45: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı TSBLF)

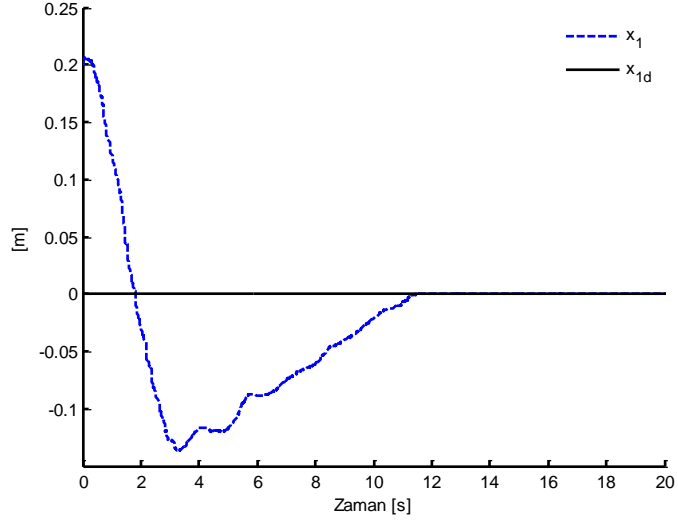
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere gerçek zamanlı olarak top-kiriş sistemine; $x_d = 0.07$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot ve 0.001 sn örnekleme zamanında BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır işlemi vasıtasıyla izleme hatası bir yörünge dahilinde sifıra yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlama kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.14$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1.4$, $b_1 = 0.7$, $b_2 = 1.8$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.062$, $\Delta L_{b1} = 0.002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.43’de görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hatası sayesinde iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 6. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.45’de belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.44’den görüldüğü gibi izleme hatası da belirlenen yörünge dahilinde sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda gerçek zamanlı sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.46 - Şekil 4.48) için verilen referans aşağıdaki gibidir:

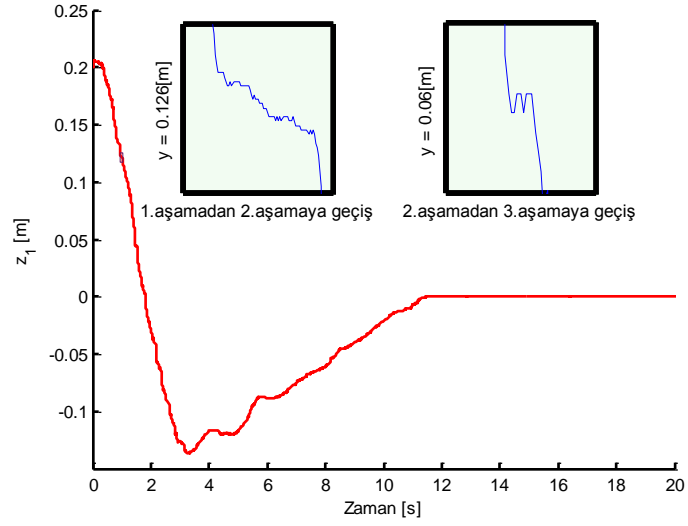
$$x_d = 0$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

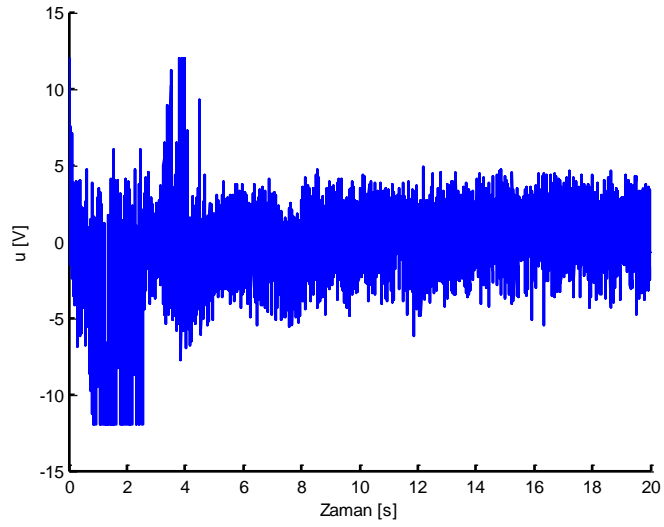
$$x_1 = 0.21, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0$$



Şekil 4.46: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (Gerçek zamanlı TSBLF)



Şekil 4.47: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (Gerçek zamanlı TSBLF)



Şekil 4.48: Kontrol sinyali (Gerçek zamanlı TSBLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere gerçek zamanlı olarak top-kiriş sistemine; $x_d = 0$ referans değerinde, 20 saniyelik bir periyot ve 0.001 sn örnekleme zamanında BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır sınır işlemleri vasıtasıyla izleme hatası bir yörünge dahilinde sifira yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlamalı kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.21$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1.3$, $b_1 = 0.5$, $b_2 = 1.6$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.062$, $\Delta L_{b1} = 0.002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.46'da görüldüğü gibi sistemin tek çıkışı olan birinci durum değişkeni (topun pozisyonu) x_1 , belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hatası sayesinde iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 11. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyali de Şekil 4.48'de belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.47'den görüldüğü gibi izleme hatası da belirlenen yörünge dahilinde sifira yakınsamaktadır.

4.2 İki-Rotorlu Helikopter Sistemi Kontrolü Benzetim Sonuçları

İki-rotorlu helikopter sistemi üzerinde, sadece benzetim ortamında kontroller gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 BLF Tabanlı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.2. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan altı adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanan, 2.3. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

Şekillerde, ' x_1 ': ana pervanenin pozisyonunu, ' x_3 ': yardımcı pervanenin pozisyonunu, ' z_1 ': birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ' z_3 ': üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ' u_1 ': birinci rotorun kontrol

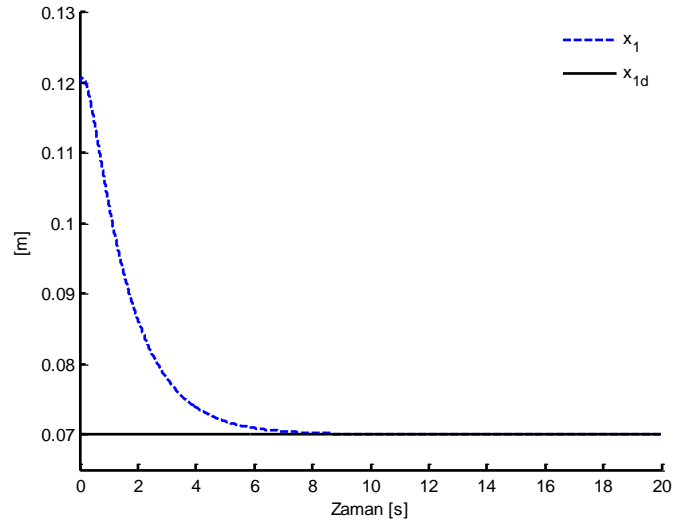
sinyalini ve 'u₂': ikinci rotorun kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.49 - Şekil 4.53) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

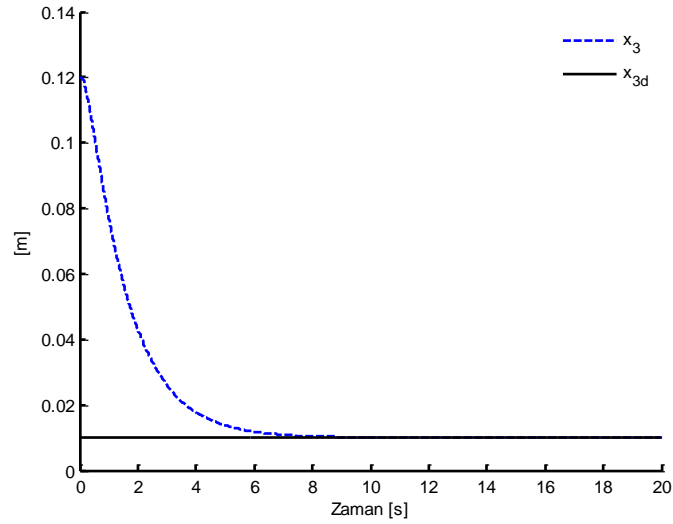
$$\mathbf{x}_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

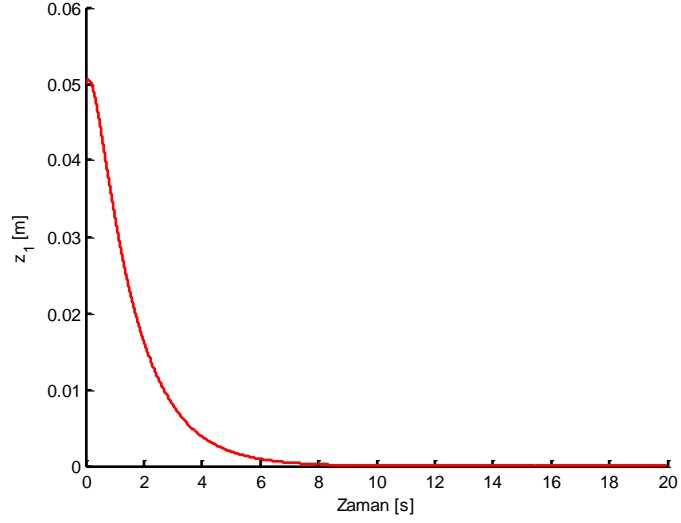
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



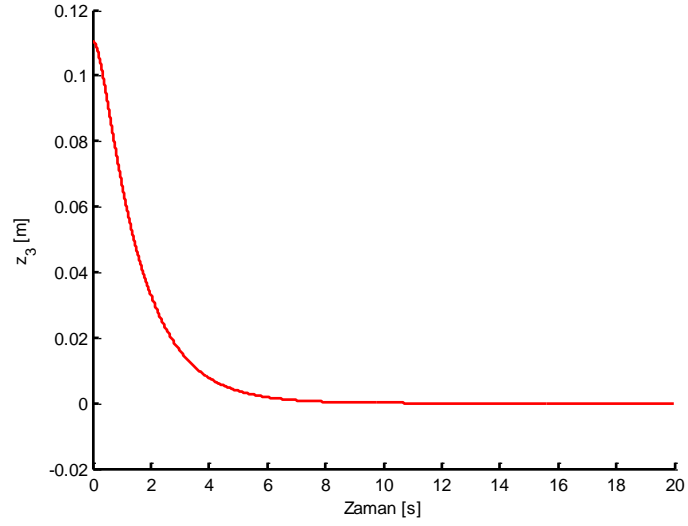
Şekil 4.49: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



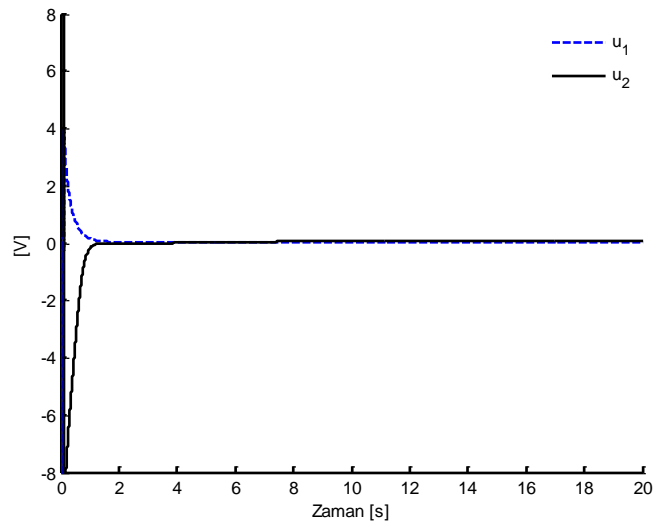
Şekil 4.50: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



Şekil 4.51: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.52: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.53: Kontrol sinyalleri (BLF)

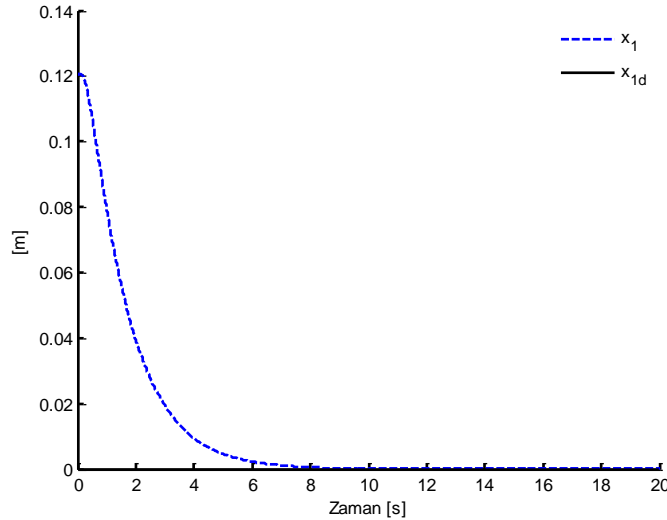
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$ referansları değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'den görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikincisi olan ikinci durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 8. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 'de verilen referansı 8. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.53'de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sıfıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'den görüldüğü gibi izleme hatalarında sıfıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.54 - Şekil 4.58) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

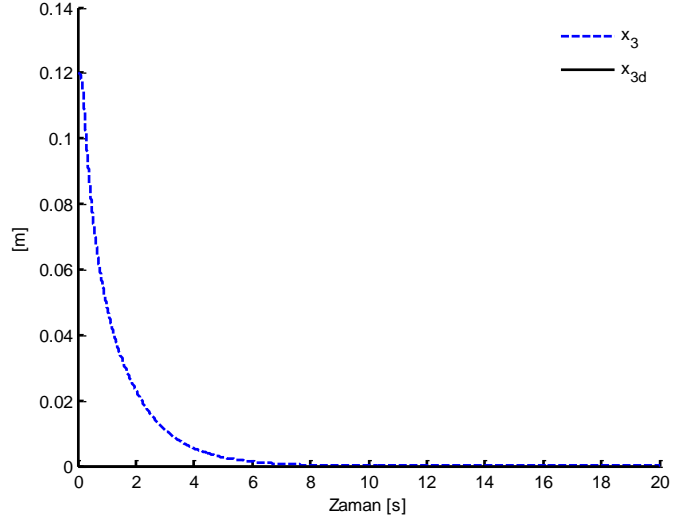
$$x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

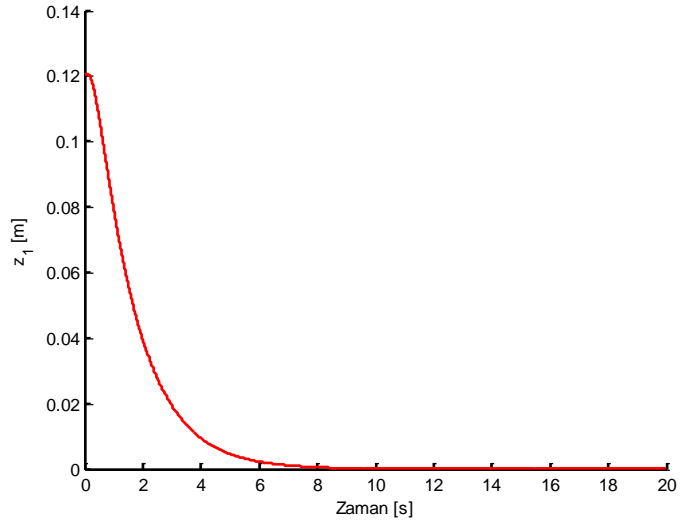
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



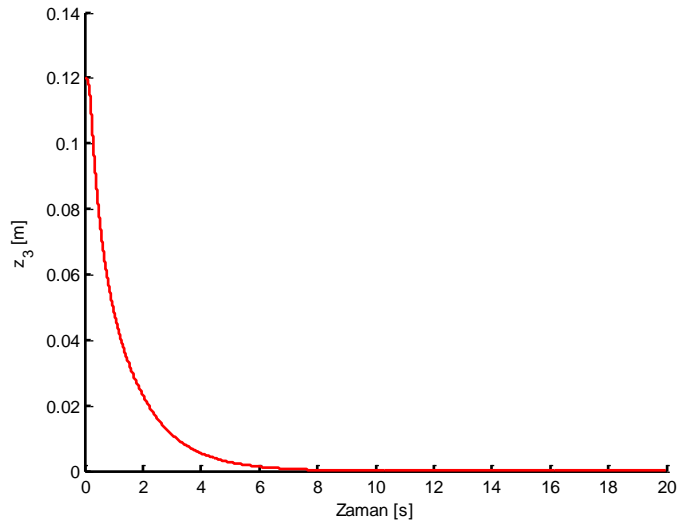
Şekil 4.54: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



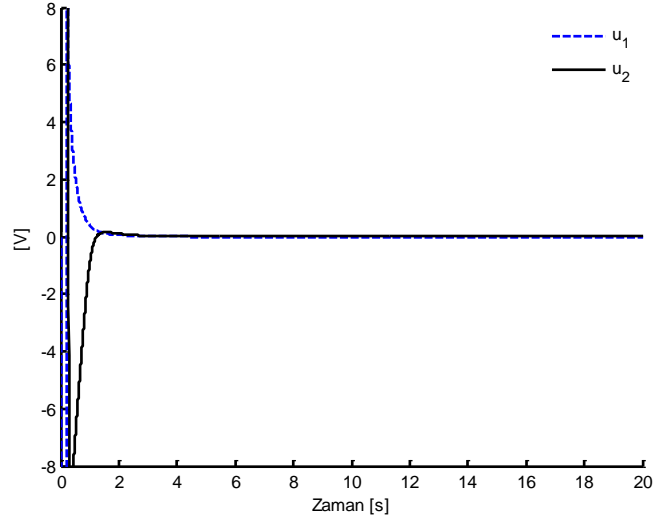
Şekil 4.55: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (BLF)



Şekil 4.56: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.57: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (BLF)



Şekil 4.58: Kontrol sinyalleri (BLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$ referansları değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'den görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikincisi olan ikinci durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 , verilen referansa göre iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 8. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 'de verilen referansı 8. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.58'de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sıfıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'den görüldüğü gibi izleme hatalarında sıfıra yakınsamaktadır.

4.2.2 QLF Tabanlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.2. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan altı adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanan, 2.4. bölümde formülizasyonu açıklanan QLF tabanlı geriadımlama kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

Şekillerde, ' x_1 ': ana pervanenin pozisyonunu, ' x_3 ': yardımcı pervanenin

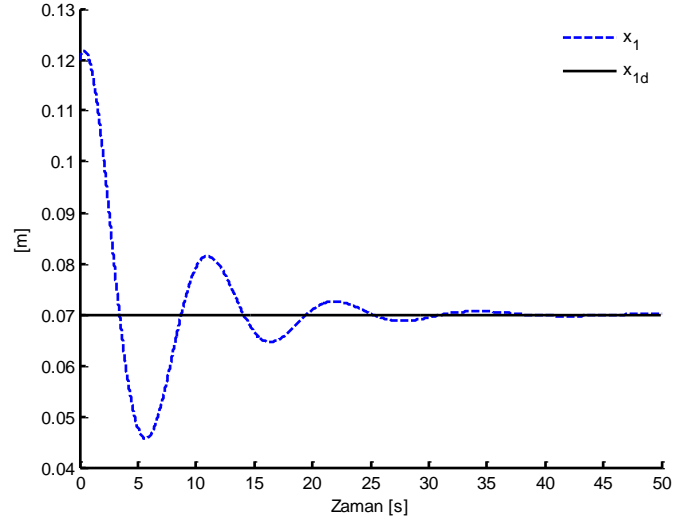
pozisyonunu, ‘ z_1 ’: birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ‘ z_3 ’: üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ‘ u_1 ’: birinci rotorun kontrol sinyalini ve ‘ u_2 ’: ikinci rotorun kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.59 - Şekil 4.63) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

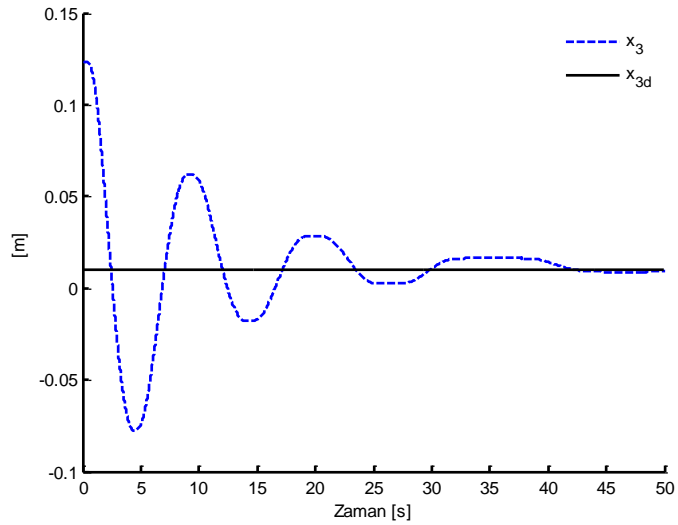
$$\mathbf{x}_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

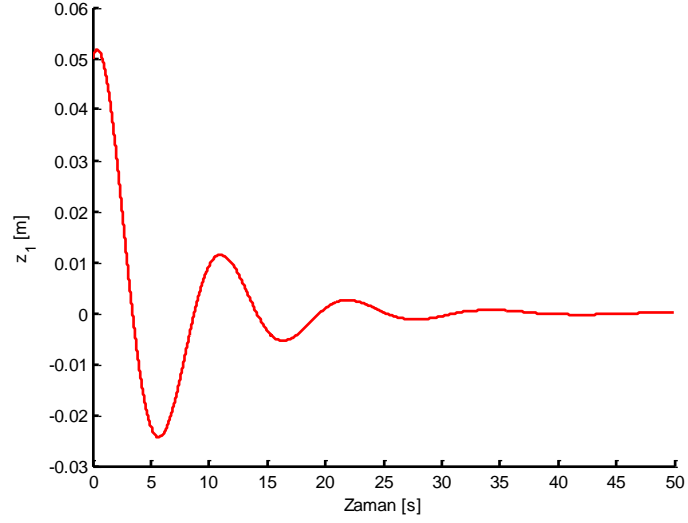
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



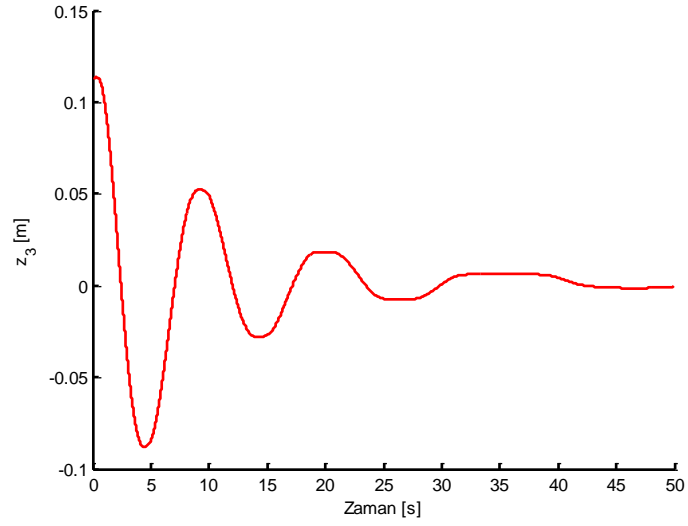
Şekil 4.59: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



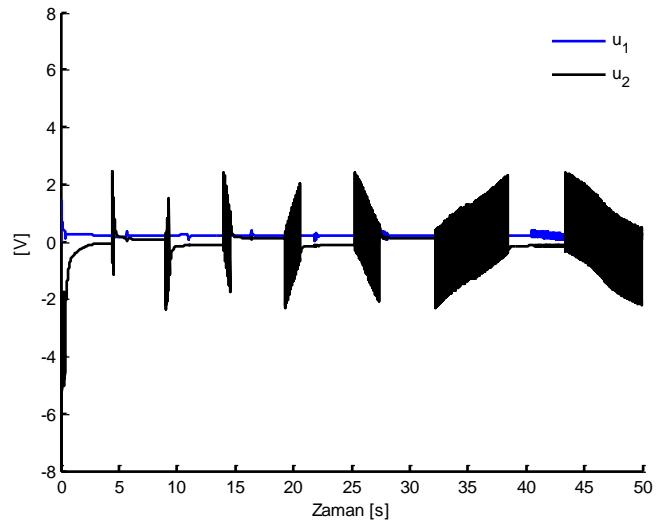
Şekil 4.60: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



Şekil 4.61: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.62: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.63: Kontrol sinyalleri (QLF)

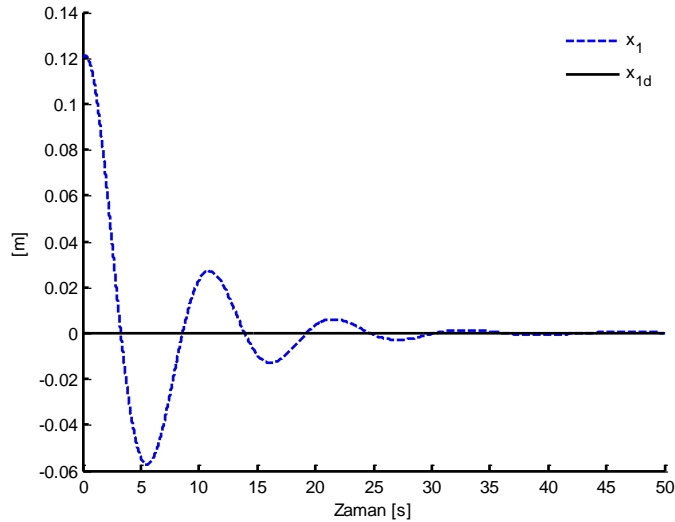
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$ referansları değerinde, 50 saniyelik bir periyot dahilinde, QLF tabanlı geriadımllama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'dan görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikincisi olan ikinci durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 , verilen referansa göre geç bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 37. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 ise verilen referansı 42. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.63'de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'den görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.64 - Şekil 4.68) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

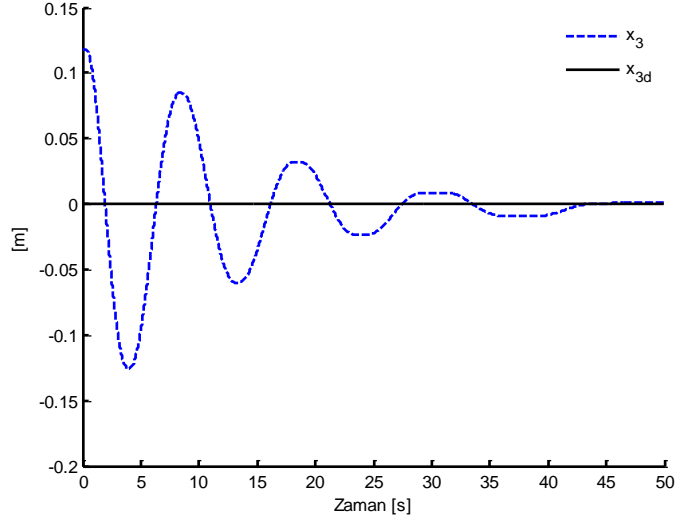
$$x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

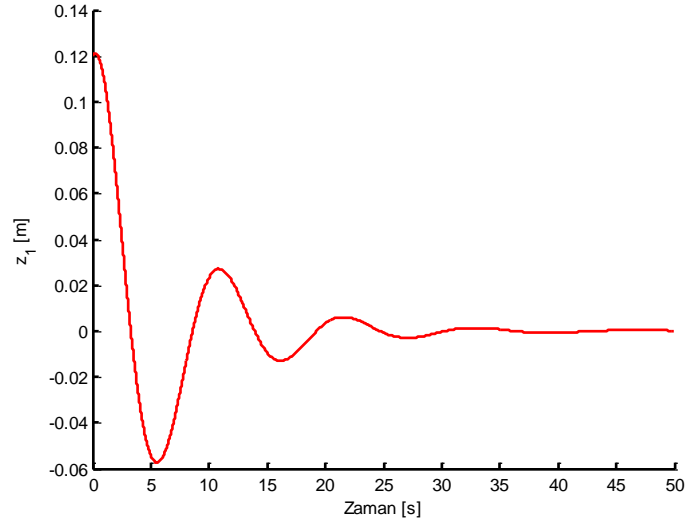
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



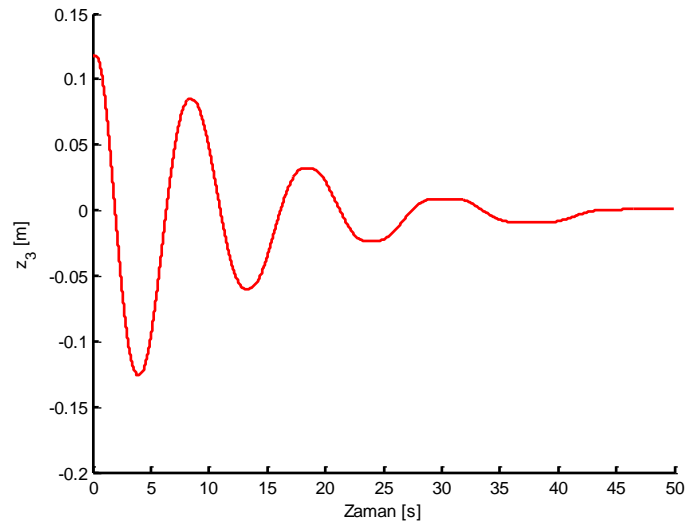
Şekil 4.64: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



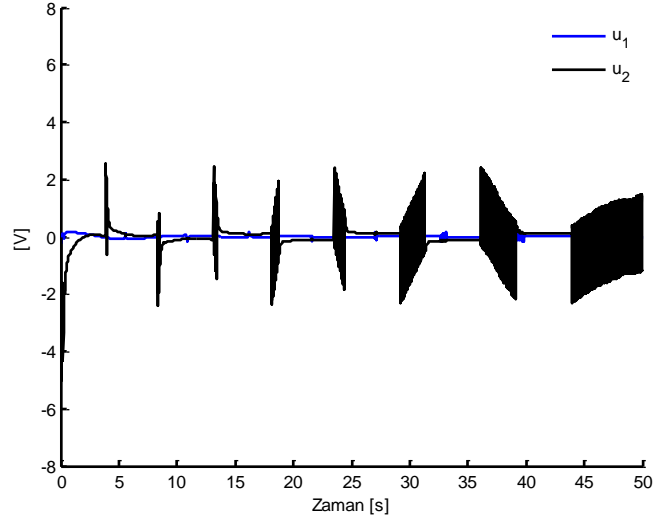
Şekil 4.65: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (QLF)



Şekil 4.66: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.67: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (QLF)



Şekil 4.68: Kontrol sinyalleri (QLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$ referansları değerinde, 50 saniyelik bir periyot dahilinde, QLF tabanlı geriadımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'den görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikincisi olan ikinci durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 , verilen referansa göre geç bir stabilizasyon gerçekleştirmiştir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 30. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 ise verilen referansı 45. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.68'de talep edilen stabilizasyon noktasına bağlı olarak sifıra yakınsayarak çıkış vermektedir. Şekil 4.66 ve Şekil 4.67 'den görüldüğü gibi izleme hatalarında sifıra yakınsamaktadır.

4.2.3 BLF Tabanlı Üç Aşama Anahtarlamalı Kısıtlı Geriadımlama Kontrolün İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanması

Aşağıda, 3.2. bölümde durum değişkenleri ve durum uzay denklemleri açıklanan altı adet doğrusal olmayan durum değişkenine sahip olan iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanan, 2.5. bölümde formülizasyonu açıklanan BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrolün benzetim sonuçları yer almaktadır.

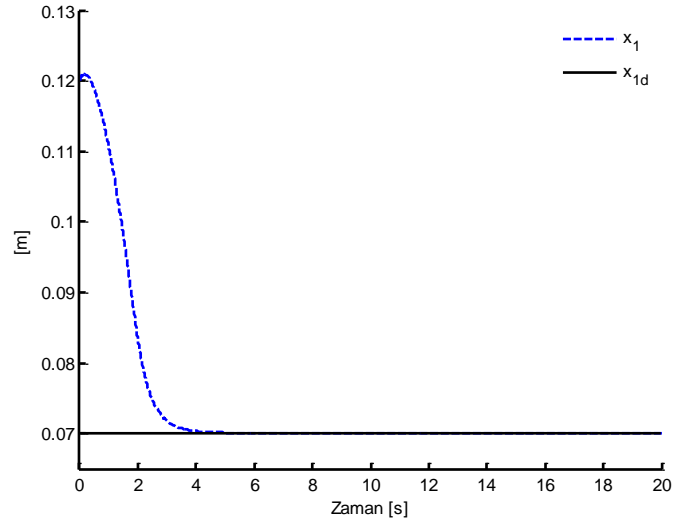
Şekillerde, ' x_1 ': ana pervanenin pozisyonunu, ' x_3 ': yardımcı pervanenin pozisyonunu, ' z_1 ': birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ' z_3 ': üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatasını, ' u_1 ': birinci rotorun kontrol sinyalini ve ' u_2 ': ikinci rotorun kontrol sinyalini ifade etmektedir.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.69 - Şekil 4.73) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

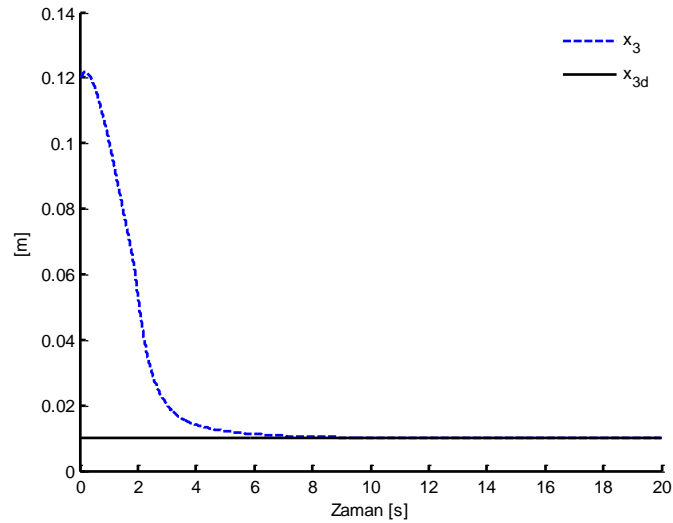
$$\mathbf{x}_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

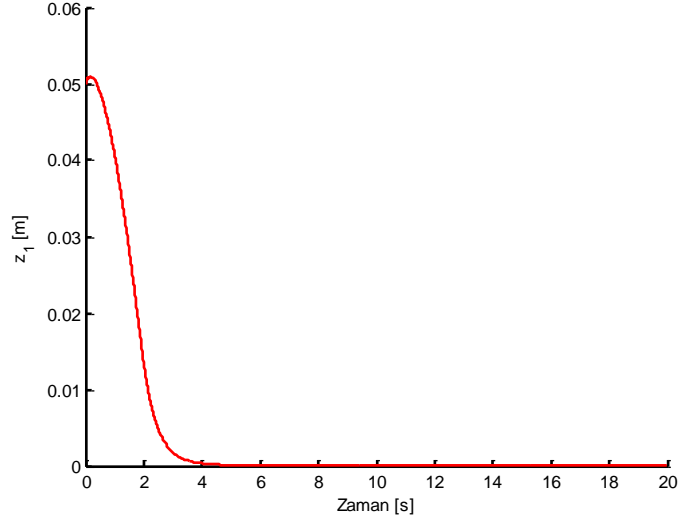
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



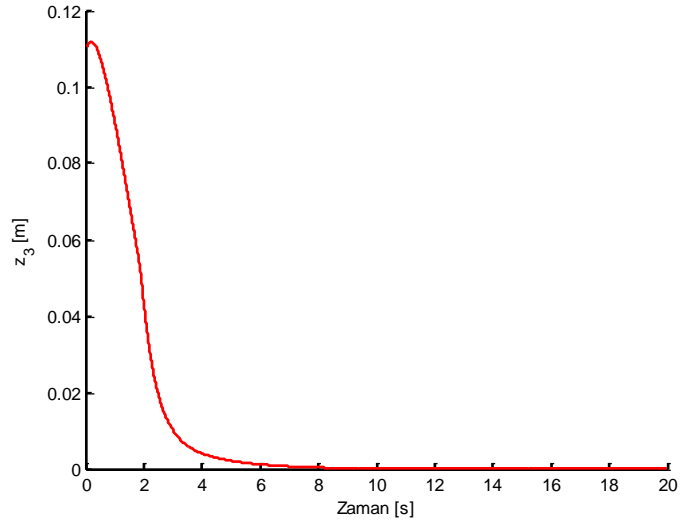
Şekil 4.69: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



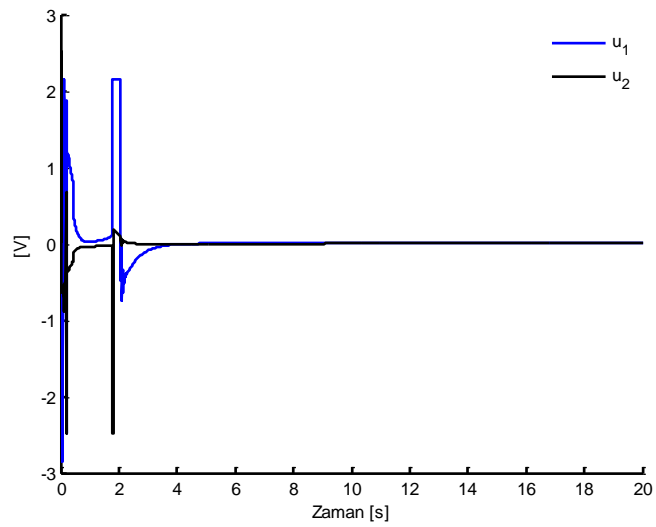
Şekil 4.70: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



Şekil 4.71: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.72: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.73: Kontrol sinyalleri (TSBLF)

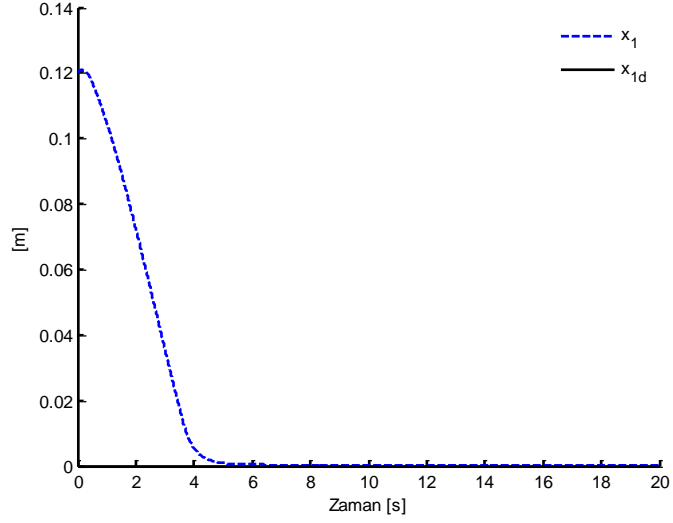
Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0.07; 0.01]$ referansları değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımılama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır sınır işlemleri vasıtasıyla izleme hataları bir yörünge dahilinde sifira yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlamalı kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.051$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1.1$, $b_1 = 0.5$, $b_2 = 1.3$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.022$, $\Delta L_{b1} = 0.002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.69 ve Şekil 4.70'den görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikinci çıkış olan üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 ; belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hataları sayesinde iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 4. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni ise referansı 8. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.73'de görüldüğü gibi belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'den görüldüğü gibi izleme hataları da belirlenen yörünge dahilinde sifira yakınsamaktadır.

Aşağıda benzetim sonuçları verilen grafikler (Şekil 4.74 – Şekil 4.78) için verilen referans aşağıdaki gibidir.

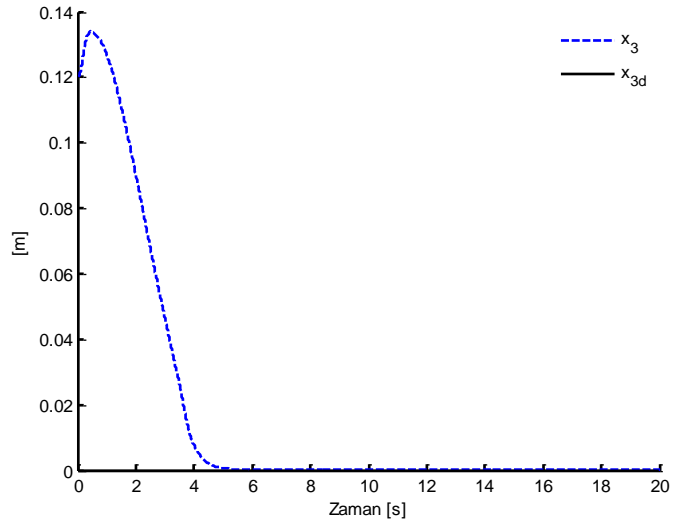
$$x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$$

Kontrol yönteminin başlangıç noktaları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

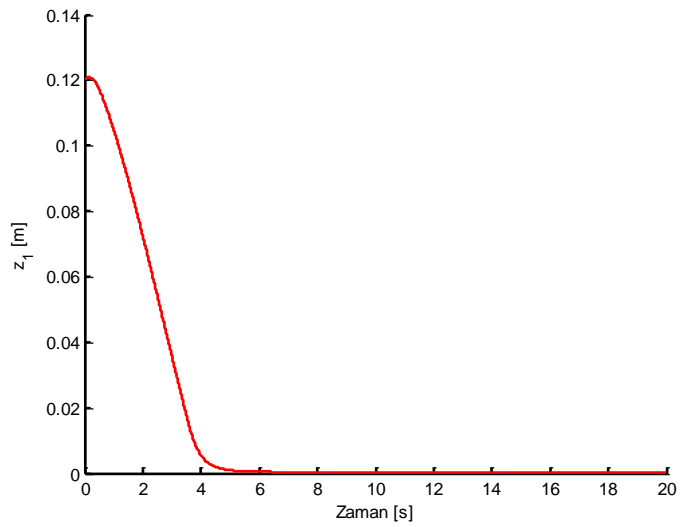
$$x_1 = 0.12, x_2 = 0.01, x_3 = 0.12, x_4 = 0.005, x_5 = 0.12, x_6 = 0$$



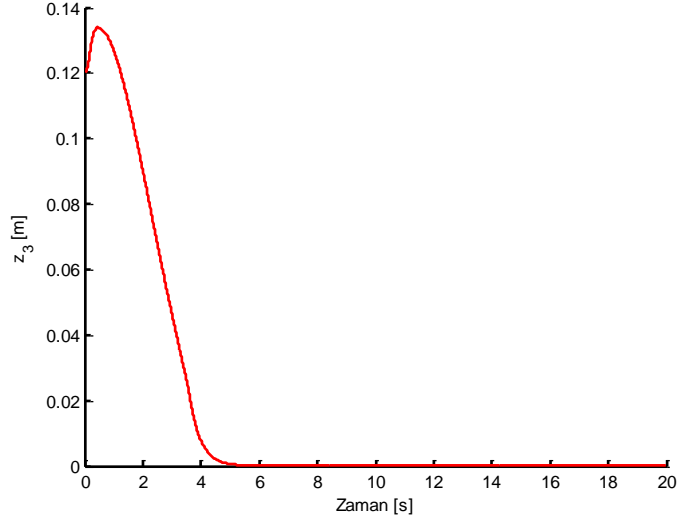
Şekil 4.74: Birinci durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



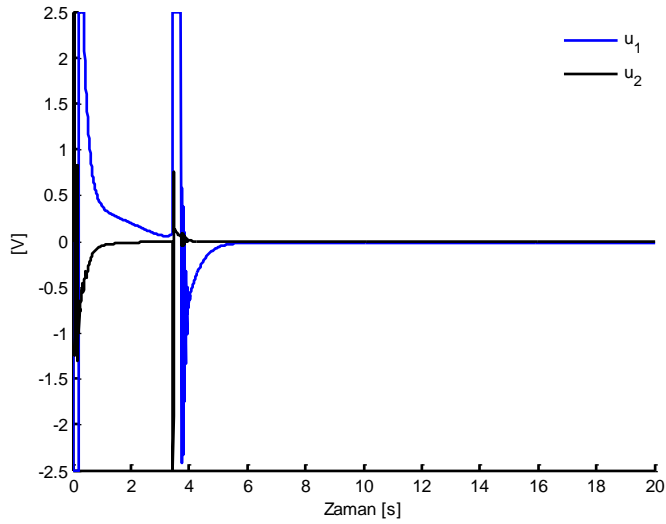
Şekil 4.75: Üçüncü durum değişkeninin referans izlemesi (TSBLF)



Şekil 4.76: Birinci durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.77: Üçüncü durum değişkeninin izleme hatası (TSBLF)



Şekil 4.78: Kontrol sinyalleri (TSBLF)

Kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere iki-rotorlu helikopter sistemine; $x_d = [x_1; x_3] = [0; 0]$ referansları değerinde, 20 saniyelik bir periyot dahilinde, BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadım kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanması için belirlenen bir dizi sınır işlemi vasıtasıyla izleme hataları bir yörünge dahilinde sifıra yakınsamıştır. Bu referansta kullanılan üç aşama anahtarlama kontrol yönteminin parametreleri; birinci aşamada yer alan rampa değeri $k_{b1} = 0.12$, ikinci aşamada yer alan sınır sabitleri; $b = 1.2$, $b_1 = 0.45$, $b_2 = 1.4$ ve üçüncü aşamada kullanılan rampa değerleri ise $L_{b1} = 0.022$, $\Delta L_{b1} = 0.002$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.75 ve Şekil 4.78'den görüldüğü gibi sistemin iki çıkışından birincisi olan birinci durum değişkeni (ana

pervanenin pozisyonu) x_1 ve ikinci çıkış olan üçüncü durum değişkeni (yardımcı pervanenin konumu) x_3 ; belirlenen sınır işlemleri vasıtasıyla elde edilen izleme hataları sayesinde iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin birinci durum değişkeni verilen referansı 5. saniyede yakalamaktadır. Sistemin üçüncü durum değişkeni ise birinci durum değişkeni ile aynı olarak referansı 5. saniyede yakalamaktadır. Kontrol sinyalleri de Şekil 4.78’de görüldüğü gibi belirlenen referansta iyi bir stabilizasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4.76 ve Şekil 4.77’den görüldüğü gibi izleme hataları da belirlenen yörünge dahilinde sifıra yakınsamaktadır.

5. UYGULAMA SONUÇLARI PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, önceki bölümlerde anlatılan kontrol metotları ile elde edilen izleme sonuçları mutlak hataların toplamı ‘ $Toplam\ hata = \int_0^T |e| dt$ ’ ; oturma zamanı ‘ t_s ’ ve hataların şekilleri ile karşılaştırılmıştır.

5.1 Benzetim Ortamında Top-Kiriş Sistemine Uygulanılan Kısıtlı Geradımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = 0.07$ referans değeri ve $x = [0.11; 0; 0.08; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının toplamları ve oturma zamanları Tablo 5.1’de gösterilmektedir.

Tablo 5.1: Top-kiriş sistemine $x_d = 0.07$ referans değerinde uygulanılan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamları

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geradımlama kontrol	10.4387	11. saniye
QLF tabanlı geradımlama kontrol	5.5499	4. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geradımlama kontrol	8.2406	5. saniye

Tablo 5.1’den görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen top-kiriş sistemine uygulanan kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geradımlama kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geradımlama kontrole nazaran hata toplamını 10.4387’den 8.2406’ya çekmiştir. Belirlediğimiz bir dizi sınır işlemleri vasıtasıyla izleme hatasının kararlı bir şekilde

çıkış vermesi sağlandığı için BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrole göre hata toplamı azalmıştır ve daha kısa sürede izleme kontrolü gerçekleştirmiştir. QLF tabanlı geriadımleme kontrol ise aynı başlangıç değerleri için 5.5499 gibi daha az hata toplamına sahiptir.

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = 0$ referans değeri ve $x = [0.11; 0; 0.08; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının toplamı ve oturma zamanları Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2: Top-kiriş sistemine $x_d = 0$ referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrol	27.4717	11. saniye
QLF tabanlı geriadımleme kontrol	16.4526	4. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımleme kontrol	23.2495	5. saniye

Tablo 5.2’de görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen top-kiriş sistemine uygulanan kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımleme kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrole nazaran hata toplamını 27.4717’den 23.2495’e çekmiştir. Belirlediğimiz bir dizi sınır işlemleriyle elde edilen üç aşama anahtarlama BLF tabanlı geriadımleme kontrol $x_d = 0$ referansında da BLF tabanlı kısıtlı geriadımleme kontrole nazaran hata toplamının azaltılmasını ve daha kısa sürede izleme kontrolünü gerçekleştirmiştir. Bu referansta da hata toplamı en az kontrol yöntemi, QLF tabanlı geriadımleme kontrol yöntemidir. 16.4526 gibi bir hata toplamı değerine sahiptir.

5.2 Gerçek Zamanlı Top-Kiriş Sistemine Uygulanılan Kısıtlı Geriadımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = 0.07$ referans değeri ve $x = [0.21; 0; 0; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının toplamları ve oturma zamanları Tablo 5.3’de gösterilmektedir.

Tablo 5.3: Top-kiriş sistemine $x_d = 0.07$ referans değerinde uygulanılan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamları

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol	335.0044	9. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol	620.3284	6. saniye

Tablo 5.3’de görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen top-kiriş sistemine uygulanan gerçek zamanlı kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole nazaran hata toplamını 335.0044’den 620.3284’e arttırmıştır. Oturma zamanlarına bakıldığında ise BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol 6 saniye gibi bir oturma zamanıyla BLF tabanlı kısıtlı geriadımlamalı kontrole nazaran daha iyi bir izleme kontrolü gerçekleştirmiştir. Belirlediğimiz bir dizi sınır işlemleriyle elde edilen BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrolün gerçek zamanlı uygulamasında; ikinci aşamada yer alan kontrol yapısının iki yörünge dahilinde izleme hatasını sıfıra çekme esnasında çelik top kiriş üzerinde hızlanarak izleme hatasının BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole nazaran daha fazla çıkmasına neden olmuştur. Bu da gerçek zamanlı sistemlerde çalışmanın bir zorluğudur. Kontrol parametresi olmayan QLF tabanlı geriadımlama kontrol yöntemi gerçek zamanlı olarak çalışmamıştır.

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = 0$ referans değeri ve $x = [0.21; 0; 0; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının toplamları ve oturma zamanları Tablo 5.4’de gösterilmektedir.

Tablo 5.4: Top-kiriş sistemine $x_d = 0$ referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamları

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol	773.2278	10. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol	907.9987	11. saniye

Tablo 5.4’de görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen top-kiriş sistemine uygulanan gerçek zamanlı kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole nazaran hata toplamını 773.2278’den 907.9987’ye arttırmıştır. Belirlediğimiz bir dizi sınır işlemleriyle elde edilen BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrolün gerçek zamanlı uygulamasında; ikinci aşamada yer alan kontrol yapısı nedeniyle bu referans değerinde de izleme hatasının BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole nazaran daha fazla çıkmasına neden olmuştur. Oturma zamanları ise iki kontrolde de yakın gerçekleşmiştir.

5.3 Benzetim Ortamında İki-Rotorlu Helikopter Sistemine Uygulanılan Lyapunov Fonksiyon Tabanlı Geriadımlama Yöntemlerinin Sonuçlarının Analizi

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = [0.07; 0.01]$ referans değeri ve $x = [0.12; 0.01; 0.12; 0.005; 0.12; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci ve üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının

toplamları ve oturma zamanları Tablo 5.5’de gösterilmektedir.

Tablo 5.5: İki-rotorlu helikopter sistemine $x_d = [0.07; 0.01]$ referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamları

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Üçüncü izleme hatası (z_3) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları	Kontroller sonucu x_3 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol	90.2946	186.0483	8. saniye	8. saniye
QLF tabanlı geriadımlama kontrol	25.3639	76.0631	37. saniye	42. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol	8.2745	20.9954	4. saniye	8. saniye

Tablo 5.5’de görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanan kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol ve QLF tabanlı geriadımlama kontrole nazaran çok daha iyi bir kontrol ve izleme yaparak; birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatası toplamını 8.2745 değerine, üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatası toplamını ise 20.9954 değerine çekmiştir. QLF tabanlı geriadımlama kontrol ise BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole göre hata toplamlarını azaltmıştır. Belirlediğimiz bir dizi sınır işlemleri vasıtasıyla izleme hatalarının belirlenen yörüngede bir çıkışı sağlandığı için BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı

kısıtlı geriadımlama kontrolün kullanılması, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrolü ve QLF tabanlı geriadımlama kontrole göre bu sistemde daha avantajlıdır.

20 saniyelik bir periyot dahilinde; $x_d = [0; 0]$ referans değeri ve $x = [0.12; 0.01; 0.12; 0.005; 0.12; 0]$ sistemin başlangıç değerleri olmak koşuluyla birinci ve üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatalarının toplamı ve oturma zamanları Tablo 5.6’da gösterilmektedir.

Tablo 5.6: İki-rotorlu helikopter sistemine $x_d = [0; 0]$ referans değerinde uygulanan kısıtlı kontrol yöntemlerinin izleme hatalarının toplamı

Uygulanılan kontrol	Birinci izleme hatası (z_1) üzerinde oluşan hata toplamı	Üçüncü izleme hatası (z_3) üzerinde oluşan hata toplamı	Kontroller sonucu x_1 ‘in oturma zamanları	Kontroller sonucu x_3 ‘in oturma zamanları
BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol	217.8367	149.3521	8. saniye	8. saniye
QLF tabanlı geriadımlama kontrol	57.7947	107.2236	30. saniye	45. saniye
BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol	28.2709	33.7907	5. saniye	5. saniye

Tablo 5.6’da görüldüğü üzere tüm kontrollerde; aynı referans ve aynı başlangıç değerleri verilen iki-rotorlu helikopter sistemine uygulanan kontroller sonucu; BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol, BLF

tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol ve QLF tabanlı geriadımlama kontrole nazaran çok daha iyi bir kontrol ve izleme gerçekleştirerek; birinci durum değişkeni üzerindeki izleme hatası toplamını 28.2709 değerine, üçüncü durum değişkeni üzerindeki izleme hatası toplamını ise 33.7907 değerine çekmiştir. Bu referans değerinde de BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol; QLF ve BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrollere göre daha iyi bir kontrol gerçekleştirmiştir.

Genel olarak, iki sistem için benzetim ortamında uygulanan kontrollerin sonuçlarına bakıldığında; BLF tabanlı üç aşama anahtarlamalı kısıtlı geriadımlama kontrol, BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrole nazaran hata toplamını azaltarak daha iyi bir kontrol ve izleme gerçekleştirmiştir. QLF tabanlı geriadımlama kontrol metodunda çıkan hata toplamının az olması sistem için bir avantaj değildir. Çünkü BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol sayesinde sistemlerin izleme hatalarına kısıt getirilerek istenilen sınır değerleri aralığında çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ancak QLF tabanlı kontrolde, böyle bir sınırlandırma işlemi mümkün değildir. Sistemlerdeki bu sınır gereksinimi göz önüne alındığında; BLF tabanlı kısıtlı kontrol yöntemlerinin kullanılması en idealidir.

6. SONUÇ

Endüstride hataya tahammül seviyesi sınırlı olan sistemlerin fiziksel sınır değerine göre optimum kontrolün zorunluluk olması sebebiyle, hem hata toplamlarının istenilen seviyede azaltılması hem de fiziki sınır aralıklarına bağlı olarak kararlı bir şekilde kontrol gerçekleştirebilmek için, kısıtlı kontrol yöntemlerinin kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. Bu gerekçelerle, tez çalışmasında genel olarak sistemlerin izleme hatasının çıkışlarının sınırlandırılması ve sistemlerin istenilen çalışma noktalarında kararlı bir şekilde çalışabilmesi için kısıtlı Lyapunov fonksiyonu temelli kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Top-kiriş sistemine; hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak, iki-rotorlu helikopter sistemine ise sadece benzetim ortamında; BLF tabanlı kısıtlı geriadımlama kontrol, QLF tabanlı geriadımlama kontrol ve BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmadaki temel amaç; bariyer Lyapunov tabanlı geriadımlama kontrol yöntemleri ile izleme hatasına kısıt koyularak çıkışın sınırlandırılması ve kararlı bir kontrolün gerçekleştirilmesidir.

Uygulama sonuçları incelendiğinde; top-kiriş sistemine benzetim uygulanması sonucunda BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol hata toplamları performansı açısından QLF tabanlı geriadımlama kontrole nazaran daha kötü sonuçlar üretmiştir. Fakat izleme hatalarına bakıldığında BLF tabanlı geriadımlama kontrol ve BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol izleme hatasına kısıt konarak sonuçlar üretmiştir. QLF tabanlı geriadımlama kontrol kararsız top-kiriş sistemine gerçek zamanlı olarak uygulanamamış olup, BLF tabanlı kontrolün önemi ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, QLF tabanlı geriadımlama kontrolün benzetim ortamında daha küçük hata performansı üretmesinin önemi yoktur. İki-rotorlu helikopter sistemine benzetim ortamında uygulanan sonuçlara bakıldığında ise; BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı geriadımlama kontrol tüm referanslar için daha iyi izleme sonuçları ve daha iyi izleme performansları sağlamıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda; BLF tabanlı üç aşama anahtarlama kısıtlı kontrolün MIMO sistemlere gerçek zamanlı olarak uygulanması planlanan çalışmalardan biridir.

7. KAYNAKLAR

Açıkmeşe, B., Corless M., “Stability analysis with quadratic Lyapunov functions: Some necessary and sufficient multiplier conditions, *Systems & Control Letters*”, Volume 57, Issue 1, Pages 78-94, (2008).

Blinov, A.P., “The problem of constructing a Lyapunov function, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*”, Volume 49, Issue 5, Pages 557-560, (1985).

Bridges, M. M., Dawson, D. M., Abdallah, C. T., “Control of Rigid-Link, Flexible-Joint Robots - a Survey of Backstepping Methods,” *Journal of Robotic Systems*, 12, 199-216, (1995).

Chalupa, P., Příkryl, J. and Novák, J., “Modelling of Twin Rotor MIMO System,” *Procedia Engineering*, Volume 100, Pages 249-258, ISSN 1877-7058, (2015).

Corless, M., “Robust analysis and design with quadratic Lyapunov functions,” pp 181–184, *Control Engineering Practice*, Volume 2, Issue 4, Page 710, (1994).

Ezzabi, A.A.; Cheok, K.C.; Alazabi, F.A., "A nonlinear backstepping control design for ball and beam system," *Circuits and Systems (MWSCAS), 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on*, vol., no., pp.1318,1321, (2013).

Feedback, Twin Rotor System User Manuel, (2010).

Frazzoli, E., Dahleh, M. A. and Feron, E., “Trajectory tracking control design for autonomous helicopters using a backstepping algorithm,” *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, Vols 1-6, 4102-4107, (2000).

Freeman, R.A. and Kokotović, P.V., “Backstepping Design of Robust Controllers for a Class of Nonlinear Systems,” In *IFAC Symposia Series*, edited by M. Fliess, Pergamon, Oxford, Pages 431-436, (1993)

Geleceği Yazanlar Ekibi, “Jiroskop(Gyroscope)", <https://gelecegiyazanlar.turkcell.com.tr/konu/windows-phone/egitim/windows-phone-201/jiroskop-gyroscope> (2014)

Jiang, Z.P. and Nijmeijer, H., "Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping," *Automatica* 33, 7, 1393-1399, (1997).

Komarova, G.L. and Leonov, G.A., "On estimating the attraction regions of the equilibrium states of dynamic systems by the direct Lyapunov method," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Volume 49, Issue 6, Pages 688-694, (1985).

Koo, M.S, Choi, H.L. and Lim, J.T., "Adaptive Nonlinear Control of a Ball and Beam System Using The Centrifigal Force Term," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Volume 8, Number 9, pp. 5999-6009, (2012).

Krstic, M., Kanellakopoulos, I. and Kokotovic, P. V., "Nonlinear and adaptive control design," New York ; Chichester: Wiley, (1995).

Kumpati S. Narendra and James H. Taylor, "Lyapunov functions for nonlinear time-varying systems," *Information and Control*, Volume 12, Issue 5, Pages 378-393, (1968).

Manuel A. D., Mermoud, N.A., Camacho, J.A. and Castro G.R., "Using general quadratic Lyapunov functions to prove Lyapunov uniform stability for fractional order systems," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 22, Issues 1–3, Pages 650-659, (2015).

Ngo, K.B., Mahony, R. and Jiang, Z.P. "Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints," In Proc. 44th IEEE conf. decision & control (pp. 8306–8312), (2005).

Niu, B. and Zhao, J., "Tracking control for output-constrained nonlinear switched systems with a barrier Lyapunov function," *International Journal of Systems Science*, 44, 978-985, (2013) .

Olfati, R., Lids, S., Olfati, R. and Megretski, S.A., "Controller Design for the Beam-and-Ball System," Proc. of the 37th Conf. on Decision and Control, 4-4555, (1998).

Quanser, Ball and Beam User Manual, (2008).

Pyatnitskiy, Ye.S. and Skorodinskiy, V.I., "Numerical methods of Lyapunov function construction and their application to the absolute stability problem," *Systems & Control Letters*, Volume 2, Issue 2, Pages 130-135, (1982).

Stalford, H., "Stability conditions for nonlinear control processes using Lyapunov functions with discontinuous derivatives," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Volume 84, Issue 2, Pages 356-371, (1981).

Tee, K.P, Ge, S.S. and Tay E.H., "Barrier Lyapunov Functions for the control of output-constrained nonlinear systems," *Automatica*, Volume 45, Issue 4, Pages 918-927, (2009).

Tee, K.P. and Ge, S.S., "Control of nonlinear systems with full state constraint using a Barrier Lyapunov Function," *Decision and Control*, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on, vol., no., pp.8618,8623, 15-18, (2009).

Tee, K. P. and Ge, S. S., "Control of nonlinear systems with partial state constraints using a barrier Lyapunov function," *International Journal of Control*, 84, 2008-2023, (2011).

Veretennikov, V.G and Zaitsev, V.V., "The use of lyapunov's second method to estimate regions of stability and attraction," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Volume 48, Issue 5, Pages 514-522, (1984).

Wellstead, P., "Ball and Beam System", <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/ball-and-beam1.pdf>, (2010).

Yan, F., Wang J., "Input constrained non-equilibrium transient trajectory shaping control for a class of nonlinear systems," *Decision and Control (CDC)*, 2010 49th IEEE Conference on , vol., no., pp.5156,5161, (2010).

Yan, F. and Wang, J., "Input constrained non-equilibrium transient trajectory shaping via a three-stage control method for a class of non-linear systems," *Control Theory & Applications*, IET , vol.6, no.3, pp.375,383, (2012).

8. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Faruk DEMİRKIRAN

Doğum Yeri ve Tarihi : Gaziantep – 12.08.1990

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : demirkiranfaruk@hotmail.com

İlgi Alanları : Geriadımlama kontrol, optimizasyon, doğrusal olmayan kontrol, regresyon, sistem tanılama, yapay sinir ağları, uyarlamalı kontrol, robot kinematiği, güneş enerji panel sistemleri, tıp elektroniği, hidrolik-pnomatik sistemler

İletişim Adresi : Yunus Emre Mah. 6425 Nolu Sk. No:14 Şen Apt. Kat 2 Daire:4 Denizli