

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR GİMBAL SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ, TANILANMASI VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan KALKAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

TEMMUZ 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR GİMBAL SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ, TANILANMASI VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Batuhan KALKAN
(503211609)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayhan KURAL

TEMMUZ 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**MODELLING, IDENTIFICATION AND REAL-TIME CONTROL OF A
TWO-DEGREE-OF-FREEDOM GIMBAL SYSTEM**

M.Sc. THESIS

**Batuhan KALKAN
(503211609)**

Department of Mechanical Engineering

System Dynamics and Control Programme

Thesis Advisor: Doç. Dr. Ayhan KURAL

JULY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503211609 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Batuhan KALKAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR GİMBAL SİSTEMİNİN MODELLENMESİ, TANILANMASI VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ayhan KURAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Senem KURŞUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 Mayıs 2025
Savunma Tarihi : 25 Temmuz 2025





Aileme ve Ülkeme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana verdiği danışmanlık ve destekleri için değerli tez danışmanım Doç. Dr. Ayhan KURAL'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde sağladığı altyapı ve teknik imkanlardan dolayı BMC Otomotiv San. Ve Tic. A.Ş.'ye; ayrıca bilgi, tecrübe ve anlayışlarıyla katkı sunan değerli yöneticilerim Oğuz Korkut KİBAROĞLU, Süleyman BİDECİ ve Mehmet TATLISU'ya ve ayrıca verdiği desteklerden dolayı Mehmetemin KARAHASAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Her koşulda sabırları ve destekleriyle yanımda olan aileme en derin şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2025

Batuhan KALKAN
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	4
1.3 Hipotez	14
2. MODELLEME VE SİSTEM TANILAMA	17
2.1 Doğrusal Modelleme ve Tanılama	17
2.1.1 Matematik model	18
2.1.2 Sistem tanılama uygulaması	22
2.1.3 Doğrusal modelin elde edilmesi	24
2.2 Doğrusal Olmayan Modelleme ve Tanılama	31
2.2.1 Sürtünme modeli	33
2.2.1.1 LuGre sürtünme modeli	33
2.2.1.2 Yanca eksenli LuGre sürtünme modelinin oluşturulması	36
2.2.1.3 Yükseliş eksenli LuGre sürtünme modelinin oluşturulması	38
2.2.2 Kütle dengesizliği modeli	39
2.2.2.1 Yanca eksenli kütle dengesizliği tanımlanması	41
2.2.2.2 Yükseliş eksenli kütle dengesizliği tanımlanması	44
2.2.3 Jirooskop modeli	47
2.3 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modellerin Karşılaştırılması	48
2.3.1 Yanca eksenli model seçimi	49
2.3.2 Yükseliş eksenli model seçimi	51
3. KONTROLÇÜ TASARIMLARI	55
3.1 Kontrol Yöntemleri	56
3.1.1 Oransal-Integral (PI) kontrol yöntemi	56
3.1.2 Super Twisting Kayan Kipli Kontrol (ST-KKK) yöntemi	57
3.1.3 İleri besleme yönteminin kontrol yapısına entegrasyonu	60
3.2 Genetik Algoritma ile Kontrol Kazançlarının Optimizasyonu	61
3.2.1 Amaç fonksiyonları	64
3.2.2 Yanca eksenli için kontrol kazançlarının bulunması	64
3.2.3 Yükseliş eksenli için kontrol kazançlarının bulunması	65
3.3 Kontrolcü Performanslarının Karşılaştırılması	66
3.3.1 Yanca eksenli kontrolcü performansları	67

3.3.1.1 PI kontrolcü seçimi.....	67
3.3.1.2 PI+İleri besleme kontrolcü seçimi.....	71
3.3.1.3 ST-KKK kontrolcü seçimi	77
3.3.1.4 ST-KKK+İleri besleme kontrolcü seçimi	81
3.3.2 Yükseliş eksenli kontrolcü performansları.....	87
3.3.2.1 PI kontrolcü seçimi.....	87
3.3.2.2 PI+İleri besleme kontrolcü seçimi.....	91
3.3.2.3 ST-KKK kontrolcü seçimi	97
3.3.2.4 ST-KKK+İleri besleme kontrolcü seçimi	101
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	107
4.1 Tek Eksenli Çalışma Durumunda Kontrolcü Performansları.....	107
4.1.1 Yanca eksenli kontrolcü seçimi.....	108
4.1.2 Yükseliş eksenli kontrolcü seçimi.....	112
4.2 İki Eksenli Eş Zamanlı Çalışması Durumunda Performansı.....	116
4.3 Bant Genişliği Tespiti.....	120
5. STABİLİZASYON VE GÜRBÜZLÜK SİMÜLASYONLARI.....	123
5.1 Stabilizasyon Performansı Simülasyonları.....	123
5.1.1 Statik durum stabilizasyon performansı.....	123
5.1.2 APG parkuru stabilizasyon performansı	126
5.1.3 Sinüs parkuru stabilizasyon performansı	129
5.2 Atış Şoku Kontrol Performansı Simülasyonu	129
5.3 Monte Carlo ile Kontrolcü Gürbüzlük Analizleri	131
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	141

KISALTMALAR

APG	: Aberdeen Proving Ground – Aberdeen Test Sahası
ARW	: Angle Random Walk – Açısal Rastgele Yürüyüş
DA	: Doğru akım
GA	: Genetik Algoritma
KKK	: Kayan Kipli Kontrol
PI	: Proportional Integral – Oransal İntegral
PID	: Proportional Integral Derivative – Oransal İntegral Türevsel
PRBS	: Pseudorandom Binary Sequence – Sözde Rastgele İkili Dizi
ST-KKK	: Super Twisting Kayan Kipli Kontrol



SEMBOLLER

T_b	: Statik sürtünme momenti
T_c	: Sabit hızla hareket için Coulomb sürtünme momenti
T_f	: LuGre sürtünme modeli sonucu tahmin edilen sürtünme momenti
v_s	: Stribeck fonksiyonu karakteristik geçiş hızı
σ_0	: Yay katsayısı
σ_1	: İç sönümleme katsayısı
σ_2	: Viskoz sürtünme katsayısı
B	: Viskoz sürtünme katsayısı
i	: Armatür devresinden geçen akım
J	: Motor ve faydalı yükün atalet momenti
K_b	: Back EMF sabiti
K_t	: Tork sabiti
L	: Armatür sargılarının endüktansı
R	: Armatür sargılarının elektriksel direnci
T	: Motorun ürettiği elektromekanik tork
V	: Armatüre uygulanan gerilim
$s(v)$	: Stribeck fonksiyonu
v	: İki yüzey arasındaki bağıl hız
w	: Motor şaftının açısal hızı
z	: İç sürtünme durumu
ξ	: Stribeck fonksiyonu şekil faktörü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yanca eksenini sistem tanılama sonuçları.	27
Çizelge 2.2 : Yükseliş eksenini sistem tanılama sonuçları.	30
Çizelge 2.3 : Yanca eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı parametre değerleri.	36
Çizelge 2.4 : Yanca eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı öncesi parametre değerleri.	37
Çizelge 2.5 : Yükseliş eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı parametre değerleri.	38
Çizelge 2.6 : Yükseliş eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı öncesi parametre değerleri.	38
Çizelge 2.7 : Yanca eksenini farklı hızlar için kütle dengesizliği polinom katsayıları.	41
Çizelge 2.8 : Yükseliş eksenini farklı hızlar için kütle dengesizliği polinom katsayıları.	44
Çizelge 2.9 : Yanca eksenini doğrusal ve doğrusal olmayan model karşılaştırması. ...	49
Çizelge 2.10 : Yükseliş eksenini doğrusal ve doğrusal olmayan model karşılaştırması.	52
Çizelge 3.1 : Gimbal sistemi performans istekleri.	55
Çizelge 3.2 : Yanca eksenini PI ve PI+İleri besleme kontrolcü kazançları.	65
Çizelge 3.3 : Yanca eksenini ST-KKK ve ST-KKK +İleri besleme kontrolcü kazançları.	65
Çizelge 3.4 : Yükseliş eksenini PI ve PI+İleri besleme kontrolcü kazançları.	66
Çizelge 3.5 : Yükseliş eksenini ST-KKK ve ST-KKK +İleri besleme kontrolcü kazançları.	66
Çizelge 3.6 : Yanca eksenini PI kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	68
Çizelge 3.7 : Yanca eksenini PI kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması. ...	71
Çizelge 3.8 : Yanca eksenini PI+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması. .	74
Çizelge 3.9 : Yanca eksenini PI+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	76
Çizelge 3.10 : Yanca eksenini ST-KKK kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	78
Çizelge 3.11 : Yanca eksenini ST-KKK kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	81
Çizelge 3.12 : Yanca eksenini KKK+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	83
Çizelge 3.13 : Yanca eksenini KKK+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	86
Çizelge 3.14 : Yükseliş eksenini PI kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	88
Çizelge 3.15 : Yükseliş eksenini PI kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	91
Çizelge 3.16 : Yükseliş eksenini PI+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	93
Çizelge 3.17 : Yükseliş eksenini PI+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	96

Çizelge 3.18 :	Yükseliş eksenli ST-KKK kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	98
Çizelge 3.19 :	Yükseliş eksenli ST-KKK kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	101
Çizelge 3.20 :	Yükseliş eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.	103
Çizelge 3.21 :	Yükseliş eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.	106
Çizelge 4.1 :	Simülasyon çalışmaları sonrasında seçilen kontrolcü kazançları.	107
Çizelge 4.2 :	Yanca eksenli simülasyon ve gerçek sistem hedef takip performansları.	111
Çizelge 4.3 :	Yükseliş eksenli simülasyon ve gerçek sistem hedef takip performansları.	115
Çizelge 4.4 :	Tek ve iki eksenli çalışma durumları için yanca ve yükseliş eksenleri cevapları.	119
Çizelge 5.1 :	APG parkuru yanca eksenine gelen bozucu sinyal temsili [52].	126
Çizelge 5.2 :	APG parkuru yükseliş eksenine gelen bozucu sinyal temsili.	127
Çizelge 5.3 :	Bozucu olarak uygulanan farklı sinüs sinyalleri altında stabilizasyon performansı.	129

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : BMC Altay Ana Muharebe Tankı [1].	2
Şekil 1.2 : BMC ALTUĞ 8x8 Zırhlı Muharebe Aracı [1].	2
Şekil 1.3 : Leonardo Stabilize Görüş Sistemi (S3) [2].	3
Şekil 1.4 : SAFRAN PASEO [3].	3
Şekil 1.5 : Gimbal sistemi donanımları için örnek görsel [5].	4
Şekil 1.6 : Görüş hattı stabilizasyonu kapalı.	5
Şekil 1.7 : Görüş hattı stabilizasyonu açık.	5
Şekil 1.8 : Yanca eksenindeki stabilizasyon hatası.	6
Şekil 1.9 : Yükseliş eksenindeki stabilizasyon hatası.	6
Şekil 1.10 : APG parkuru temsili gösterimi.	7
Şekil 1.11 : Sinüs parkuru temsili gösterimi.	7
Şekil 1.12 : Stewart platformu üzerinde test edilen kule sistemi [8].	8
Şekil 2.1 : Doğru Akım Motor Modeli.	18
Şekil 2.2 : Sadeleştirilmiş gimbal modeli.	20
Şekil 2.3 : Gimbal sistem modeli.	21
Şekil 2.4 : Süprüntü sinyali tasarımı.	22
Şekil 2.5 : PRBS sinyali tasarımı.	23
Şekil 2.6 : Frekans Tarama sinyali tasarımı.	23
Şekil 2.7 : Yanca eksen 4.8 [A] genlikli Süprüntü sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	25
Şekil 2.8 : Yanca eksen 4.8 [A] genlikli PRBS sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	26
Şekil 2.9 : Yanca eksen 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	26
Şekil 2.10 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli Süprüntü sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	28
Şekil 2.11 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli PRBS sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	29
Şekil 2.12 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.	29
Şekil 2.13 : Doğrusal olmayan sistem dinamik modeli.	32
Şekil 2.14 : LuGre Sürtünme modeli dinamiği [53].	34
Şekil 2.15 : LuGre sürtünme modeli – kayma fazı parametreleri [51].	35
Şekil 2.16 : Yanca eksen pozitif yönlü kayma fazı.	37
Şekil 2.17 : Yanca eksen negatif yönlü kayma fazı.	37
Şekil 2.18 : Yükseliş eksen pozitif yönlü kayma fazı.	39
Şekil 2.19 : Yükseliş eksen negatif yönlü kayma fazı.	39
Şekil 2.20 : Yanca eksen kütle dengesizliği-açısal hız ilişkisi.	41
Şekil 2.21 : Yanca eksen kütle dengesizliği modeli 3 [deg/s] sabit hız sonuçları.	42
Şekil 2.22 : Yanca eksen kütle dengesizliği modeli 30 [deg/s] sabit hız sonuçlar.	43

Şekil 2.23 : Yükseliş eksenini dinamik kütle dengesizliği modeli çıktısı.....	44
Şekil 2.24 : Yükseliş eksenini kütle dengesizliği modeli 3 [deg/s] sabit hız sonuçları.....	45
Şekil 2.25 : Yükseliş eksenini kütle dengesizliği modeli 30 [deg/s] sabit hız sonuçları.....	46
Şekil 2.26 : Temsili jiroskop modeli.....	47
Şekil 2.27 : MATLAB/Simulink'te tasarlanan Jiroskop Modeli.	48
Şekil 2.28 : Tasarlanan jiroskop modeli çıktı sinyali.....	48
Şekil 2.29 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli Süprüntü sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.	50
Şekil 2.30 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli PRBS sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.....	50
Şekil 2.31 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.	51
Şekil 2.32 : Yükseliş eksenini 6 [A] genlikli Süprüntü sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.	53
Şekil 2.33 : Yükseliş eksenini 6 [A] genlikli PRBS sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.....	53
Şekil 2.34 : Yükseliş eksenini 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.	54
Şekil 3.1 : Gimbal sistemi hız kontrolcüsü temsili.	55
Şekil 3.2 : PID Kontrolcü Gösterimi.	56
Şekil 3.3 : Kayan Kipli Kontrol - Kayma Yüzeyi.....	57
Şekil 3.4 : Kayan Kipli Kontrol – Çatırdama.	58
Şekil 3.5 : Aktivasyon fonksiyonu karşılaştırması.	59
Şekil 3.6 : Super Twisting Kayan Kipli Kontrol gösterimi.	60
Şekil 3.7 : İleri besleme entegrasyonu.	61
Şekil 3.8 : Kontrol kazançları için giriş sinyali.	62
Şekil 3.9 : Genetik Algoritma akış şeması.....	63
Şekil 3.10 : Yanca eksenini IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.....	67
Şekil 3.11 : Yanca eksenini ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.....	67
Şekil 3.12 : Yanca eksenini ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.	68
Şekil 3.13 : Yanca eksenini ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.	68
Şekil 3.14 : Yanca eksenini IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	69
Şekil 3.15 : Yanca eksenini ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	69
Şekil 3.16 : Yanca eksenini ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	70
Şekil 3.17 : Yanca eksenini ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	70
Şekil 3.18 : Yanca eksenini IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	72
Şekil 3.19 : Yanca eksenini ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	72
Şekil 3.20 : Yanca eksenini ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	73
Şekil 3.21 : Yanca eksenini ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	73
Şekil 3.22 : Yanca eksenini IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	74

Şekil 3.23 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	75
Şekil 3.24 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	75
Şekil 3.25 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	76
Şekil 3.26 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.	77
Şekil 3.27 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.	77
Şekil 3.28 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.	78
Şekil 3.29 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.	78
Şekil 3.30 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	79
Şekil 3.31 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	79
Şekil 3.32 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	80
Şekil 3.33 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	80
Şekil 3.34 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	82
Şekil 3.35 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	82
Şekil 3.36 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.	83
Şekil 3.37 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.	83
Şekil 3.38 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	84
Şekil 3.39 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	84
Şekil 3.40 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	85
Şekil 3.41 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	85
Şekil 3.42 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.	87
Şekil 3.43 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.....	87
Şekil 3.44 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.	88
Şekil 3.45 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.	88
Şekil 3.46 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	89
Şekil 3.47 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	89
Şekil 3.48 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	90
Şekil 3.49 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.	90
Şekil 3.50 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	92

Şekil 3.51 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	92
Şekil 3.52 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	93
Şekil 3.53 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	93
Şekil 3.54 : Yükseliş eksenini IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	94
Şekil 3.55 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	94
Şekil 3.56 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	95
Şekil 3.57 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	95
Şekil 3.58 : Yükseliş eksenini IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.....	97
Şekil 3.59 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.....	97
Şekil 3.60 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.....	98
Şekil 3.61 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.....	98
Şekil 3.62 : Yükseliş eksenini IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	99
Şekil 3.63 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	99
Şekil 3.64 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	100
Şekil 3.65 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	100
Şekil 3.66 : Yükseliş eksenini IAE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	102
Şekil 3.67 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	102
Şekil 3.68 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	103
Şekil 3.69 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.....	103
Şekil 3.70 : Yükseliş eksenini IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	104
Şekil 3.71 : Yükseliş eksenini ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	104
Şekil 3.72 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	105
Şekil 3.73 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.....	105
Şekil 4.1 : Yanca eksenini 10 [deg/s] adım girişine karşılık kontrolcülerin tepkisi. ..	109
Şekil 4.2 : Yanca eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık kontrol algoritmalarının performansları.....	110

Şekil 4.3 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] adım girişine karşılık kontrolcülerin tepkisi.	113
Şekil 4.4 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık kontrol algoritmalarının performansları.	114
Şekil 4.5 : Yanca eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık tek ve iki eksenli çalışma performansı.	117
Şekil 4.6 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık tek ve iki eksenli çalışma performansı.	118
Şekil 4.7 : Yanca eksenini bant genişliği simülasyon ve gerçek sistem cevapları.	120
Şekil 4.8 : Yükseliş eksenini bant genişliği simülasyon ve gerçek sistem cevapları.	121
Şekil 5.1 : Yanca eksenini statik durum stabilizasyon performansı.	124
Şekil 5.2 : Yükseliş eksenini statik durum stabilizasyon performansı.	125
Şekil 5.3 : Temsili APG parkuru yanca eksenine gelen bozucu sinyal grafiği.	126
Şekil 5.4 : Temsili APG parkuru yanca eksenini stabilizasyon performansı.	127
Şekil 5.5 : Temsili APG parkuru yükseliş eksenine gelen bozucu sinyal grafiği.	128
Şekil 5.6 : Temsili APG parkuru yükseliş eksenini stabilizasyon performansı.	128
Şekil 5.7 : Tanımlanan atış şoku açısal hız-zaman grafiği.	130
Şekil 5.8 : Yanca eksenini atış şoku titreşim bastırma performansı.	130
Şekil 5.9 : Yükseliş eksenini atış şoku titreşim bastırma performansı.	131
Şekil 5.10 : Yanca eksenini Monte Carlo analizleri.	133
Şekil 5.11 : Yükseliş eksenini Monte Carlo analizleri.	134



İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR GİMBAL SİSTEMİNİN MODELLENMESİ, TANILANMASI VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

ÖZET

Gimbal sistemleri, faydalı yük olarak taşıdıkları silah ve elektro-optik sistemlerin hedef üzerindeki doğrultularını hem kararlı bir şekilde sabitleyen hem de hareket serbestliği sağlayan kullanım amaçlarına göre iki veya üç eksen de dönme serbestliği ile tasarlanan mekanizmalardır. Gimbal sistemleri, entegre edildikleri sistemin görev dinamiklerinden kaynaklanan bozucu etkilerden faydalı yük olarak taşıdıkları sistemlerin etkilenmemesi ve hedef üzerindeki yönelimin sağlanabilmesi için hareket kontrol ve stabilizasyon performanslarını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu performansların sağlanabilmesi için de kontrol algoritmaları kullanılmaktadır.

Gimbal sistemi dinamik modeli akım giriş ve jiroskoptan alınan açısal hız çıkış olacak şekilde tek giriş-tek çıkışlı olarak modellenmiştir. Sistemin transfer fonksiyonu ise tork sabiti, atalet ve sürtünme parametrelerinden oluşmaktadır. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için sistem tanılama uygulamaları yapılmıştır. Gerçek gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerine farklı genliklerden oluşan Süprüntü, PRBS ve Frekans Tarama akım sinyalleri uygulanmıştır. MATLAB'deki System Identification Toolbox kullanılarak gerçek sistem üzerinden toplanan akım komutları ve jiroskoptan alınan açısal hız verileri kullanılarak her test koşulu için transfer fonksiyonu parametreleri elde edilmiştir. Yanca ve yükseliş eksenlerinde yapılan her test için RMS doğruluğu ve VAF skoru hesaplanarak en başarılı modeldeki parametre değerleri gimbal sisteminin doğrusal dinamik modeli olarak kabul edilmiştir.

Gimbal sisteminin dinamik modelinin doğruluğunu artırmak ve gerçek sistem davranışını daha başarılı şekilde temsil edebilmek amacıyla, gimbal sisteminin açısal pozisyonuna, açısal hızına ve hareket yönüne bağlı olarak değişebilen doğrusal olmayan etkiler de modellenerek sistem dinamik modeline entegre edilmiştir. Sürtünmenin başarılı bir şekilde modellenmesi için LuGre sürtünme modeli kullanılmıştır. Bu modelde hem kayma öncesi hem de kayma sonrası sürtünme davranışları açıklanabilmektedir. Sistemin kütle dağılımına bağlı olarak ortaya çıkan ve dönme dinamiklerini etkileyen kütle dengesizliği statik ve dinamik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Statik kütle dengesizliği, mekanik tasarım aşamasında kütlelerin dengeli bir şekilde yerleştirilmesi ile engellenebilmektedir. Ancak, dinamik kütle dengesizliği ise atalet matrisindeki çapraz etkilerin sıfır olmaması sebebiyle görülmekte ve gerçek sistem üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile modellenenilmektedir. Bu kapsamda, sürtünme ve kütle dengesizliği etkileri; gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilen deneysel testler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda matematiksel olarak modellenmiş ve bu modeller sistemin genel yapısına dahil edilmiştir. Ek olarak, açısal hız çıktısının daha başarılı modellenmesi için bir jiroskop modellenmesi yapılmıştır. Yanca ve yükseliş eksenlerindeki doğrusal dinamik modelde elde edilen atalet değerleri ile sürtünme,

kütle degesizliği ve jiroskop modelleri birleştirilerek gimbal sisteminin doğrusal olmayan dinamik modeli oluşturulmuştur.

Yanca ve yükseliş eksenleri için belirlenen doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modeller, MATLAB/Simulink simülasyon ortamında oluşturularak test edilmiştir. Sistem tanılama sürecinde kullanılan uyarıcı sinyaller, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modellere akım komutu olarak uygulanmış ve sistemin açısal hız çıktıları kaydedilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri, gerçek sistemden elde edilen açısal hız verileri ile karşılaştırılmış; her bir model için RMS doğruluğu değerleri hesaplanarak model doğrulukları sayısal olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, doğrusal modellerin yalnızca tanımlandıkları test koşullarına yakın çalışma aralıklarında yüksek doğruluk sağladığı, buna karşın, sürtünme ve kütle dengesizliği modellerinin dahil edildiği doğrusal olmayan dinamik modelin gerçek sistem davranışını daha yüksek doğrulukla temsil ettiği tespit edilmiştir. Yanca ve yükseliş eksenleri için doğrusal olmayan dinamik modeller nihai sistem modelleri olarak kabul edilmiştir.

Gimbal sistemlerinin taşıdıkları faydalı yüklerin görevlerini yerine getirebilmeleri için, yönelim hassasiyetini sağlayacak şekilde yüksek performanslı hareket kontrol algoritmalarının tasarlanması gerekmektedir. Gimbal sisteminin akım girişi kontrol değişkeni olarak kullanılarak farklı kontrol algoritmaları geliştirilmektedir. PI ve Super Twisting Kayan Kipli Kontrol (ST-KKK) algoritmaları ve bu algoritmaların ileri besleme entegre edilmiş kontrolcü tasarımları MATLAB/Simulink'teki simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Kontrolcü kazançlarının belirlenebilmesi için Genetik Algoritma (GA) kullanılarak kazançların optimizasyonu sağlanmıştır. Amaç fonksiyonları olarak IAE, ISE, ITAE ve ITSE fonksiyonları kullanılmıştır. Gimbal sisteminin her eksen için farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan kontrol algoritmaları, simülasyon ortamında farklı genlikli ve farklı frekanslı sinüs ve adım girişi açısal hız komut sinyalleri ile test edilmiştir. Yerleşme süresi, maksimum aşma ve hedef takip performansı hatası kriterlerine göre yapılan karşılaştırmalarda her kontrol algoritması için en başarılı kazançlar gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir.

Simülasyon ortamında yapılan karşılaştırmalar sonucunda seçilen kazançlara sahip kontrol algoritmaları gerçek sistem üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon ortamında kullanılan referans giriş sinyalleri, deneysel doğrulama amacıyla birebir aynı şekilde gerçek gimbal sistemine uygulanmıştır. Böylece, kontrol algoritmalarının hem simülasyon modeli üzerindeki hem de fiziksel sistemdeki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar ışığında, sistem dinamiklerine en başarılı performansı veren kontrol algoritması seçilmiş ve nihai kontrolcü tasarımı bu doğrultuda tamamlanmıştır. Her iki eksen için de ST-KKK algoritmasının en başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gimbal sisteminin iki eksenli hareketi sırasında atalet matrisindeki çapraz etkilerin eksenler arasında hareket kontrol performansı kaybına neden olup olmadığının deneysel olarak incelenmesi için nihai kontrol algoritmaları kullanılarak her iki eksene de aynı anda açısal hız komutu uygulanmıştır. Hedef takip performansı hatası değerlendirmesine göre iki eksenli hareket sırasında eksenler arasında çok büyük bir performans kaybına neden olmadığı görülmüştür.

Bant genişliği, bir kontrol sisteminin giriş sinyalini önemli bir bozulma ya da kayıp yaşamadan belirli bir tolerans içinde işleyebildiği frekans aralığını ifade etmektedir. Bant genişliği yüksek olan sistemler genellikle daha hızlı tepki vermekte ve daha

hassas kontrol sağlamaktadır. Gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenleri için ayrı ayrı Frekans Tarama sinyalinden oluşan açısal hız komutu hem simülasyon hem de gerçek sisteme üzerine uygulanmıştır. Açısal hız komutu ve jiroskoptan alınan açısal hız çıktısı ile frekans-genlik grafikleri oluşturulmuştur. Her iki ekseninin de hedef bant genişliği olan 8 [Hz] değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Simülasyon ve gerçek sistem bant genişliği değerlerinin birbirine yakın olduğu ifade edilmiştir.

Stabilizasyon performanslarının hesaplanabilmesi için gerçek sistem hareket etmeyen bir platforma montajlı durumu için yanca ve yükseliş eksenlerine hem simülasyon ortamında hem de gerçek sistem üzerinde 0 [deg/s] açısal hız komutları uygulanmıştır. Yapılan değerlendirmede simülasyon ve gerçek sistem performansları aralarında büyük bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır. Aralarındaki farkın fiziksel karşılığı modelleme hataları, sistem toleransları, sensor hataları, kablo gerilimi ve çevresel etkiler olarak değerlendirilmiştir. APG ve sinüs parkuru için farklı genlik ve farklı frekanslarda tanımlanan sinüs sinyalleri simülasyon modellerine bozucu giriş olarak uygulanarak stabilizasyon performansları elde edilmiştir. Atış şoku sonrası titreşimlerin bastırılma süresi ise, simülasyon ortamında tasarlanan 80 [ms] süren 100 [deg/s] genlikli bir adım sinyalinin bozucu giriş olarak uygulanması ile elde edilmiştir.

Sürtünme fenomeni; sıcaklığa, zamana ve sistemdeki aşınmalara göre değişebilmektedir. Bu sebeple, tasarlanan kontrol algoritmalarının gürbüzlüklerinin incelenebilmesi için Monte Carlo simülasyonları yapılmıştır. LuGre sürtünme modeli parametrelerine belirsizlik eklenerek MATLAB’de yapılan simülasyonlar sonucunda yanca ve yükseliş eksenlerinin yeterli gürbüzlüğe sahip oldukları sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında, doğrusal (atalet) ve doğrusal olmayan (sürtünme, kütle dengesizliği ve sensör belirsizliği) dinamik etkiler dikkate alınarak geliştirilen simülasyon modellerinin, gerçek sisteme davranışlarını yüksek doğrulukla temsil edebileceği değerlendirilmiştir. Kullanılan farklı kontrol algoritmalarının simülasyon ortamında Genetik Algoritma ile ayarlanması sonucunda gerçek sistem üzerinde de performans isterlerini sağlayabildiği görülmüştür.



MODELLING, IDENTIFICATION AND REAL-TIME CONTROL OF A TWO-DEGREE-OF-FREEDOM GIMBAL SYSTEM

SUMMARY

Gimbal systems are mechanical structures designed to provide two or three degrees of rotational freedom according to their intended use, enabling both stabilization and mobility for the payloads they carry, such as weapons and electro-optical systems. These systems are engineered to maintain the orientation of their payloads against disturbances caused by the dynamics of the platform they are integrated into, ensuring stabilization and precise motion control. Control algorithms are employed to achieve the required performance.

For each axis of a gimbal system to be controlled, one electric motor, one encoder, and one gyroscope are used. Electric motors convert electrical energy into mechanical energy to provide the torque required for the orientation of the gimbal mechanism. Angular position data obtained from encoder sensors enable precise determination of the system's position, while angular velocity data from gyroscope sensors are used as feedback in motion control and stabilization algorithms.

Thanks to Pulse Width Modulation (PWM) control, the voltage applied to the motor is regulated by using fixed-amplitude pulse signals at specific intervals. The voltage signal used to control motor torque is adjusted by a closed-loop current controller. In modern motor drivers, the current and PWM controllers function as high-bandwidth closed-loop control systems, which significantly suppress the effect of the motor's electrical transfer function. As a result, the electrical part of the gimbal system is considered to operate with full accuracy without the need for explicit electrical modeling.

The dynamic model of the gimbal system was structured as a single-input single-output (SISO) system, with electrical current as the input and angular velocity from a gyroscope as the output. The transfer function of the system consists of the torque constant, inertia, and friction parameters, which were identified through system identification methods. Sweep, PRBS (Pseudorandom Binary Sequence), and Frequency Sweep current signals of varying amplitudes were applied to the yaw and pitch axes of the real gimbal system. Using MATLAB's System Identification Toolbox, transfer function parameters were extracted for each test condition based on the collected current inputs and gyroscopic outputs. The models were evaluated by calculating RMS accuracy and VAF scores, and the best-performing parameter sets were accepted as the linear dynamic models of the gimbal system.

To increase model fidelity and more accurately represent the behavior of the real system, nonlinear effects-dependent on angular position, velocity, and motion direction-were also modeled and integrated into the system. The LuGre friction model was employed to represent both pre-sliding and sliding friction behavior. Additionally, the influence of mass imbalance due to the system's mass distribution, which affects

its rotational dynamics, was analyzed in two parts: static and dynamic. While static imbalance can be mitigated during mechanical design, dynamic imbalance-arising from non-zero off-diagonal elements in the inertia matrix-was modeled through experimental data. Friction and imbalance models were mathematically formulated based on test results and incorporated into the overall dynamic model. Furthermore, a gyroscope model was developed to enhance the accuracy of the angular velocity output. By combining the inertia values from the linear model with these nonlinear components, a complete nonlinear dynamic model was constructed for both axes.

The linear and nonlinear models for the yaw and pitch axes were implemented and tested in MATLAB/Simulink. The same excitation signals used during system identification were applied to both models, and the simulated angular velocity outputs were recorded. These were compared against real system data, and model accuracy was evaluated numerically using RMS error values. Results showed that the linear model performed well only near its design conditions, whereas the nonlinear model incorporating friction and imbalance yielded higher accuracy in representing real behavior. Thus, the nonlinear models were adopted as the final system models for both axes.

To ensure precise target alignment, high-performance motion control algorithms are required. Using current input as the control variable, various controllers were designed and tested in MATLAB/Simulink, including PI and Super Twisting Sliding Mode Controllers (ST-SMC), with and without feedforward terms.

Sliding Mode Control directs the system toward a predefined sliding surface using the error between the reference signal and the feedback signal, aiming to keep the system on that surface. This control method provides fast response time while demonstrating robustness against model uncertainties and external disturbances. Once the system reaches the sliding surface, it is designed to remain on it, resulting in stable and reliable control behavior.

The feedforward method is used to eliminate predictable disturbances in the system before they are handled by the controller. In gimbal systems, effects such as friction and mass imbalance can cause delayed responses and instability when controlled using feedback alone. Therefore, the feedforward approach is an important control strategy to enhance target tracking performance.

The reason for not using the derivative term in the PI controller is that the control loop of the real system operates at a sampling frequency of 1000 Hz. Since the control signal is generated every 1 ms, it was considered that even a small amount of measurement noise could cause high-frequency oscillations in the control signal if derivative terms were used.

Genetic Algorithm (GA) optimization was used to tune the controller gains based on objective functions such as IAE, ISE, ITAE, and ITSE. The designed controllers were tested in simulation under various sinusoidal and step angular velocity commands of different amplitudes and frequencies. Based on performance metrics such as settling time, overshoot, and tracking error, the best-performing controller gains were selected for experimental validation.

In the optimization of controller gains using a genetic algorithm, the objective functions IAE, ISE, ITAE, and ITSE were employed to evaluate system performance from different perspectives. IAE emphasizes overall error magnitude while being insensitive to rapid changes; ISE penalizes large errors more heavily to reduce major

deviations. ITAE applies a time-weighted penalty to errors, discouraging slow system responses, while ITSE considers both error magnitude and time to assess transient performance. These objective functions enable the selection of optimal controller gains based on various error and time-weighted performance criteria.

Genetic algorithms are an optimization method inspired by natural selection and evolutionary biology processes. They are effectively used to solve complex, multi-parameter problems that are difficult to address analytically. Each parameter is defined as a gene, and candidate solutions containing these genes are expressed as chromosomes; the collection of these chromosomes forms a population. Each individual in the population is evaluated using an objective function, and new generations are created through elitism, selection, crossover, and mutation operations to obtain better solutions. This iterative process continues until a predefined stopping criterion is met. Due to these characteristics, genetic algorithms are widely used in engineering applications, particularly for gain optimization in control algorithm design.

The optimized controllers were then tested on the real system using the same reference input signals from the simulations. This enabled a direct comparison between simulation and physical system performance. Based on experimental results, the controller yielding the best overall performance was selected. For both axes, the ST-SMC controller demonstrated superior results.

To investigate the influence of cross-axis coupling due to inertia matrix effects during simultaneous dual-axis motion, identical angular velocity commands were applied to both axes using the final controllers. According to target tracking error analysis, the dual-axis operation did not significantly degrade control performance.

Bandwidth—defined as the frequency range within which the control system can respond without major distortion or attenuation—was also analyzed. Higher bandwidth corresponds to faster and more precise responses. Frequency sweep signals were applied to both axes in simulation and on the real system, and frequency response plots were generated using input and gyroscope output data. Results showed that the bandwidth exceeded the target of 8 [Hz] for both axes, with good agreement between simulation and experimental values.

To evaluate stabilization performance, 0 [deg/s] angular velocity commands were applied to both axes with the system mounted on a stationary platform. Simulation and real-world results were compared, showing no significant discrepancies. Any differences were attributed to modeling errors, system tolerances, sensor noise, cable tension, and environmental influences. Stabilization under external disturbances was also tested by applying sinusoidal signals mimicking APG and sine wave test tracks. Additionally, post-firing disturbance suppression time was assessed using a simulated 100 [deg/s], 80 [ms] step disturbance, representing a firing shock.

When analyzing the gimbal system mechanism, friction has been identified as the most critical factor affecting robustness. This is because, throughout the operational life of the gimbal system, parameters such as mass, moment of inertia, mass imbalance, and sensor characteristics remain constant, whereas friction characteristics can vary significantly due to changes in temperature over time, mechanical wear, alterations in lubricant properties, and manufacturing tolerances. These variations are especially influential at low operating speeds, where static friction and stick-slip effects become more pronounced, potentially causing deviations in the system's dynamic behavior.

Therefore, designing a controller that is robust against variations in friction parameters has become a critical requirement to ensure the robustness of the gimbal system.

Monte Carlo simulations were performed for each control algorithm by randomly varying the friction model parameters of the axes $\pm 20\%$ for the azimuth axis and $\pm 10\%$ for the elevation axis. Based on the simulations conducted in MATLAB, it was concluded that both the azimuth and elevation axes exhibited sufficient robustness.

This thesis demonstrates that simulation models incorporating both linear (inertia) and nonlinear (friction, imbalance, sensor uncertainty) dynamics can closely replicate real system behavior. Controllers optimized using Genetic Algorithms in simulation were found to meet performance requirements when implemented on the physical system. Overall, the study demonstrates that the proposed modeling and control strategies ensure accurate real-system performance, validating the robustness and applicability of the developed gimbal system design.



1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarından itibaren teknolojiye yaşanan hızlı gelişmeler ve değişen savaş doktrinleri kara, deniz ve hava muharebe platformlarının tasarımında ve görev anlayışında köklü bir dönüşümü de beraberinde getirmiştir. Geleneksel harp araçları; ateş gücü, zırh koruması ve hareket kabiliyeti esas alınarak inşa edilirken, günümüz muharebe sistemleri stabilize silah ve görüş sistemleri, elektro-optik algılayıcılar, otonom karar destek algoritmaları ve ağ destekli hareket kabiliyeti gibi ileri teknolojilerle donatılmaktadır.

Modern kara harp sahasının en kritik unsurlarından biri olan paletli ve tekerlekli kara muharebe araçları, zorlu arazi koşullarında, yüksek hareket kabiliyeti, zırh koruması ve etkili ateş gücü ile düşman unsurlara karşı üstünlük sağlamaktadır. Bu araçlara entegre edilen silah ve elektro-optik sistemler (kamera, radar, lazer, vb.) sayesinde hedef unsurların ateş menziline girilmeden tanınması, izlenmesi ve ateş gücü ile angaje olunarak etkisiz hale getirilmesi hayati öneme sahiptir. Ancak, bu sistemler hareketli platformun görev dinamiklerinden dolayı bozucu etkilere (yol titreşimi, atış şoku, ani ivmelenme gibi) maruz kalmaktadır. Bu tür bozucu girdilerin olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla, hem hedef hattını kararlı bir şekilde sabitleyen hem de hareket serbestliği sağlayan kullanım amaçlarına göre genellikle iki veya üç eksenle dönme serbestliği ile tasarlanan gimbal mekanizmaları kullanılmaktadır.

Gimbal sistemlerinde, jiroskop ve ivmeölçer gibi sensörlerin kullanılmasıyla birlikte ataletsel stabilizasyon sağlanarak dış bozucuların faydalı yük üzerindeki etkileri en az seviyeye indirilmektedir. Ataletsel sensörlerden elde edilen veriler, gerçek zamanlı kontrol algoritmalarında tarafından işlenerek hareket kontrolü için gerekli torkun motor tarafından üretilmesini sağlar.

Örneğin; Şekil 1.1’de görülen Altay ana muharebe tankının veya Şekil 1.2’de görülen Altuğ 8x8 taktik tekerlekli zırhlı muharebe aracının silah sistemlerinin entegre edildiği kule platformu ya da üzerindeki kamera gibi elektro-optik sistemleri taşıyan görüş sistemleri de birer gimbal örneği olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 1.1 : BMC Altay Ana Muharebe Tankı [1].



Şekil 1.2 : BMC ALTUĞ 8x8 Zırhlı Muharebe Aracı [1].

1.1 Tezin Amacı

Bir kara muharebe aracına entegre edilmesi planlanan, elektro-optik sistemler taşıyan ve yanca ile yükseliş eksenlerinde hareket serbestliğine sahip iki serbestlik dereceli bir gimbal sisteminin; doğrusal ve doğrusal olmayan dinamiklerinin modellenmesi, açısal hız tabanlı hareket kontrol algoritmalarının tasarlanması ve bu algoritmaların gerçek zamanlı uygulamalarla performanslarının karşılaştırılması bu tezin temel amacını

oluşturmaktadır. Bununla birlikte, platformun maruz kaldığı yol titreşimleri ve atış şoku gibi dış bozucu girdilerin kontrol algoritmalarının performansı üzerindeki etkilerinin simülasyon ortamında analiz edilmesi; farklı senaryolar altında sistemin stabilizasyon doğruluğu ve hedef takip kabiliyetinin değerlendirilmesi de çalışmanın kapsamına dahildir. Aşağıdaki Şekil 1.3'te ve Şekil 1.4'te askeri uygulamalarda kullanılan elektro-optik sistemler taşıyan örnek gimbal sistemlerine ait görseller bulunmaktadır.



Şekil 1.3 : Leonardo Stabilize Görüş Sistemi (S3) [2].

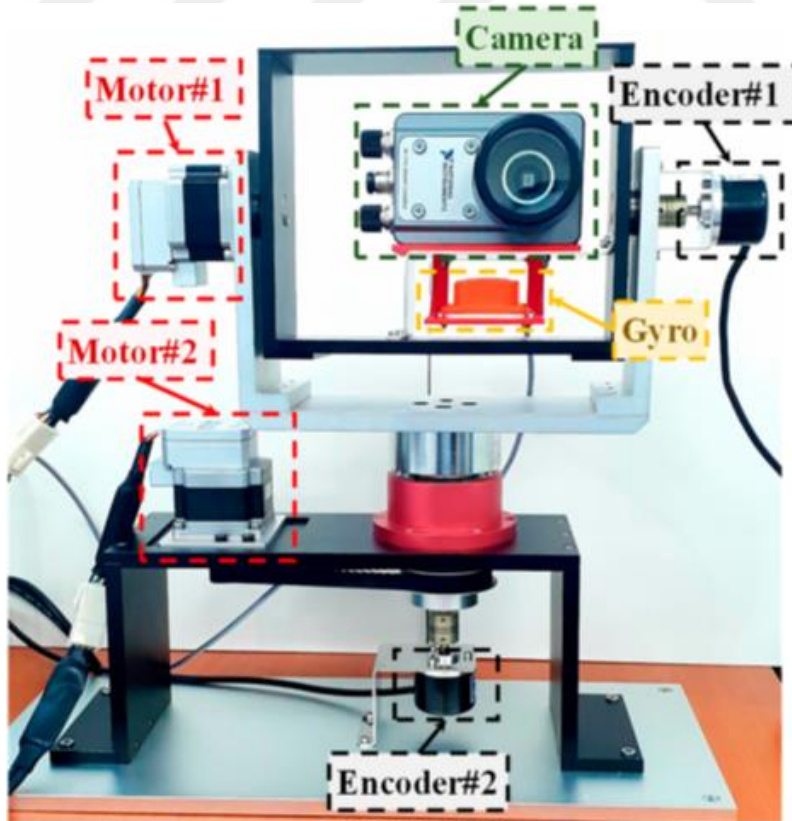


Şekil 1.4 : SAFRAN PASEO [3].

1.2 Literatür Araştırması

Ataletsel stabilize platformlar, taşıdıkları kamera, silah, teleskop ve anten gibi faydalı yükleri istenilen doğrultuda yönlendirmek ve kararlı bir şekilde tutmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu platformlar; bir ya da birden fazla ekseninde hareket edebilen gimbal mekanizmasına ve bu yapıya entegre edilmiş yataklama elemanları, motorlar ve jiroskop sensörlerinden oluşmaktadır. Çoğu uygulamalarda, faydalı yükün tüm yönelim bileşenlerinin kontrol edilebilmesi amacıyla birbirine dik (ortogonal) iki eksenli gimbal mekanizması kullanılmaktadır [4].

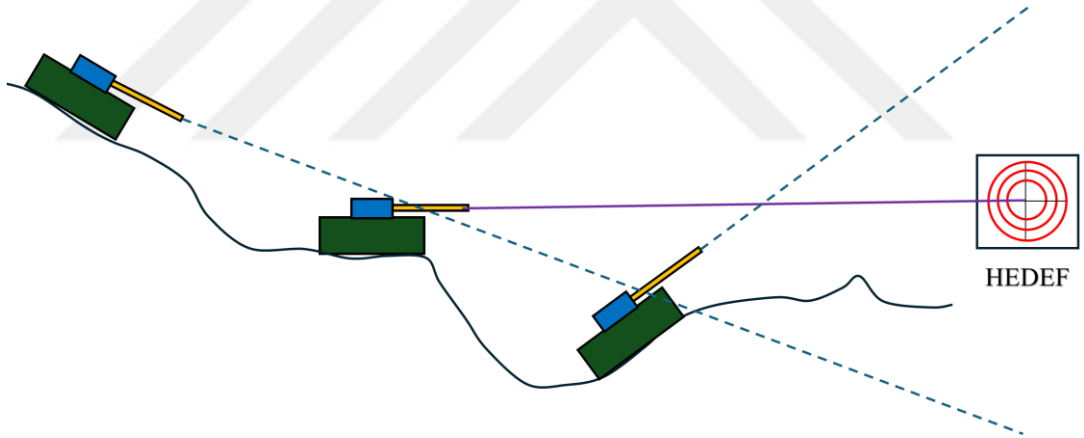
Gimbal sistemlerinin her bir ekseninin kontrol edilebilmesi için birer adet elektrik motoru, enkoder ve jiroskop kullanılmaktadır [5]. Şekil 1.5'te literatürdeki bir çalışmada kullanılan örnek bir gimbal sisteminin donanımları gösterilmektedir. Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek gimbal mekanizmasının yönelimi için gerekli torku sağlamaktadır. Enkoder sensörlerinden elde edilen açısal pozisyon verileri, sistemin konum bilgisinin hassas şekilde belirlenmesini sağlarken; jiroskop sensörlerinden alınan açısal hız verileri, hareket kontrolü ve stabilizasyon algoritmalarında geri besleme amacıyla kullanılmaktadır.



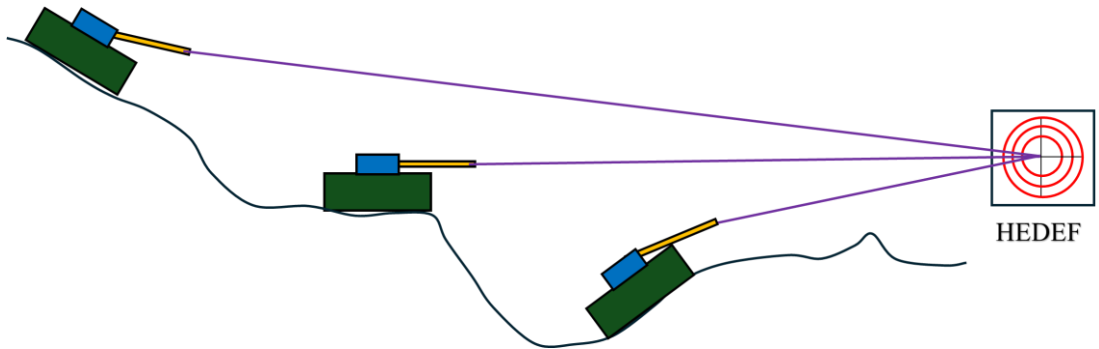
Şekil 1.5 : Gimbal sistemi donanımları için örnek görsel [5].

Gimbal sistemleri, entegre edildikleri platformların görev dinamiklerinden kaynaklanan bozucu titreşimleri bastırmak ve hedef üzerindeki görüş hatlarını sabit tutabilmek amacıyla belirli bir stabilizasyon başarısını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır [4]. Bu sistemlerde bulunan jiroskop ve ivmeölçer gibi ataletsel ölçüm birimlerinden elde edilen geri besleme sinyalleri kontrol algoritmalarında kullanılarak faydalı yükün maruz kaldığı bozucu doğrusal ve açısal titreşimlerin bastırılmasını sağlamaktadır.

Örneğin; askeri bir muharebe aracı engebeli arazi şartlarında hareket halindeyken yol profili kaynaklı gövde titreşimleri sebebiyle atış ve görüş hatlarındaki hedefe odaklanma yeteneği olumsuz etkilenmektedir. Şekil 1.6'da stabilizasyon özelliği kapalı ve Şekil 1.7'de stabilizasyon özelliği açık bir muharebe aracının arazide hareket ederken hedef üzerindeki görüş hattı stabilizasyon etkisi gösterilmektedir. Stabilizasyon özelliği sayesinde, arazi eğimlerinden bağımsız olarak hedef üzerinde bir doğrultu boyunca kararlı bir görüş hattı ve atış hattı oluşturulması mümkün olmaktadır.

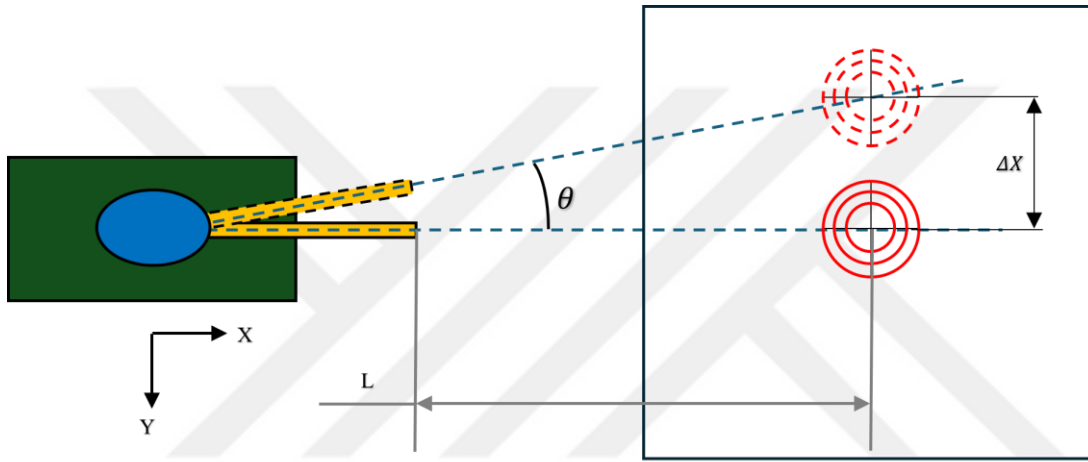


Şekil 1.6 : Görüş hattı stabilizasyonu kapalı.

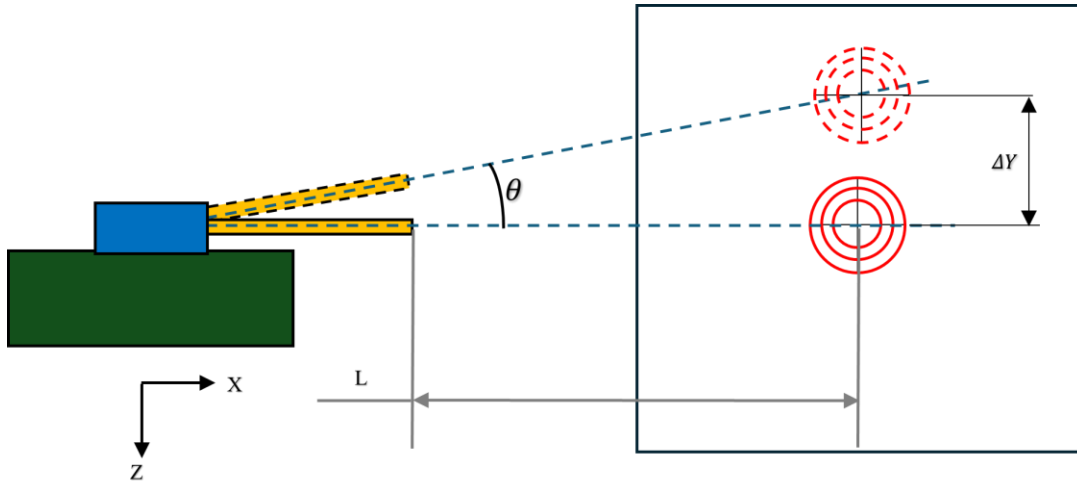


Şekil 1.7 : Görüş hattı stabilizasyonu açık.

Stabilizasyon algoritmaları, dış bozuculara karşı belirli bir stabilizasyon hassasiyeti içinde tasarlanmaktadır. Bu hassasiyetin, hedef üzerinde kabul edilebilir sapmalar içerisinde tutulması kritik öneme sahiptir. Örneğin, yanca veya yükseliş eksenlerindeki $0.1 [^\circ]$ 'lik bir açısal sapma bile, 1000 [m] hedef mesafesinde hedef merkezinden yaklaşık 1,75 [m] sapmaya sebep olabilmektedir. Muharebe aracının stabilizasyon özelliği açık olsa bile hedef merkezi üzerinde stabilizasyon hatalarından kaynaklanan sapmalar görülebilmektedir. Şekil 1.8'de yanca eksenindeki ve Şekil 1.9'da yükseliş eksenindeki stabilizasyon hatalarından kaynaklanan hedef merkezi üzerindeki sapmalar temsil edilmektedir.



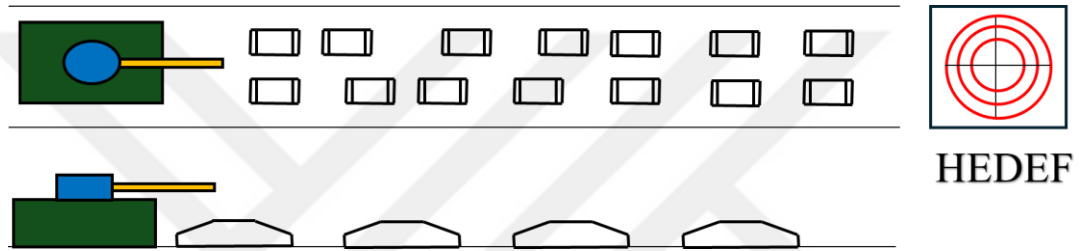
Şekil 1.8 : Yanca eksenindeki stabilizasyon hatası.



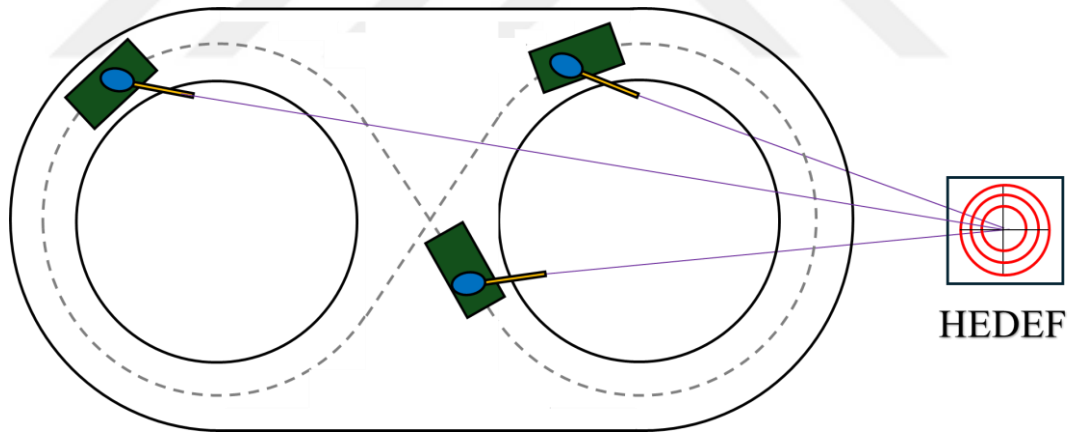
Şekil 1.9 : Yükseliş eksenindeki stabilizasyon hatası.

Kara araçlarının atış kontrol sistemlerinin değerlendirilmesi için ITOP 3-2-836 standardı [6] kullanılmaktadır. Bu standartta, kara araçlarının atış ve görüş hatlarının stabilizasyon performanslarının ölçülmesi için APG ve Sinüs parkurları

tanımlanmıştır. Askeri kara aracı bu yol profillerinden belirli hızlarda geçerek bozucu etkiler altında stabilizasyon performansı hesaplanmaktadır. Şekil 1.10'da APG parkurunun ve Şekil 1.11'de Sinüs parkurunun temsili şekilleri bulunmaktadır. APG parkuru, düz bir yol üzerine çeşitli aralıklarla yerleştirilmiş tümseklerden oluşmakta olup, özellikle yükseliş eksenine düşük genlikli ve yüksek frekanslı bozucu girişlerin etki etmesine neden olmaktadır. Buna karşılık, sinüs parkuru aracın sürekli yön değiştirmesini sağlayacak şekilde tasarlanmış olup, bu özellik yanca eksenine yüksek genlikli ve düşük frekanslı bozucu girişlerin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Her iki parkur da, gimbal sisteminin farklı eksenlerdeki bozucu etkilere karşı stabilizasyon performansının değerlendirilmesi açısından önemli bir test ortamı sunmaktadır.



Şekil 1.10 : APG parkuru temsili gösterimi.



Şekil 1.11 : Sinüs parkuru temsili gösterimi.

Kontrol algoritması geliştirilen gimbal sistemlerinin stabilizasyon performansları, entegre edileceği hareketli platformlarda kullanılmadan önce laboratuvar ortamında test sistemleri kullanılarak eniyileme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Stewart platformları sayesinde yol profilleri 6 serbestlik dereceli test sistemine uygulanarak stabilizasyon performansları ölçülebilmektedir [7]. Aşağıdaki Şekil 1.12'de aracı temsil eden Stewart platformunun, üzerindeki kuleye bozucu yol profillerini uyguladığı görülebilmektedir.



Şekil 1.12 : Stewart platformu üzerinde test edilen kule sistemi [8].

Gimbal sistemi entegre edildiği kara aracının atış faaliyeti sırasında, yüksek ivmeli, ani ve darbe niteliğindeki atış şoklarına maruz kalmaktadır [9,10]. Bu atış şoku etkisi, gimbal sisteminin serbestlik derecelerine karşılık gelen yanca ve yükseliş eksenlerine kestirimi zor, kısa süreli ancak yüksek genlikli açısal hız sinyallerini bozucu etki olarak iletmektedir. Bozucu altında çalışan gimbal sistemlerinin kontrol algoritmaları tarafından hızlı ve etkin biçimde titreşimlerin bastırılması, bir sonraki atış görevine geçmeden önce stabilizasyon performansının nominal seviyeye getirilmesi kritik öneme sahiptir.

Gimbal sistemlerinin matematik modelleri oluşturularak, sistemin dinamik davranışları simülasyon ortamında temsil edilebilmekte ve bu sayede kontrol algoritmalarının tasarımı, analizi ve doğrulanması gerçek sistem üzerinde denenmeden güvenli bir şekilde yapılabilir.

Gimbal sistemlerinin dinamik modelleri, uygulama amacı ve doğruluk gereksinimlerine bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan biçimlerde oluşturulabilmektedir. Doğrusal modelleme yaklaşımlarında, giriş-çıkış ilişkisine dayalı bir transfer fonksiyonu ile tanımlanan sistem genellikle belirli bir çalışma noktasında doğrusallaştırılır. Buna karşılık, doğrusal olmayan modelleme

yaklaşımlarında zamanla değişen parametreler de modellenerek, doğrusal modellere kıyasla gerçek sisteme daha yakın bir dinamik yapı elde edilebilir.

Altan ve Hacıoğlu [11], üç eksenli bir gimbal sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modellerini sistem tanıma uygulamaları sonucunda oluşturmuşlardır. İlk olarak, sistemin fiziksel parametrelerine (atalet momenti, sürtünme katsayısı ve motor tork sabiti) dayalı olarak Newton–Euler yöntemiyle teorik bir transfer fonksiyonu elde etmişlerdir. Sistemin giriş-çıkış verilerine dayalı olarak, transfer fonksiyonu temelli doğrusal çıkış-hata modeli ile doğrusal dinamik model; Hammerstein modeli ile de doğrusal olmayan dinamik modelleri oluşturmuşlardır. Çalışmada hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modeller için model öngörülü kontrol uygulanarak kontrolcü performansları açısından modelleme başarımlarını karşılaştırmışlardır. Hammerstein modelinin sistemin doğrusal olmayan karakteristiklerini daha iyi temsil ettiği ve hedef takibi performansı bakımından doğrusal modele kıyasla üstün olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Özçelik ve arkadaşları [12], iki serbestlik dereceli bir gimbal sisteminin dinamik davranışlarını modelleyebilmek için sistemin hareket denklemlerini Newton-Euler yöntemiyle çıkararak atalet, sürtünme, kütle dengesizliği ve eksenler arası bağlantı etkilerini içeren akım giriş ve açısal hız çıkış olan kapsamlı bir dinamik model oluşturmuşlardır. Gimbal sisteminin bilgisayar ortamındaki mekanik tasarımından elde ettikleri atalet, sürtünme ve kütle dengesizliği parametrelerini kullanmışlardır. Ayrıca jiroskop sensörüne ait gecikme, gürültü ve bias etkilerini içeren bir jiroskop modeli de oluşturarak sisteme entegre etmişlerdir. Elde ettikleri dinamik modeli MATLAB Simscape’de oluşturarak simülasyon modeli oluşturmuşlardır. 5 [Hz]’den 1250 [Hz]’e kadar sinüs dalgasından oluşan bir akım komutunu hem gerçek sisteme hem de oluşturdukları simülasyon modeline uygulamışlar ve açısal hız çıktılarını frekans alanından karşılaştırmışlardır. 100 [Hz] altındaki sonuçlarda oluşturdukları simülasyon modelinin, gerçek sistemi başarılı şekilde temsil ettiğini göstermişlerdir.

Gimbal sisteminin dinamik modelinin parametreleri mekanik tasarımdan ve ürün kataloglarından elde edilebilirken, bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi için sistem tanıma yöntemleri kullanılmaktadır. Sistem tanıma sırasında kullanılmak üzere gerçek sistemin farklı frekanslardaki dinamik tepkilerini elde edebilmek amacıyla süprüntü sinyali, frekans tarama ve PRBS sinyalleri komut olarak gerçek sisteme uygulanabilmektedir [13]. Sistemin giriş ve çıkış sinyalleri MATLAB’deki System

Identification uygulamasında kullanılarak doğrusal [14, 15] ve doğrusal olmayan [16] dinamik modeller elde edilebilmektedir.

Akım giriş ve açışal hız çıkış olarak tanımlanan bir gimbal sisteminin doğrusal dinamik modelinin transfer fonksiyonu tork sabiti, atalet momenti ve viskoz sürtünme katsayısı parametrelerinden oluşmaktadır [11]. Ancak, gerçek sistemde zamanla değişen sürtünme, kütle dengesizlikleri ve diğer yapısal belirsizlikler gibi doğrusal olmayan etkiler, bu modelin doğruluğunu sınırlamakta ve daha gelişmiş modelleme yaklaşımlarını gerekli kılmaktadır.

İki yüzey arasındaki bağıl harekete karşı oluşan direnç kuvveti olarak tanımlanan sürtünme fenomeni, hassas stabilizasyon ve yönelim gerektiren gimbal sistemi uygulamalarında doğrusal olmayan bir bozucu etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Gimbal sistemleri, sıklıkla yön değiştirme hareketlerine maruz kaldığı için sürtünmenin etkisinden dolayı pozisyon takip performansı düşmekte ve durağan halde sınır döngü osilasyonları oluşmaktadır [17]. Sürtünme fenomeni, statik (Coulomb, viskoz, Stribeck) ve dinamik (Dahl, LuGre) sürtünme modelleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir [18]. Statik modeller, yalnızca hız ile sürtünme kuvveti arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu modeller, sade yapıları sayesinde kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakla birlikte, sürtünmenin içsel dinamik etkilerini yeterince temsil edemezler. Dinamik modeller ise, sistemin sadece anlık hızına bağlı kalmaksızın, sürtünmenin zamanla değişen etkilerini, kayma öncesi ve kayma sırasındaki dinamiklerini de modelleyerek daha gerçekçi bir temsil sunmaktadır.

Gimbal sistemlerinin doğrusal olmayan dinamik modellerinin oluşturulmasında, sürtünme fenomeninin yüksek doğrulukla modellenebilmesi için LuGre sürtünme modeli kullanılan uygulamalarda modelleme başarısının arttığı görülmektedir [17,19]. LuGre sürtünme modeli, kayma öncesi ve kayma sonrası sürtünme rejimlerini tek bir yapı içerisinde temsil edebilmesi sayesinde, gimbal sistemlerinin hız kontrol algoritmalarında kritik öneme sahip sıfır hız geçişlerini yüksek doğrulukla modelleme imkanı sunmakta ve bu sayede yapışma-kayma kaynaklı salınım ve izleme hatalarını azaltmaktadır [19-21].

Gimbal sistemlerinde kütle merkezinin dönme ekseninden sapması sonucu kütle dengesizliği momentleri oluşmaktadır. Bu durum stabilizasyon performansını

düşürmekte ve enerji tüketimini arttırmaktadır. Kütle dengesizliği statik ve dinamik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Statik kütle dengesizliği, gimbal sistemi herhangi bir pozisyondayken hareketsiz durumda bile kütle merkezinin dönme ekseninden sapması sonucu oluşan sabit bir momenttir [22]. Tasarım aşamasında kütle dengesizliği olan eksene karşı ağırlık eklenerek statik denge sağlanabilmektedir. Dinamik kütle dengesizliği ise, gimbal sisteminin dönmesi sırasında dönme eksenindeki kütlelerin düzgün dağılmaması sebebiyle oluşur ve açısal hızla beraber değişen momentler üretilir [23]. Bu durumda, eksenel atalet çarpanlarının sıfır olmaması sonucunda bir eksenindeki hareketin diğer ekseninde moment üretmesine neden olduğu, dolayısıyla eksenler arasında etkileşim olduğu görülmektedir.

Gimbal sistemlerinde kullanılan jiroskoplar, açısal hız bilgisi sağlayarak sistemin görüş hattı stabilizasyonunun sağlanmasında kilit rol oynamaktadır. Baskın ve Leblebicioğlu [24] çalışmasında, oluşturdukları gimbal sisteminin dinamik modeline detaylı bir jiroskop modeli eklemiştir. Jiroskobun ürün katalog bilgileri kullanılarak gimbalin transfer fonksiyonundan çıkan açısal hız verisi jiroskop modelinden geçirilmiş ve jiroskop dinamiği simülasyon modeline entegre edilmiştir. Jiroskobun bant genişliği ve sönüm oranını içeren düşük geçiren filtre, jiroskop gecikmesini temsil eden Pade fonksiyonu ve jiroskop gürültüsü bu modelde bulunmaktadır. Jiroskopların bant genişliği kabiliyetinin artması, yüksek frekanslı açısal hız bileşenlerinin daha doğru ölçülmesini sağlayarak sistemin hızlı dinamiklere karşı daha duyarlı hale gelmesine katkı sağlamaktadır. Ek olarak, jiroskopların kendi iç dinamiklerinden kaynaklanan ARW değeri azaldıkça jiroskobun ölçüm gürültüsü azalmaktadır ve bu durum özellikle durağan veya düşük frekanslı hareketlerde daha kararlı ve doğru açısal hız geri beslemesi elde edilmesini sağlamaktadır [25].

Gimbal sisteminin açısal hızının kontrolü ve stabilizasyonu için farklı kontrol yöntemleri kullanılarak istenen performans kriterleri sağlanabilmektedir. Geleneksel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen PID kontrol yöntemi, tasarım ve uygulama kolaylığı sayesinde birçok sistemde başarılı sonuçlar vermektedir. Ahmad ve arkadaşları [26], iki serbestlik dereceli bir gimbal sisteminin kontrolü için PID kontrolcü tasarlamışlardır. Deneme yanılma yoluyla PID kontrolcünün kazançlarını ayarlamışlar ve farklı çalışma senaryoları için kontrolcü performanslarını yerleşme zamanı ve maksimum aşma olarak karşılaştırmışlardır. PID kontrolcünün sistemin kalıcı hal hatasını azalttığı ve hızlı tepki vermesini sağladığını ifade etmişlerdir.

Sharma ve arkadaşları [27], tek eksenli bir gimbal sistemi için Kararlılık Sınır Eğrisi yöntemi ile PID ve PI kontrolcülerini tasarlamışlardır. Kontrolcülerin yükselme zamanı, oturma zamanı ve maksimum aşma ve ayrıca ISE, ITSE, IAE ve ITAE değerlerini hesaplamışlardır. Yaptıkları simülasyonların sonucunda, PID kontrolcünün PI kontrolcüye kıyasla daha üstün sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Singh ve arkadaşları [28], elektro-mekanik bir sistemin görüş hattı stabilizasyonu ve hedef takibi için kontrol kazançları Ziegler Nichols yöntemiyle hesaplanmış ve genetik algoritma ile optimize edilmiş iki farklı PID kontrol algoritması kullanmışlardır. Genetik algoritma ile optimize edilen PID kontrolcünün klasik yöntemle kazançları bulunan PID kontrolcüye kıyasla daha iyi performans gösterdiğini yaptıkları simülasyon çalışmaları sonucunda ulaşmışlardır. PID kontrol yönteminin kazançları, klasik yöntemlerle (Ziegler Nichols, Cohen Coon) ve optimizasyon yöntemleriyle (Genetik algoritma) ayarlanabilmektedir [29]. Ancak, sistemdeki doğrusal olmayan dinamiklere karşı klasik yöntemlerle ayarlanan kontrolcüler çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Optimizasyon yöntemleri ile ayarlanan kontrolcüler ise, düşük maksimum aşmaya ve kısa yerleşme zamanına sahip daha kararlı sistemler olarak sonuçlar sunmaktadır.

Kayan Kipli Kontrol yöntemi, elektro-mekanik sistemlerdeki parametre belirsizliğine ve bozucu girişlere karşı kararlılık sağladığı için oldukça etkili sonuçlar vermekte ve klasik kontrol yöntemlerine kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir [30,31]. Smith ve arkadaşları [32], iki eksenli bir gimbal sisteminde Kayan Kipli Kontrol yöntemini uygulayarak doğrusal olmayan dinamik etkiler ve bilinmeyen bozucular karşısındaki performansını incelemişlerdir. Sistemin kayma yüzeyine ulaşarak kararlı ve hassas hedef takibi sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, çatırdama etkisini azaltmak için sınır katmanı yaklaşımı ile kayma yüzeyini tanımlamışlardır. Espinosa ve arkadaşları [33], iki eksenli bir gimbal sistemi dinamik modelini MATLAB/Simulink ortamında modelledikten sonra PI ve Kayan Kipli Kontrol yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan simülasyonlarda Kayan Kipli Kontrol yönteminin bozuculara karşı daha başarılı sonuçlar verdiğini söylemişlerdir. Ayrıca, çatırdamayı önlemek için işaret fonksiyonu yerine sigmoid fonksiyonu kullanmışlardır.

Çatırdama, Kayan Kipli Kontrolcünün kayma yüzeyini oluşturan keskin geçişli işaret fonksiyonu sebebiyle oluşmaktadır [34]. Kontrol sinyalinde çok hızlı yön

değişimlerine yol açarak sistemde yüksek frekanslı salınımlar meydana getirmektedir. Bu etkiyi azaltmak için, işaret fonksiyonu yerine yumuşak geçişli fonksiyonlar kullanılmaktadır. Super Twisting Kayan Kipli Kontrol algoritması, klasik Kayan Kipli Kontrol yönteminin en büyük dezavantajı olan çatırdama problemini azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir kontrol tekniğidir [35,36]. Bu yöntem; hızlı uygulanabilirliği, türev bilgisi gerektirmemesi ve sürekli kontrol sinyali üretebilmesi gibi avantajları sayesinde, hareket kontrol sistemlerinde yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

Büyüksarıkulak ve arkadaşları [37], bir gimbal sistemindeki statik ve dinamik kütle dengesizliği ile sürtünme etkilerinin, sistemin stabilizasyon performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Gerçek uçuş verileri kullanılarak oluşturulan simülasyon modelinde farklı bozucuların sistem performansına etkisini karşılaştırmışlardır. Sürtünmenin, stabilizasyonu en fazla bozan etken olduğu, statik dengesizliğin yerçekimi ivmesine bağlı olarak önemli ölçüde performansı etkilediği ve atalet matrisindeki çapraz değerlerin sıfıra yakın olması sebebiyle sistem performansında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Gimbal sistemlerinin dinamik modellerinin oluşturulması aşamasında, sistemde yer alan sürtünme ve kütle dengesizliği gibi doğrusal olmayan bozucu etkiler matematiksel olarak modellenmekte ve bu modeller, kontrol algoritmasına ileri besleme kontrolcüsü olarak entegre edilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, sistemin kontrolü sadece geri besleme ile değil, aynı zamanda sistem dinamiklerinin bozucu momentleri önceden tahmin edilerek sistemin daha hassas ve hızlı tepki vermesi sağlanmaktadır [38]. Gimbal sistemlerinin hız kontrolü algoritmalarında ileri besleme kontrol yöntemi eklendiğinde özellikle sıfır hız geçişlerinde performans iyileşmelerinin olduğu görülmektedir [39, 40]. Gerçek zamanlı uygulamalarda da performans iyileştirmesi sağlayan ileri besleme kontrol yapısı, sistemdeki doğrusal olmayan dinamiklerin gerçekçi bir şekilde modellenmesi sayesinde daha başarılı sonuçlar vermekte ve düşük hız bölgesinde karşılaşılan kontrol hassasiyeti problemlerini önemli ölçüde azaltmaktadır [41].

Doğrusal olmayan dinamik modellerin kontrol algoritmalarının kazançlarının ayarlanması için, genellikle bu sistemler çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılır ve elde edilen transfer fonksiyonları üzerinden kontrolcü tasarımı gerçekleştirilir. Ancak, simülasyon ortamında oluşturulan bu kontrol yöntemleri gerçek sistem üzerinde yeteri

kadar iyi çalışmayacaktır. Bu sebeple, kontrol kazançlarının daha dayanıklı ve optimum biçimde belirlenmesi amacıyla genetik algoritmalar kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar, kontrol parametrelerini belirli amaç fonksiyonlarına (ISE, ITSE, IAE, ITAE) göre optimize etmektedirler [42]. Örneğin; klasik yöntemlerle kazançları hesaplanan PID kontrolcü ile genetik algoritma ile optimize edilen PID kontrolcünün karşılaştırıldığı çalışmalarda, genetik algoritma ile elde edilen kontrolcünün genellikle daha düşük aşım, daha kısa yerleşme süresi ve daha küçük hata değerleri sağladığı görülmektedir [43, 44].

Gümbüzlük, bir kontrol sisteminin modelleme hataları, parametre belirsizlikleri ve dış bozucu etkenlere rağmen istenen performans aralığında çalışabilme yeteneğidir [24]. Gümbüz kontrolcülerin tasarımında, Lyapunov kararlılık teorisi sıklıkla kullanılmakta ve bu sayede sistemin parametre belirsizlikleri altında kararlılığı garanti edilmektedir. Ancak, genetik algoritma ile hesaplanan kontrol kazançları belirli bir model ve çalışma noktasında en uygun performansı sağlayacak şekilde elde edildiği için model parametrelerinde meydana gelebilecek değişimlere karşı hassasiyeti farklı parametre varyasyonları altında değerlendirilmelidir.

Tasarlanan kontrol algoritmalarında, sistem parametrelerinin zamanla değişebileceği veya tam olarak bilinmeyeceği durumlar göz önünde bulundurularak, parametre belirsizlikleri öngörülen aralıklarda tanımlanmakta ve bu belirsizlikler altında sistemin davranışı Monte Carlo analizleri ile simülasyon ortamında değerlendirilmektedir [45]. Bu yöntemde, belirsiz parametrelere rastgele değerler atanarak çok sayıda senaryo oluşturulur ve her bir senaryoda kontrol algoritmasının performans kriterlerine göre başarı performansı analiz edilir. Böylece, kontrolcünün geniş bir parametre uzayı altında istatistiksel gümbüzlüğü sayısal olarak ortaya konulmuş olur [46].

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında, bir gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenleri için doğrusal (atalet) ve doğrusal olmayan (sürtünme, kütle dengesizliği ve sensör belirsizliği) dinamik etkiler dikkate alınarak geliştirilen simülasyon modellerinin, gerçek sistem davranışlarını yüksek doğrulukla temsil edebileceği hipotez olarak öne sürülmektedir. Ayrıca, söz konusu sistemin kontrolünde kullanılacak farklı kontrol algoritmalarının, simülasyon ortamında Genetik Algoritma ile optimize edilerek tasarlanması ve bu

algoritmaların gerçek sistem üzerinde uygulandığında da benzer performans göstererek istenen kriterleri karşılayabileceği varsayılmaktadır.

Bu tezin organizasyonu aşağıdaki gibidir:

Birinci bölümde, gimbal sistemlerinin yapısını ve bu sistemlerin çeşitli kullanım alanlarını ele almaktadır. Ayrıca, kapsamlı bir literatür araştırması sunularak benzer çalışmalarda karşılaşılan yöntemler ve katkılar ortaya konulmuştur.

İkinci bölümde, gimbal sisteminin dinamik davranışlarının gerçek sisteme yakın şekilde temsil edilebilmesi amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modeller MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda geliştirilen simülasyon modelleri ile elde edilen sonuçlar, gerçek sistemden alınan verilerle karşılaştırılarak model geçerliliği değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, gimbal sisteminin kontrolü amacıyla MATLAB/Simulink ortamında farklı kontrol algoritmaları (PI, PI+İleri besleme, ST-KKK, ST-KKK+İleri besleme) geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak bu kontrolcülerin kazançları optimize edilmiştir. Tasarlanan kontrolcülerin performansları farklı bozucu senaryolar altında ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir.

Dördüncü bölümde, simülasyon ortamında tasarlanan ve seçilen kontrol algoritmaları gerçek gimbal sistemi üzerinde uygulanmış ve her eksen için en yüksek başarıma sahip kontrol yapıları belirlenmiştir. Simülasyon ve deneysel uygulama sonuçları karşılaştırılmış, performans farklılıkları analiz edilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

Beşinci bölümde, farklı yol profilleri için stabilizasyon ve atış şoku sonrası oluşan titreşimleri bastırma performansları MATLAB/Simulink'te yapılan simülasyonlarla görülmüştür. Ayrıca, Monte Carlo simülasyonları yapılarak seçilen kontrol algoritmasının gürbüzlüğü değerlendirilmiştir.

Altıncı ve son bölümde, elde edilen bulgular özetlenmiş, çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek araştırmalara yönelik öneriler sunulmuştur.



2. MODELLEME VE SİSTEM TANILAMA

Bu bölümde, geliştirilen 2 serbestlik dereceli gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerine ait dinamik davranış detaylı olarak incelenmiş ve hem doğrusal hem de doğrusal olmayan dinamik modeller oluşturulmuştur. Bu modellerin temel amacı, sistemin dinamiklerini yüksek doğrulukla yansıtan gerçekçi simülasyon ortamı sağlayarak kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve test edilmesine olanak sağlamaktır. Gimbal sisteminin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan dinamik modelleri MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş ve bu modeller ile gerçek sisteme aynı koşullarda uygulanan test sonuçları karşılaştırılmıştır. Gerçek sisteme en yakın performansta çalışan simülasyon modeli gimbal sisteminin dinamik modeli olarak kabul edilmiştir.

2.1 Doğrusal Modelleme ve Tanılama

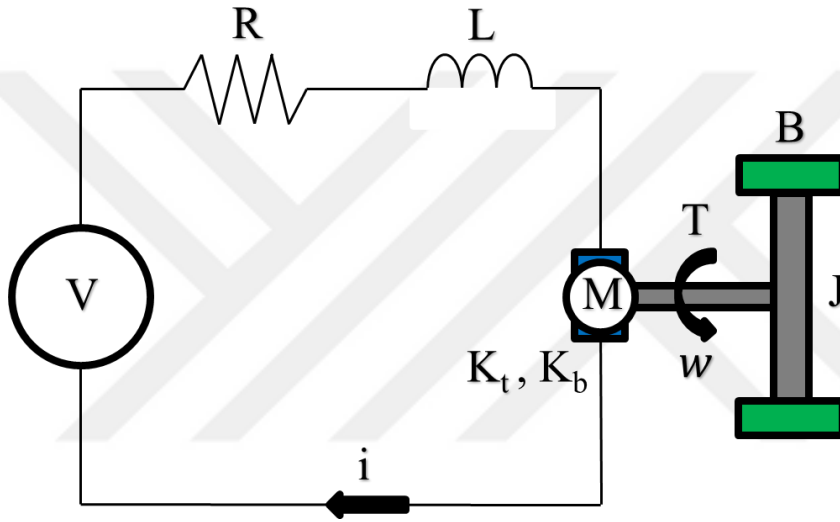
Gimbal sisteminin her bir eksen için, doğrusal sistem varsayımları altında, giriş olarak akım ve çıkış olarak jiroskoptan elde edilen açısal hız kullanılarak tek giriş–tek çıkışlı bir matematiksel model oluşturulmuştur. Gimbal sisteminde kullanılan sürücünün akım ve voltaj kontrolcülere, motorun elektriksel modeli ile ataletin mekanik modeli birleştirilerek sistemin dinamik davranışını temsil eden bir model elde edilmiştir. Bu model sadeleştirilerek, sistem tanılama çalışmalarında referans gimbal dinamik modeli olarak kabul edilmiştir.

Bu modelin transfer fonksiyonu çıkarılmış ve transfer fonksiyonundaki bilinmeyen parametrelerin gerçek sisteme uyumlu şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla sistem tanıma prosedürleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, farklı genlik seviyelerinde Süprüntü, PRBS ve Frekans Tarama türlerinde sinyaller akım komutu olarak gerçek sisteme uygulanmış; karşılık gelen açısal hız yanıtları jiroskop sensöründen ölçülmüştür. Elde edilen giriş ve çıkış verileri MATLAB/Simulink ortamında System Identification Toolbox kullanılarak analiz edilmiş ve her test koşulu için sistemin transfer fonksiyonundaki parametreler tahmin edilmiştir. Her bir test sonucunda elde edilen

modeller performans kriterlerine göre değerlendirilmiş ve en yüksek doğruluğa sahip model, gimbal sisteminin doğrusal dinamik modeli olarak kabul edilmiştir.

2.1.1 Matematik model

Gimbal sisteminin her bir eksenindeki hareket kontrolünün sağlanması için gerekli torkun üretilmesi amacıyla elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrildiği birer adet DA motor kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de gimbal sisteminin bir eksenini temsil eden DA motor modeli ve bağlı faydalı yükün oluşturduğu şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.1 : Doğru Akım Motor Modeli.

Şekil 2.1’de kullanılan parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

- V: Armatüre uygulanan gerilim – Volt [V]
- R: Armatür sargılarının elektriksel direnci – Ohm [Ω]
- L: Armatür sargılarının endüktansı – Henry [H]
- i: Armatür devresinden geçen akım – Amper [A]
- M: DA motor
- T: Motorun ürettiği elektromekanik tork – Tork [Nm]
- w: Motor şaftının açısal hızı – [rad/s]
- K_t : Tork sabiti – [Nm/A]
- K_b : Back EMF sabiti – [Vs/rad]
- J: Motor ve faydalı yükün atalet momenti – [kgm^2]
- B: Viskoz sürtünme katsayısı [Nms/rad]

Denklem 2.1'deki Kirchhoff'un gerilim yasasına göre, bir elektrik devresinde yer alan kapalı döngüdeki gerilim değişimlerinin toplamının sıfır olduğu ifade edilmektedir. Denklem 2.2'de Şekil 2.1'deki DA motor modeline göre gerilim değişimleri eşitliği yazılmıştır. Denklem 2.3'te Back-EMF gerilimi formülü denklem 2.2'deki eşitliğe yazılmış ve Laplace alınarak denklem 2.4 oluşturulmuştur. Denklem 2.5'te ise, gimbal sisteminin elektriksel kısmına ait transfer fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$\sum V(t) = 0 \quad (2.1)$$

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + V_{bemf}(t) \quad (2.2)$$

$$V_{bemf}(t) = K_b w(t) \quad (2.3)$$

$$V(s) = RI(s) + LsI(s) + K_b W(s) \quad (2.4)$$

$$\frac{I(s)}{V(s) - V_{bemf}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (2.5)$$

Bir DA motorun tork sabiti olan K_t , motorun armatür sargılarından geçen akıma karşılık ürettiği tork büyüklüğünü belirleyen oransal katsayıdır ve formülü denklem 2.6'da gösterilmektedir.

$$T = K_t i \quad (2.6)$$

Denklem 2.7'de gösterilen Newton'un 2. hareket yasası, dönen sistemler için net torkun cismin ataleti ve ivmesinin çarpımına eşit olduğunu ifade etmektedir. Denklem 2.8'de Şekil 2.1'deki şematik gösterime göre tork eşitliği yazılmış ve Laplace alınarak denklem 2.9 oluşturulmuştur. Denklem 2.10'da ise, gimbal sisteminin mekanik kısmına ait transfer fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$\sum T(t) = J\alpha(t) \quad (2.7)$$

$$T(t) = J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) \quad (2.8)$$

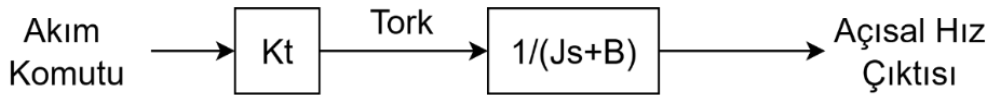
$$T(s) = (Js + B)W(s) \quad (2.9)$$

$$\frac{T(s)}{W(s)} = \frac{1}{Js + B} \quad (2.10)$$

Gimbal sisteminin, elektriksel ve mekanik dinamikleri, transfer fonksiyonları kullanılarak modellenmiş ve bu sayede gimbal sisteminin elektromekanik yapısını temsil eden blok diyagram modeli için Şekil 2.3'teki görsel oluşturulmuştur. Ayrıca, motorun hareket kontrolü için kullanılan sürücüdeki akım ve PWM kontrolcülerini temsil eden bloklar eklenmiştir.

PWM (Pulse Width Modulation) kontrolü sayesinde, belirli aralıklarla sabit genlikli darbe sinyalleri kullanılarak motora uygulanan gerilim ayarlanmaktadır. Motor torkunun kontrol edilmesi için kullanılan gerilim sinyali kapalı çevrim bir akım kontrolcüsü tarafından düzenlenmektedir. Modern motor sürücülerinde kullanılan akım ve PWM kontrolcülerini, yüksek band genişliğine sahip kapalı çevrimli kontrol sistemleri olması sebebiyle motorun elektriksel kısmının transfer fonksiyonunun etkisini büyük ölçüde bastırmaktadır. Bu durum sayesinde, gimbal sisteminin elektriksel kısmının modellenmesine gerek kalmadan %100 doğru çalıştığı değerlendirilebilmektedir.

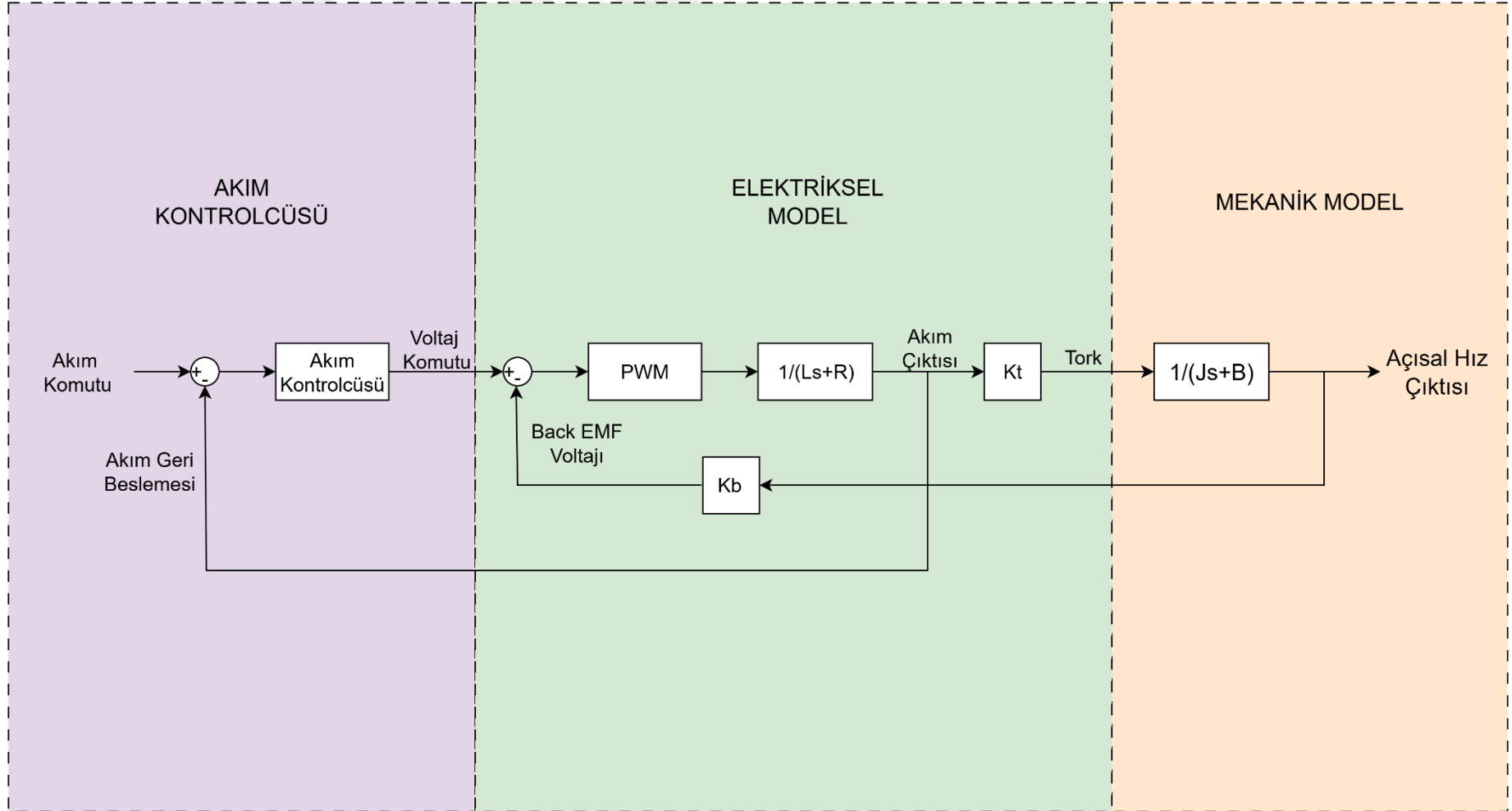
Şekil 2.3'teki gimbal sisteminin elektromekanik modeli sadeleştirilerek Şekil 2.2'deki sadeleştirilmiş gimbal modeli blok diyagramları oluşturulmuştur. Sadeleştirilerek oluşturulan gimbal sistemine ait transfer fonksiyonu denklem 2.11'de bulunmaktadır.



Şekil 2.2 : Sadeleştirilmiş gimbal modeli.

$$\frac{I(s)}{W(s)} = \frac{K_t}{Js + B} \quad (2.11)$$

Bu sayede, gimbal sisteminin dinamik modelinin anlaşılması kolaylaşmış ve fiziksel parametrelerin sistem üzerindeki etkileri net bir şekilde analiz edilebilmiştir. Sistem tanılama uygulamasının basitleştirilerek yapılması için gerekli olan transfer fonksiyonu elde edilmiştir.



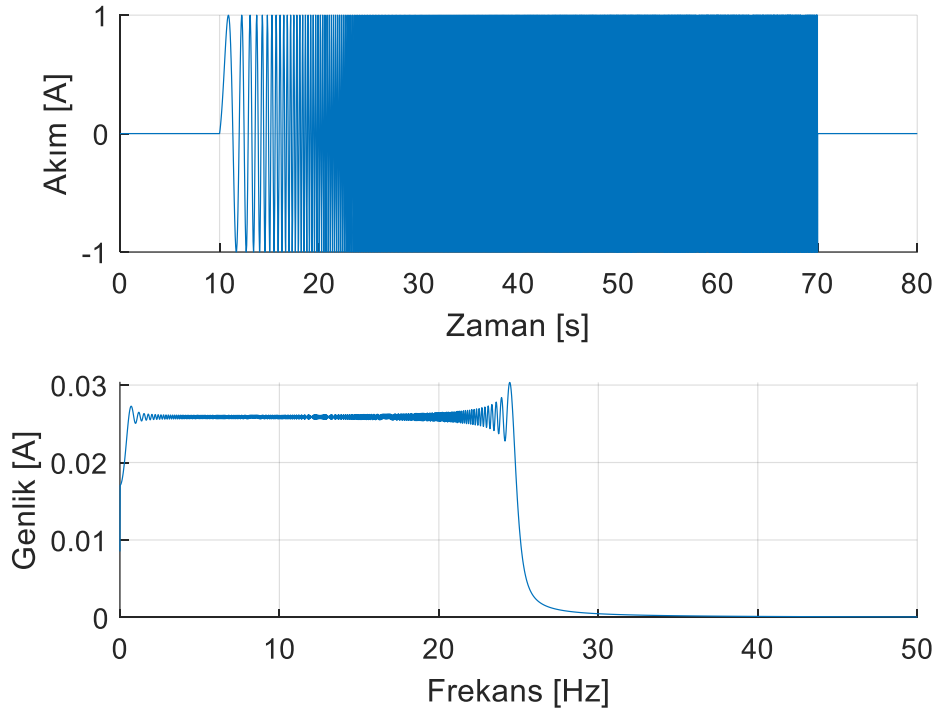
Şekil 2.3 : Gimbal sistem modeli.

2.1.2 Sistem tanılama uygulaması

Gimbal matematik modelinin bilinmeyen parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla gerçek sistem üzerinde hem yanca hem de yükseliş eksenleri için ayrı ayrı sistem tanılama çalışması yapılmıştır. Gimbal sistemine farklı genliklerden oluşan Süprüntü, PRBS ve Frekans Tarama gibi uyarma sinyalleri akım girişi olarak uygulanmış ve jiroskoptan açısal hız sinyalleri çıkış olarak alınmıştır.

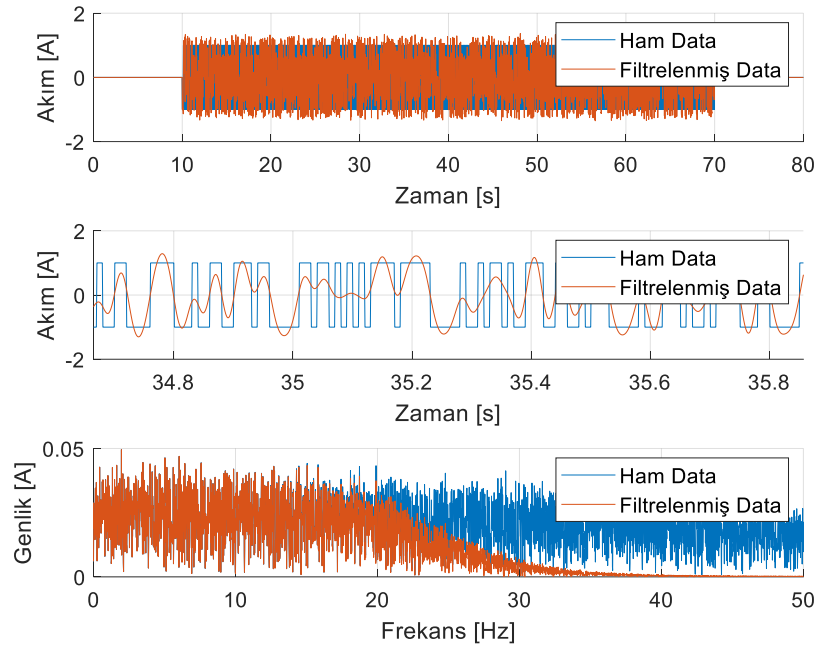
Gimbal sistemine uygulanacak akım komutunun gerçekte karşılaşılmayacak frekanslarda olmaması için yanca ve yükseliş eksenlerinde hedeflenen bant genişliğinin yaklaşık 3 katı olan 25 [Hz]'e kadar uyarma sinyalleri tasarlanmıştır. Uyarma sinyallerinin genlikleri, sistemin dinamik sürtünmesi için gereken eşik akım değerinin üzerinde seçilmiştir.

Süprüntü sinyali MATLAB/Simulink'teki Chirp Signal bloğu kullanılarak 0.1 [Hz]'den 25 [Hz]'e kadar 60 [s] süre için tasarlanmıştır. Zaman ve frekans alanlarında sinyalin grafikleri Şekil 2.4'te bulunmaktadır.



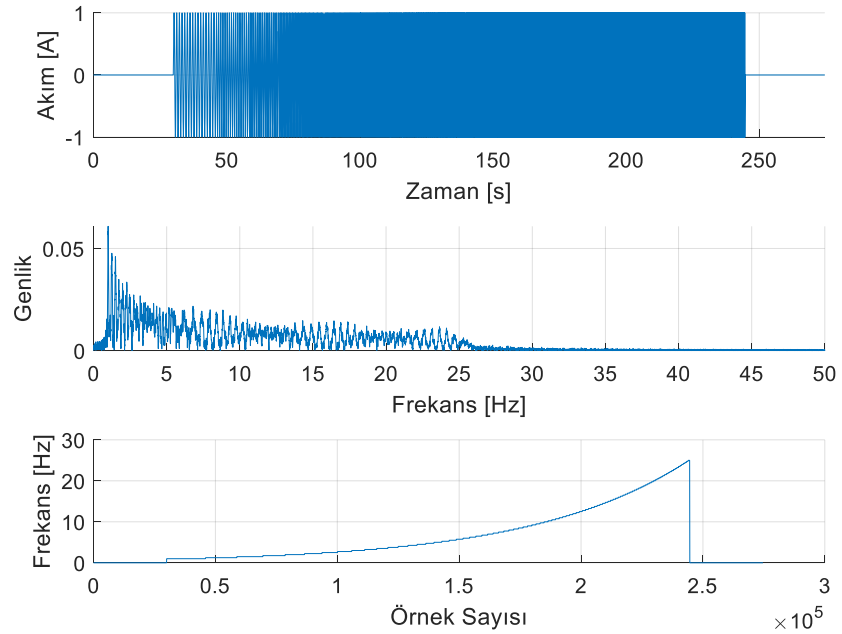
Şekil 2.4 : Süprüntü sinyali tasarımı.

PRBS sinyali 60 [s] süre için tasarlanmış ve 25 [Hz] düşük geçirgen filtre ile filtrelenmiştir [47]. Zaman ve frekans alanlarında sinyalin grafikleri Şekil 2.5'te bulunmaktadır.



Şekil 2.5 : PRBS sinyali tasarımı.

Frekans Tarama sinyali 1 [Hz]'den 25 [Hz]'e kadar 0.25 [Hz] artışla oluşturulmuştur. Sistemin dinamiklerinin ortaya çıkarılması amacıyla her frekansın 16 defa tekrar etmesi sağlanmıştır [48,49]. Zaman ve frekans alanlarında sinyalin grafikleri Şekil 2.6'da bulunmaktadır.



Şekil 2.6 : Frekans Tarama sinyali tasarımı.

Sistem tanılama için MATLAB yazılımındaki System Identification uygulaması kullanılmıştır. Yazılıma tanıtılacak transfer fonksiyonu için denklem 2.12'deki kutup sayısı 1 ve sıfır sayısı 0 olan eşitlik kullanılmıştır.

$$Transfer\ Fonksiyonu = \frac{K}{As + B} \quad (2.12)$$

Gerçek sisteme uygulanan akım komutları giriş ve jiroskoptan gelen açısal hız verileri çıkış olarak yüklenmiştir. Matematik modelde oluşturulan transfer fonksiyonundaki bilinmeyen atalet, sürtünme ve tork sabiti değerleri sistem tanılama sonucunda elde edilen transfer fonksiyonu ile denklem 2.13'teki ilişkiye göre hesaplanmıştır.

$$\frac{I(s)}{W(s)} = \frac{K_t}{Js + B} = \frac{K}{As + B} \quad (2.13)$$

Sistem tanılama sırasında akım girişi uygulandığı için transfer fonksiyonundaki atalet ve sürtünme parametreleri tork sabitine bölünmüştür. Denklem 2.13 güncellenerek denklem 2.14 oluşturulmuştur.

$$\frac{I(s)}{W(s)} = \frac{1}{\frac{J}{K_t}s + \frac{B}{K_t}} = \frac{1}{\frac{A}{K}s + \frac{B}{K}} \quad (2.14)$$

Bu sayede, gimbal sisteminin ataleti (J) ve viskoz sürütme katsayısı (B) motor torku (K_t) ile ilişkilendirilerek transfer fonksiyonu akım [A] birimi ile ifade edilebilir hale getirilmiştir. Denklem 2.13'te ifade edilen transfer fonksiyonu sayesinde, modelleme ve kontrol algoritması tasarımında giriş değişkeni olarak akımın kullanılması mümkün hale gelmiştir. Elektriksel giriş ve mekanik çıktı arasındaki bağıntı faha net bir şekilde kurulabilmektedir.

2.1.3 Doğrusal modelin elde edilmesi

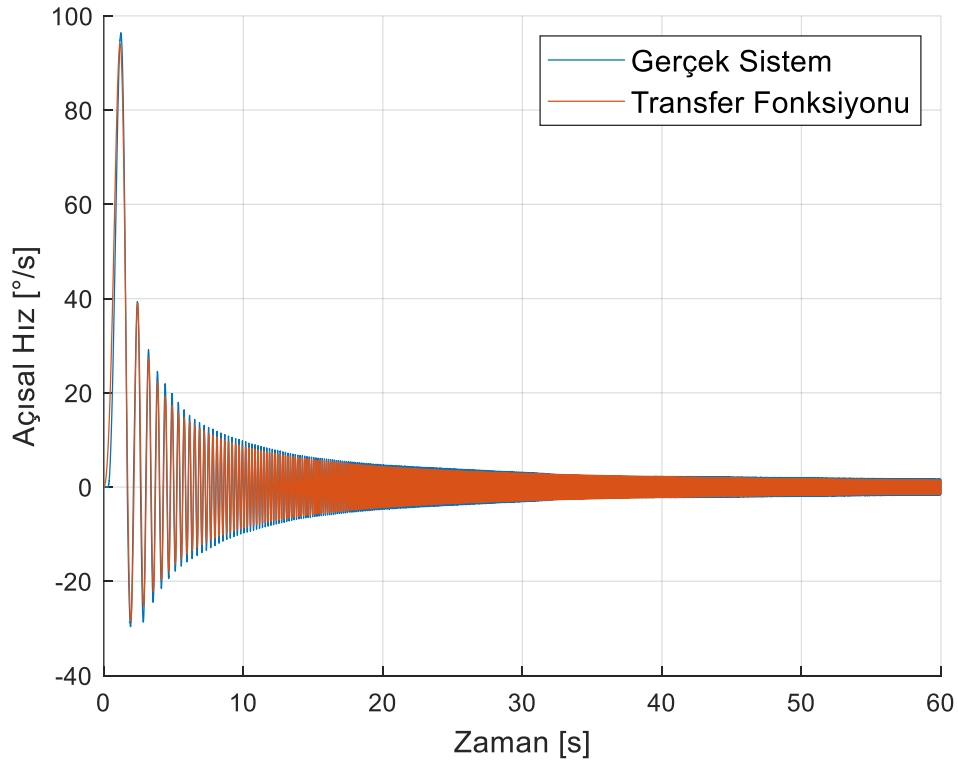
Yanca eksenini için 2.4, 3, 3.6, 4.2 ve 4.8 [A] ve yükseliş eksenini için 4, 4.5, 5, 5.5 ve 6 [A] genliklerinde Süprüntü, PRBS ve Frekans Tarama uyarma sinyalleri akım komutu olarak uygulanmıştır. Sistem tanılama uygulaması her test için yapılarak transfer fonksiyonundaki bilinmeyen parametreler elde edilmiştir. Gerçek sistemden ve simülasyon modelinden elde edilen açısal hız çıktıları için denklem 2.15'teki RMS Doğruluğu ve denklem 2.16'daki VAF Skoru değerleri hesaplanarak modelleme başarıları elde edilmiştir.

$$RMS\ Doğruluğu\ [\%] = \left(1 - \frac{rms(w_{gerçek} - w_{model})}{rms(w_{gerçek})}\right) \times 100 \quad (2.15)$$

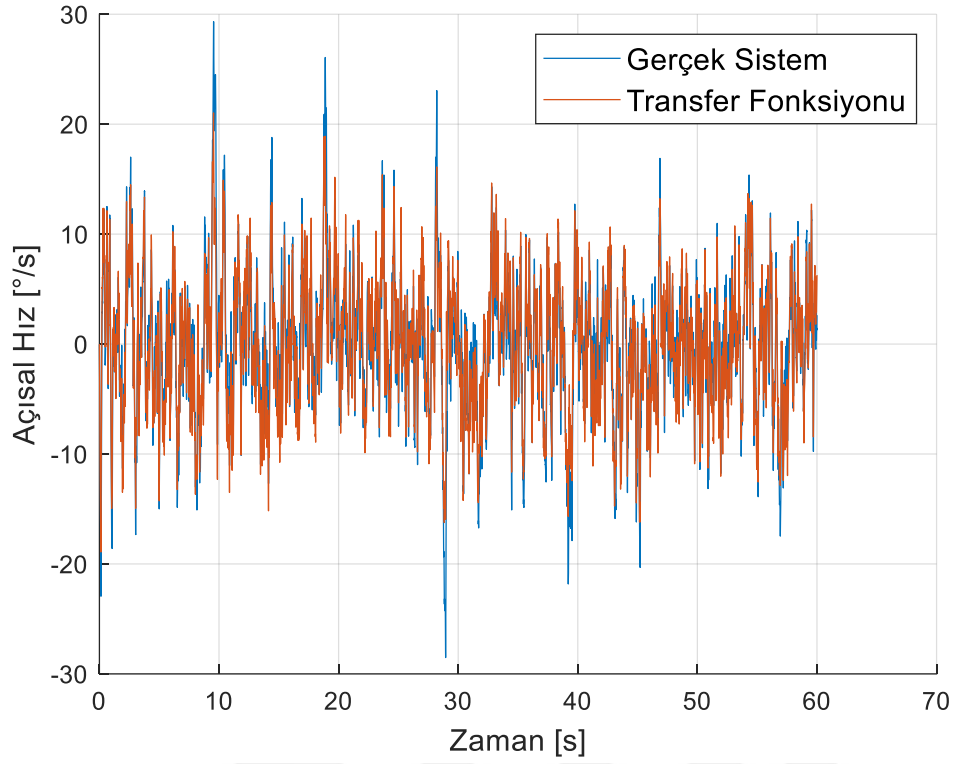
$$VAF\ Skoru\ [\%] = \left(1 - \frac{varyans(w_{gerçek} - w_{model})}{varyans(w_{gerçek})}\right) \times 100 \quad (2.16)$$

Yanca eksenini için sistem tanımlama sonucunda elde edilen transfer fonksiyonu parametreleri ve hesaplanan modelleme performansları Çizelge 2.1’de bulunmaktadır. Yanca eksenini için yapılan değerlendirmede en başarılı modelin, 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali ile elde edildiği görülmüştür. Bu test sonucunda hesaplanan transfer fonksiyonu değerleri, gimbal sisteminin yanca ekseninin transfer fonksiyonu olarak kabul edilmiştir.

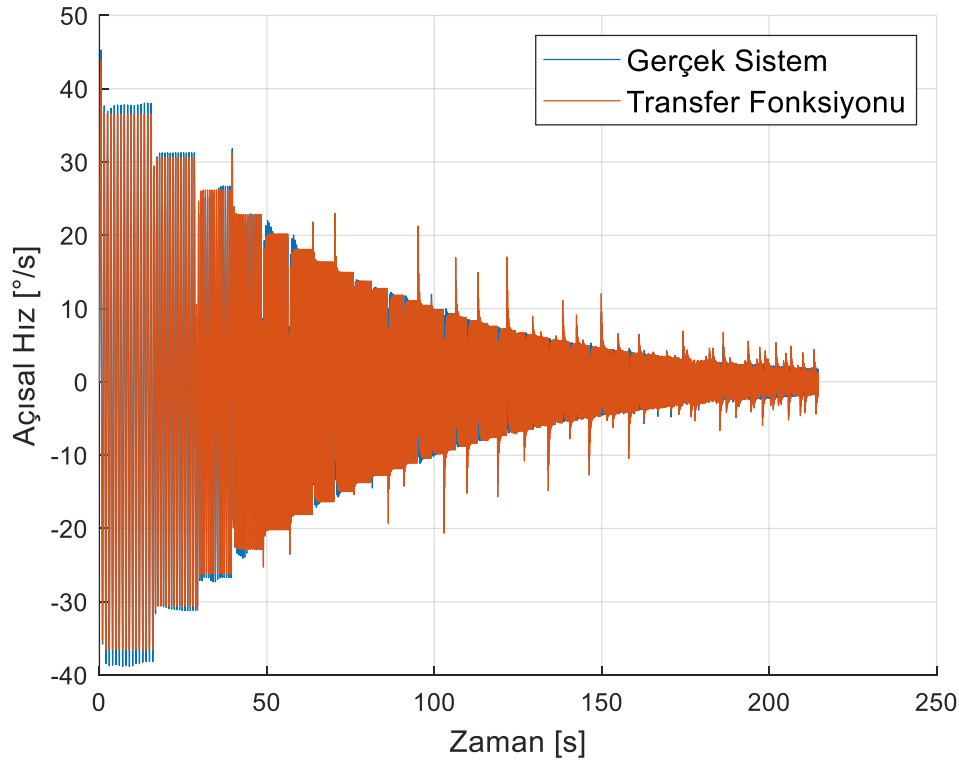
Şekil 2.7’de 4.8 [A] genlikli Süprüntü, Şekil 2.8’de 4.8 [A] genlikli PRBS, Şekil 2.9’da 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyalleri ile sistem tanımlama uygulaması sonrasında elde edilen transfer fonksiyonları ve gerçek sistemin aynı test koşullarında verdiği açısal hız çıktılarının grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 2.7 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli Süprüntü sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.



Şekil 2.8 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli PRBS sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.



Şekil 2.9 : Yanca eksenini 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.

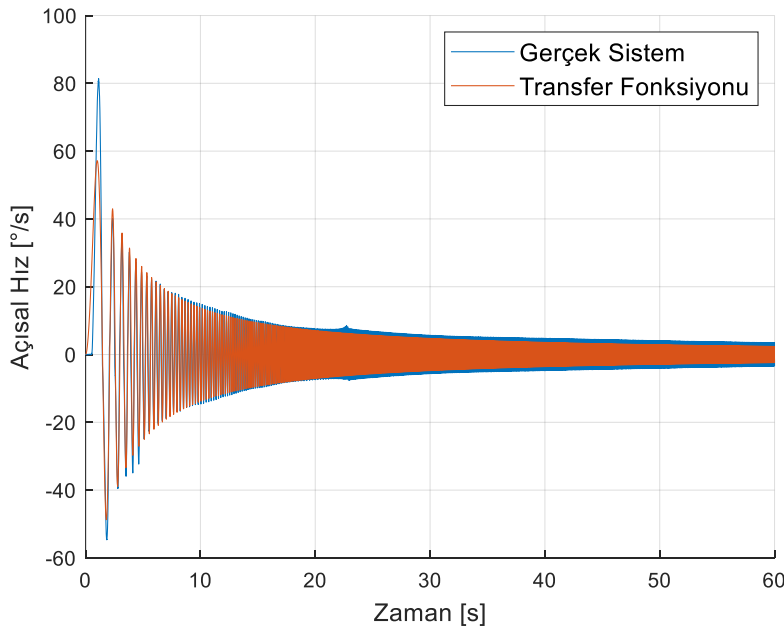
Çizelge 2.1 : Yanca ekseni sistem tanılama sonuçları.

Test No	Uyarma Sinyali	Akım Genlik [A]	K	A	B	J/Kt	B/Kt	RMS Doğruluğu [%]	VAF Skoru [%]
1	Süprüntü	2.4	45.6712	1	5.0012	0.0219	0.1095	66.3936	88.7475
2	Süprüntü	3	47.4671	1	3.8669	0.0211	0.0815	68.3890	90.0280
3	Süprüntü	3.6	47.9118	1	2.1729	0.0209	0.0454	76.7016	94.5644
4	Süprüntü	4.2	47.7013	1	1.6770	0.0210	0.0352	80.2623	96.0767
5	Süprüntü	4.8	48.2747	1	1.4575	0.0207	0.0302	80.5585	96.2003
6	PRBS	2.4	50.2674	1	26.7284	0.0199	0.5317	56.7036	81.7137
7	PRBS	3	50.7095	1	18.4991	0.0197	0.3648	59.2764	83.7399
8	PRBS	3.6	51.0323	1	13.5870	0.0196	0.2662	60.9967	84.9278
9	PRBS	4.2	51.2097	1	10.1567	0.0195	0.1983	63.9432	87.0175
10	PRBS	4.8	51.4234	1	8.3323	0.0194	0.1620	65.8128	88.3095
11	Frekans Tarama	2.4	53.6959	1	8.3323	0.0186	0.1552	79.1433	95.6522
12	Frekans Tarama	3	53.4347	1	6.7268	0.0187	0.1259	82.3678	96.8932
13	Frekans Tarama	3.6	54.7624	1	5.0202	0.0183	0.0917	85.1759	97.8033
14	Frekans Tarama	4.2	54.7788	1	4.1155	0.0183	0.0751	86.6240	98.2114
15	Frekans Tarama	4.8	54.9894	1	3.5710	0.0182	0.0649	88.3800	98.6504

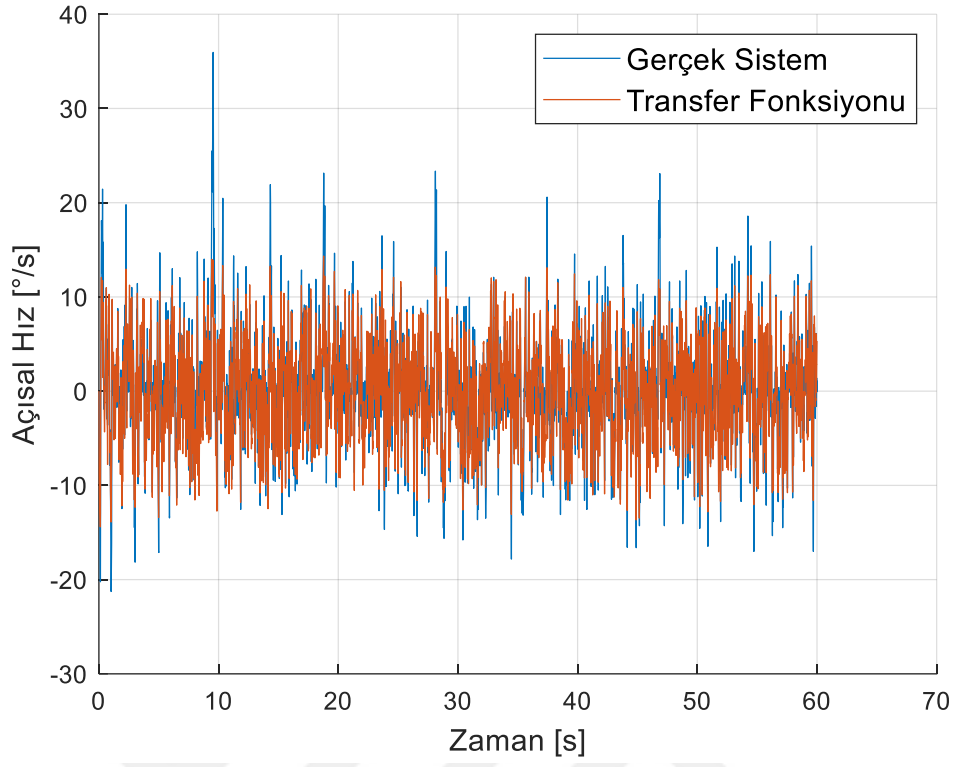
Yükseliş eksenini için sistem tanılama sonucunda elde edilen transfer fonksiyonu parametreleri ve hesaplanan modelleme performansları Çizelge 2.2’de bulunmaktadır. Yükseliş eksenini için yapılan değerlendirmede en başarılı modelin, 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali ile elde edildiği görülmüştür. Bu test sonucunda hesaplanan transfer fonksiyonu değerleri, gimbal sisteminin yükseliş ekseninin transfer fonksiyonu olarak kabul edilmiştir.

Hem Çizelge 2.1 hem de Çizelge 2.2’de, frekans tarama sinyali kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu parametrelerinin, gerçek sistem cevabı ile karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, frekans tarama sinyalinin sistemin dinamik karakteristiğinin belirlenmesinde daha etkin bir rol oynadığını göstermektedir. Buna karşılık, PRBS sinyal profili yapısı gereği bazı frekans bölgelerinde sistem dinamiklerini yeterince uyaramaması ve gürültüye karşı daha hassas olması nedeniyle, sistem tanılama sonucunda elde edilen transfer fonksiyonlarının gerçek sistemi yeterli doğrulukta yansıtamadığı değerlendirilmiştir.

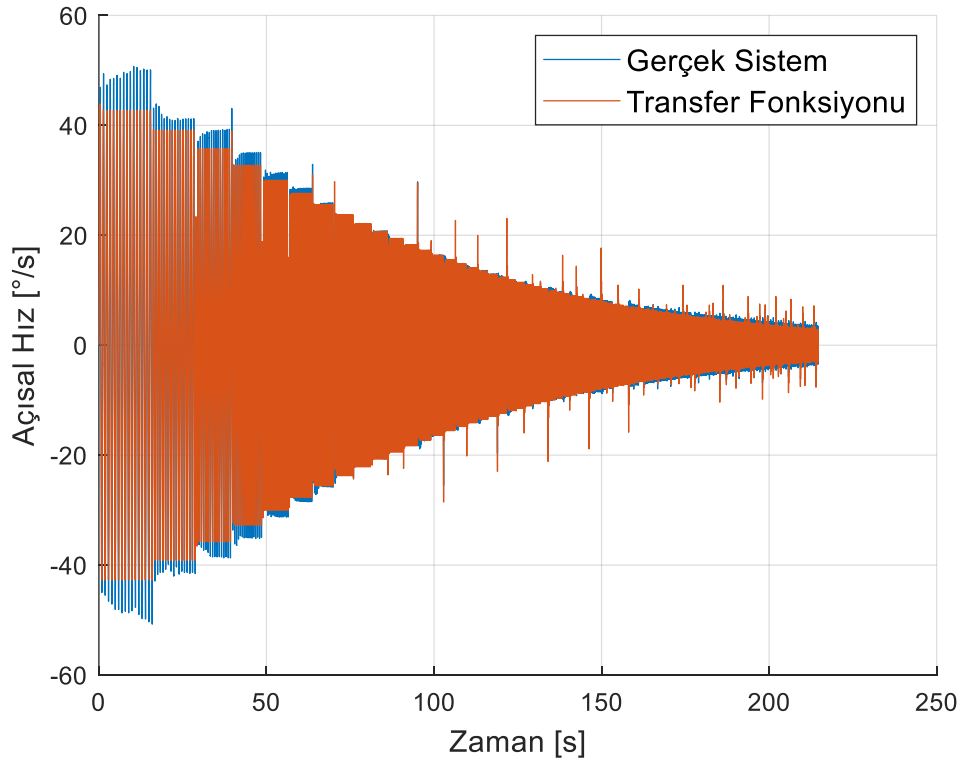
Ek olarak; Şekil 2.10’da 6 [A] genlikli Süprüntü, Şekil 2.11’de 6 [A] genlikli PRBS, Şekil 2.12’de 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyalleri ile sistem tanılama uygulaması sonrasında elde edilen transfer fonksiyonları ve gerçek sistemin aynı test koşullarında verdiği açısal hız çıktılarının grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 2.10 : Yükseliş eksenini 6 [A] genlikli Süprüntü sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.



Şekil 2.11 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli PRBS sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.



Şekil 2.12 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali simülasyon ve gerçek sistem karşılaştırması.

Çizelge 2.2 : Yükseliş ekseni sistem tanılama sonuçları.

Test No	Uyarma Sinyali	Akım Genlik [A]	K	A	B	J/Kt	B/Kt	RMS Doğruluğu [%]	VAF Skoru [%]
1	Süprüntü	4	81.6509	1	38.7795	0.0122	0.4749	65.4037	88.0543
2	Süprüntü	4.5	73.3549	1	19.5144	0.0136	0.2660	62.7025	86.0784
3	Süprüntü	5	64.2445	1	13.1135	0.0156	0.2041	58.9310	83.1124
4	Süprüntü	5.5	58.9043	1	7.4626	0.0170	0.1267	60.1320	84.0752
5	Süprüntü	6	63.0522	1	6.1012	0.0159	0.0968	64.1511	87.1471
6	PRBS	4	70.2696	1	75.4818	0.0142	1.0742	49.7384	74.8648
7	PRBS	4.5	72.0377	1	55.8001	0.0139	0.7746	52.2803	77.6010
8	PRBS	5	73.2021	1	45.2382	0.0137	0.6180	52.8824	78.0477
9	PRBS	5.5	74.2434	1	37.1831	0.0135	0.5008	54.0823	79.1226
10	PRBS	6	74.8679	1	31.4334	0.0134	0.4199	55.5348	80.3857
11	Frekans Tarama	4	70.8938	1	28.8519	0.0141	0.4070	65.5576	88.1436
12	Frekans Tarama	4.5	69.9369	1	16.9989	0.0143	0.2431	71.0312	91.6114
13	Frekans Tarama	5	72.1494	1	13.7709	0.0139	0.1909	74.2583	93.3754
14	Frekans Tarama	5.5	74.8871	1	10.9632	0.0134	0.1464	77.7285	95.0409
15	Frekans Tarama	6	76.6888	1	8.7517	0.0130	0.1141	79.9028	95.9618

2.2 Doğrusal Olmayan Modelleme ve Tanılama

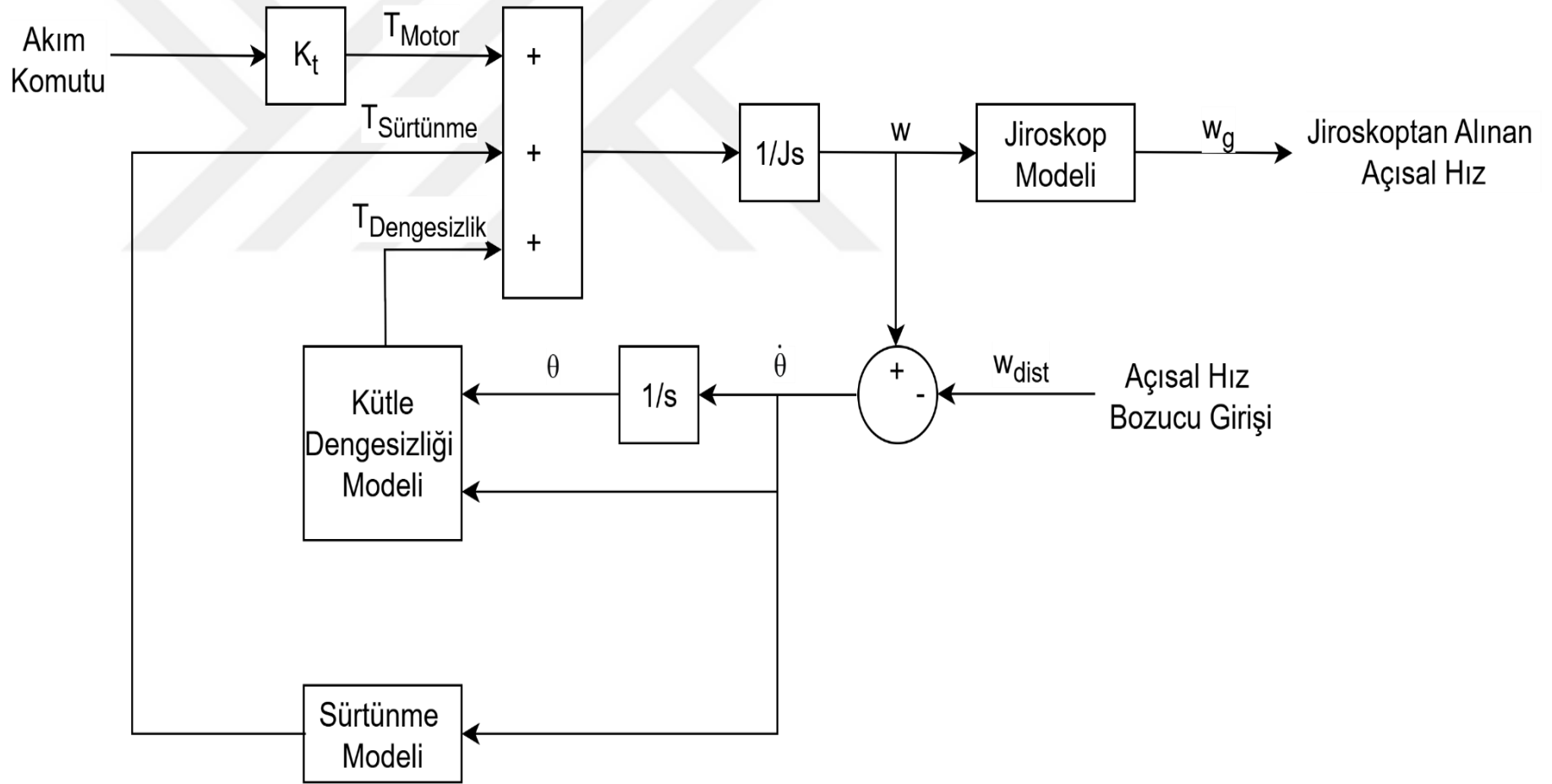
Gimbal sisteminin dinamik modelinin doğruluğunun artırılması ve gerçek sistem davranışının daha gerçekçi bir şekilde temsil edebilebilmesi amacıyla, doğrusal olmayan etkilerin de modellenerek sistem dinamiğine entegre edilmesi gerekmektedir. Sistem tanıma sonucunda seçilen doğrusal transfer fonksiyonuna ait atalet parametre değerine doğrusal olmayan dinamiklerin modelleri eklenerek doğrusal olmayan dinamik model elde edilmiştir.

Bu bölümde, gimbal sisteminin bulunduğu açısal pozisyona, açısal hızının büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak değişen sürtünme ve kütle dengesizliği etkileri, gerçekleştirilen kontrollü deneysel testler ile analiz edilerek uygun matematik modeller oluşturulmuştur. Ek olarak, sistemin açısal hız çıkışının daha iyi modellenebilmesi için bir jiroskop modellemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrasında gimbal sisteminin doğrusal olmayan dinamik modeline ait temsili blok diyagramlar Şekil 2.13'te oluşturulmuştur.

Gimbal sisteminin bağlı bulunduğu platformdan gelebilecek, atış şoku ve yol titreşimleri, gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerine ayrı ayrı açısal hız bozucu girişleri olarak yansımaktadır. Gimbal sistemlerinde kullanılan stabilizasyon algoritmaları genellikle jiroskop geri beslemeli açısal hız kontrolüne dayalı olduğundan, bu bozucu etkiler ölçümlere doğrudan etki etmektedir. Bu çalışma kapsamında, bozucu etkiler, açısal hız bozucu girişleri şeklinde modellenmiştir.

Şekil 2.13'te kullanılan parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

- K_t : Tork sabiti – [Nm/A]
- J : Motor ve faydalı yükün atalet momenti – [kgm²]
- T_{Motor} : Motora uygulanan tork – [Nm]
- $T_{Sürtünme}$: Sürtünmeden kaynaklanan bozucu tork – [Nm]
- $T_{Dengesizlik}$: Kütle dengesizliğinden kaynaklanan bozucu tork – [Nm]
- w : Motor şaftının açısal hızı – [rad/s]
- w_g : Jiroskoptan gelen açısal hız – [rad/s]
- w_{dist} : Bozucu açısal hız girişi – [rad/s]
- θ : Enkoderden gelen açısal pozisyon – [rad]
- $\dot{\theta}$: Enkoderden gelen açısal pozisyondan türetilen açısal hız – [rad/s]



Şekil 2.13 : Doğrusal olmayan sistem dinamik modeli.

2.2.1 Sürtünme modeli

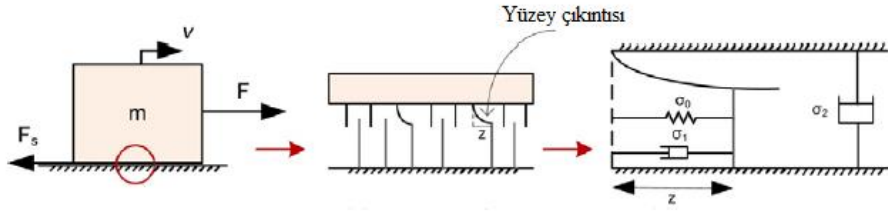
Sürtünme, iki mekanik yüzeyin birbirine temas ederek kayma hareketi yaptığı durumlarda ortaya çıkan ve bu harekete karşı koyan direnç kuvvetidir. Gelişmiş servo sistemlerden pnömatik ve hidrolik aktüatörlerin kontrolüne, otomotiv fren sistemlerinden robotik mekanizmalara kadar birçok alanda sürtünme etkileri doğrusal olmayan ve genellikle tahmin edilmesi zor davranışlar sergilemektedir [18]. Bu nedenlerle, hassas kontrol gerektiren kontrol mühendisliği uygulamalarında sürtünmenin doğasının iyi anlaşılması ve bu etkiye karşı etkili yöntemler geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Sürtünmenin anlık hızla değiştiği klasik modeller; Coulumb sürtünmesi, viskoz sürtünme ve Stribeck etkisi ile tanımlanabilmektedir. Ancak bu modeller, özellikle sıfıra yakın hızlarda görülen yapışma-kayma davranışının karmaşık dinamiğini tam olarak temsil edemezler. Bu nedenle, sürtünmenin sadece anlık hıza değil, zamanla değişen mikrodinamik etkilerinin de tanımlandığı Dahl, Bristle, LuGre gibi dinamik sürtünme modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller sürtünme dinamiği etkilerini yüksek doğrulukla açıklayabilmekte ve hassas kontrol uygulamaları için güçlü bir model sunmaktadır.

2.2.1.1 LuGre sürtünme modeli

LuGre sürtünme modeli, klasik sürtünme modellerinin yetersiz kaldığı uygulamalarda Dahl sürtünme modeline sönümlenme ve viskoz etkileri de ekleyerek hem kayma öncesi hem de kayma sonrası sürtünme davranışlarının başarıyla temsil edildiği bir sürtünme modelidir. Literatürde sıklıkla gimbal sistemlerinin sürtünme davranışlarının modellenmesi aşamasında kullanılmaktadır.

LuGre sürtünme modeli aşağıdaki şekil 2.14'te görülen hareketli yüzeyler arasındaki mikroskobik yüzey çıkıntılarının elastik yapılar gibi davranarak bükülmesi ve deformasyona uğraması prensibine dayanmaktadır. Her bir yüzey çıkıntısı kendi başına çok düşük bir etkiye sahip olsa da temas yüzeyindeki toplam deformasyon ve hareket sürtünme kuvvetini oluşturmaktadır. Bu model, yüzeyler arasındaki sürtünme mekaniğinin sadece hıza değil, temas yüzeyindeki mikroskobik yapıların zamanla gösterdiği dinamik tepkiye bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, gimbal sistemleri gibi düşük hızlarda ve sürekli yön değiştirerek hareket eden sistemlerde gözlemlenen yapışma-kayma karmaşık davranışını açıklayabilmektedir.



Şekil 2.14 : LuGre Sürtünme modeli dinamiği [53].

Dönen cisimlerde, LuGre sürtünme modeli aşağıdaki eşitliklerle matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Denklem 2.17 ve denklem 2.18'deki eşitlikler ile LuGre sürtünme modeli tanımlanabilmektedir. Sürtünmenin düşük hızlardaki geçiş davranışı ise denklem 2.19'daki stribeck fonksiyonu ile gösterilmektedir [18].

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{s(v)} z \quad (2.17)$$

$$T_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (2.18)$$

$$s(v) = T_c + (T_b - T_c) e^{\left(\frac{|v|}{v_s}\right)^\xi} \quad (2.19)$$

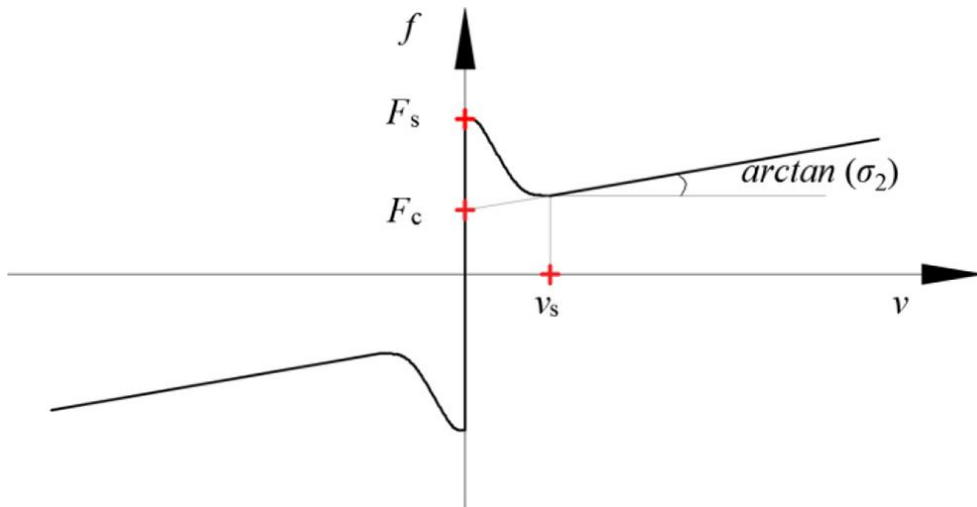
Bu denklemlerdeki parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

- T_f : LuGre sürtünme modeli sonucu tahmin edilen sürtünme momenti
- T_c : Sabit hızla hareket için Coulomb sürtünme momenti
- T_b : Statik sürtünme momenti
- v : İki yüzey arasındaki bağıl hız
- z : İç sürtünme durumu
- σ_0 : Yay katsayısı
- σ_1 : İç sönümlenme katsayısı
- σ_2 : Viskoz sürtünme katsayısı
- $s(v)$: Stribeck fonksiyonu
- v_s : Stribeck fonksiyonu karakteristik geçiş hızı
- ξ : Stribeck fonksiyonu şekil faktörü (Literatürdeki örnek uygulamalarda 1 olarak kabul edilmektedir.)

LuGre sürtünme modeli, kayma öncesi ve kayma sonrası sürtünme davranışlarını birlikte temsil edebilen dinamik bir model olup matematik eşitliklerinde bu iki rejime karşılık gelen parametrelerden oluşmaktadır. Kayma sonrası rejim, sistemin hareket halinde kararlı bir yapıda ve sürtünme momentinin belirli bir sabit değeri etrafında değiştiğı davranış bölgesidir. Bu bölge, hıza bağılı olarak değişen Coulumb sürtünmesi, viskoz sürtünme ve Stribeck etkisi statik parametreleri ile tanımlanabilmektedir. Kayma ncesi rejim, sistemin hızının sıfıra çok yakın veya sıfır olduğu ve sisteme uygulanan moment neticesinde mikroskobik yüzey çıkıntılarının elastik olarak deformasyona uğradığı davranış bölgesidir. Yüzey çıkıntıları, sönüm ve yay elemanı olarak modellenmektedir. Bu rejim bölgesinde, yüzeyler arasında enerji birikimi varken kayma henüz başlamamıştır. Kayma ncesi ve kayma bölgeleri için gerçekte sistem üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla LuGre sürtünme modeli parametreleri bulunabilmektedir. Kayma fazı için sürtünme momenti, denklem 2.20 ile tanımlanmaktadır. Bu denklemde, T_{ss} sistemin kayma fazında ulaştığı sürtünme momentini ifade etmektedir.

$$T_{ss} = T_c + (T_b - T_c)e^{\left(\frac{|v|}{v_s}\right)^\xi} + \sigma_2 v \quad (2.20)$$

Kayma fazı parametrelerinin deneysel olarak elde edilebilmesi için sistem başlangıçta hareketsiz durumda iken, açısal hız komutu küçük adımlarla arttırılarak uygulanır ve açısal hız-akım grafiğı oluşturulur. Ardından Şekil 2.15'te gösterildiğı gibi kayma faz parametreleri grafik üzerinden bulunur.



Şekil 2.15 : LuGre sürtünme modeli – kayma fazı parametreleri [51].

Ardından, bulunan parametre değerleri denklem 2.21'deki maliyet fonksiyonu ile optimize edilerek deneysel veriye en fazla benzer parametreler seçilir. Optimizasyon işlemi için MATLAB'deki fmincon fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\min I = \sum_{i=1} [\tilde{T}_{ss} - T_{ss}] \quad (2.21)$$

Sistemin bağıl hızının neredeyse sıfır olduğu ve yüzeyler arasındaki mikroskobik temas noktalarının elastik deformasyona uğradığı kayma öncesi fazı sürtünmesi için σ_0 ve σ_1 parametreleri bulunmalıdır. Literatür araştırmasında bu değerlerin hesaplanması için test yöntemleri ve formüller olduğu görülse de, bu çalışma kapsamında gerçek sistem üzerinde yapılan testler sonucunda başarılı performans elde edilememiştir. Bu sebeple, doğrusal olmayan dinamik model üzerinde modelleme performansını arttırabilmek amacıyla denemeler yapılmış ve optimum değerler bulunarak nihai sonuç olarak kabul edilmiştir.

2.2.1.2 Yanca eksenli LuGre sürtünme modelinin oluşturulması

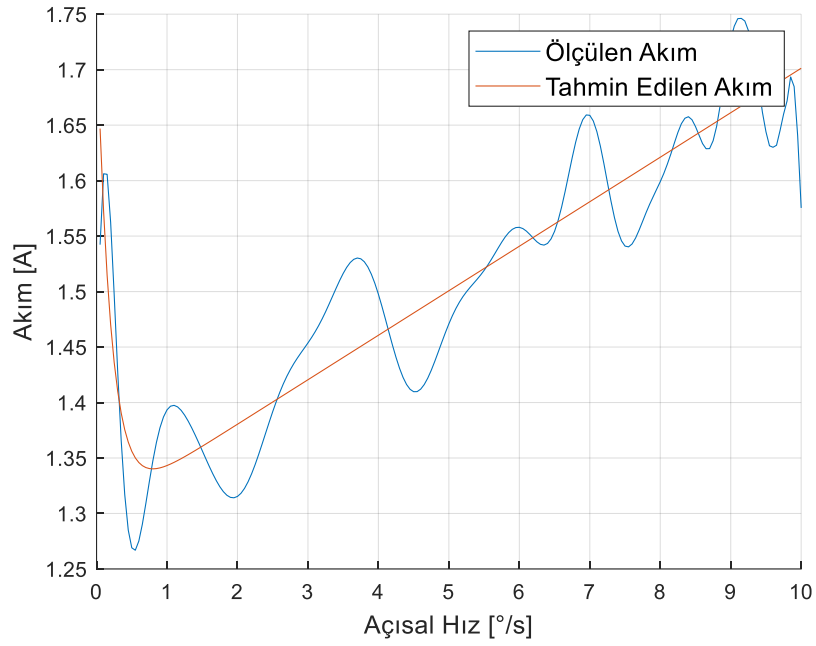
Gimbal sisteminin yanca eksenine hem pozitif hem de negatif yönlerdeki hareket için LuGre sürtünme modeli parametreleri deneysel testlerle hesaplanmış ve oluşturulmuştur. Şekil 2.16'da pozitif yönlü ve Şekil 2.17'de negatif yönlü hareketin kayma fazı sürtünmesi için oluşturulan gerçek sistemden ölçülen ve kayma fazı sürtünme modeli ile tahmin edilen akım grafikleri bulunmaktadır. Çizelge 2.3'te ise fmincon kazanç fonksiyonu ile hesaplanan parametreler gösterilmektedir. Kayma fazı öncesi sürtünme parametrelerini bulabilmek için yapılan deneme-yanılmalar sonucunda Çizelge 2.4'teki değerler kabul edilmiştir.

Çizelge 2.3 : Yanca eksenli pozitif ve negatif yönlü kayma fazı parametre değerleri.

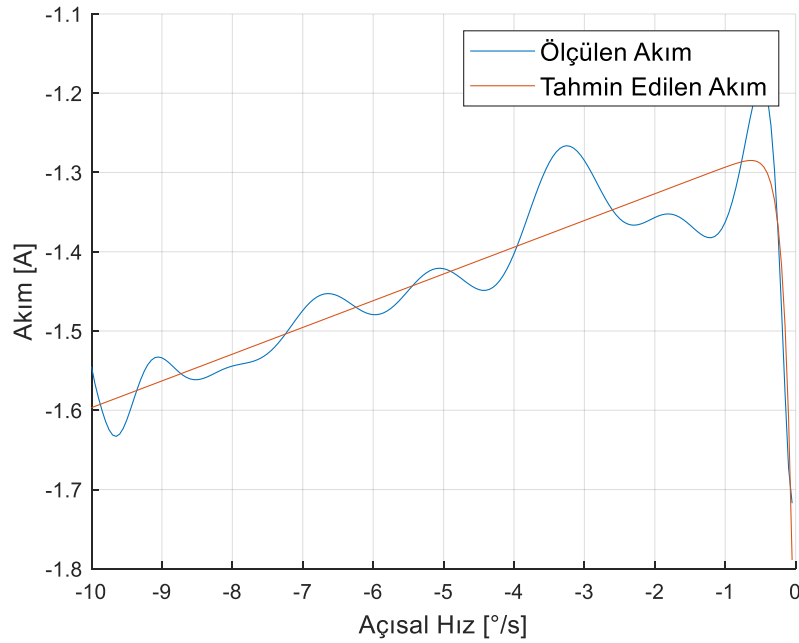
Parametre	Pozitif Yön	Negatif Yön
T_b	1.74	2.06
T_c	1.3	1.26
v_s	0.2	0.12
σ_2	26	13

Çizelge 2.4 : Yanca eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı öncesi parametre değerleri.

Parametre	Pozitif Yön	Negatif Yön
σ_0	0.18	0.22
σ_1	0.012	0.012



Şekil 2.16 : Yanca eksenini pozitif yönlü kayma fazı.



Şekil 2.17 : Yanca eksenini negatif yönlü kayma fazı.

2.2.1.3 Yükseliş eksenini LuGre sürtünme modelinin oluşturulması

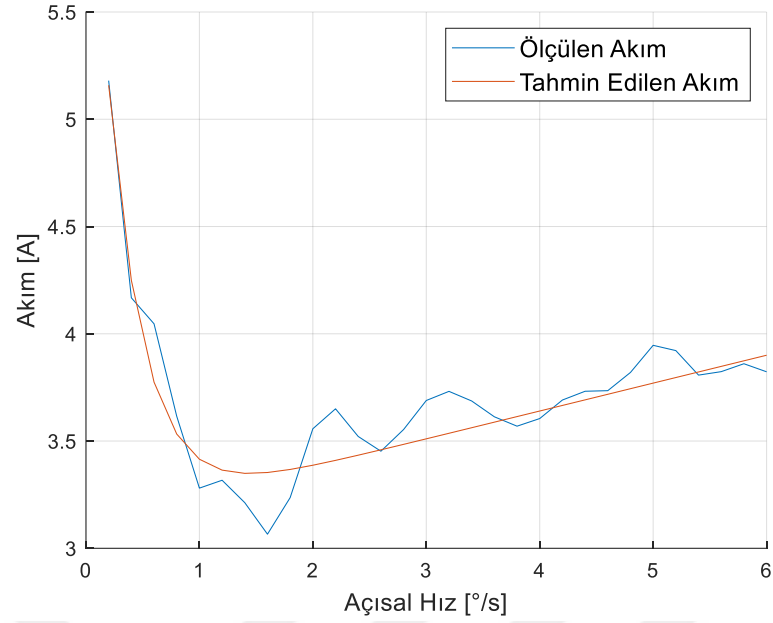
Gimbal sisteminin yanca eksenine hem pozitif hem de negatif yönlerdeki hareket için LuGre sürtünme modeli parametreleri deneysel testlerle hesaplanmış ve oluşturulmuştur. Şekil 2.18’de pozitif yönlü ve Şekil 2.19’da negatif yönlü hareketin kayma fazı sürtünmesi için oluşturulan gerçek sistemden ölçülen ve kayma fazı sürtünme modeli ile tahmin edilen akım grafikleri bulunmaktadır. Çizelge 2.5’te ise fmincon kazanç fonksiyonu ile hesaplanan parametreler gösterilmektedir. Kayma fazı öncesi sürtünme parametrelerini bulabilmek için yapılan deneme-yanılmalar sonucunda Çizelge 2.6’daki değerler kabul edilmiştir.

Çizelge 2.5 : Yükseliş eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı parametre değerleri.

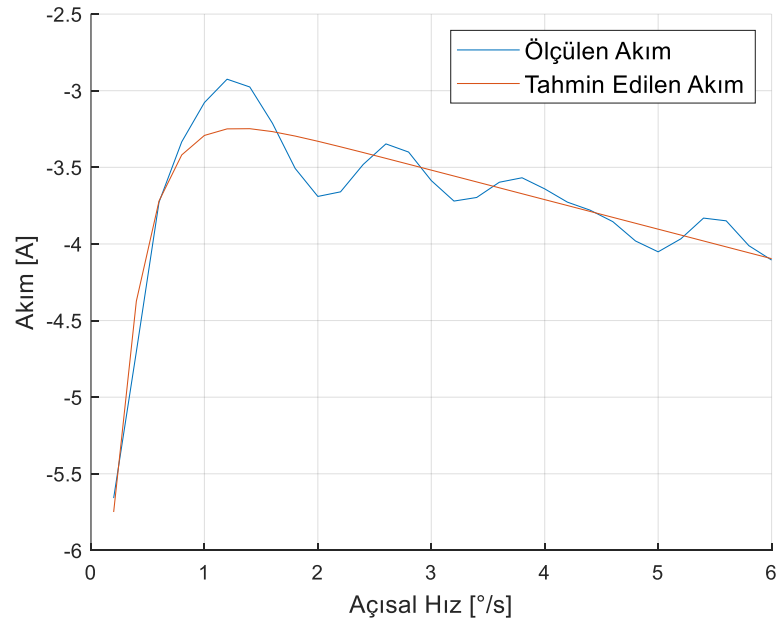
Parametre	Pozitif Yön	Negatif Yön
T_b	6.88	8.60
T_c	3.12	2.94
v_s	0.32	0.28
σ_2	0.012	0.017

Çizelge 2.6 : Yükseliş eksenini pozitif ve negatif yönlü kayma fazı öncesi parametre değerleri.

Parametre	Pozitif Yön	Negatif Yön
σ_0	54	15.4
σ_1	0.3675	0.1950



Şekil 2.18 : Yükseliş eksenini pozitif yönlü kayma fazı.



Şekil 2.19 : Yükseliş eksenini negatif yönlü kayma fazı.

2.2.2 Kütle dengesizliği modeli

Sistemin kütle dağılımına bağlı olarak ortaya çıkan ve dönme dinamiklerini etkileyen kütle dengesizliği statik ve dinamik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Statik kütle dengesizliği, dönen bir cismin henüz harekete başlamadan kütle merkezinin dönme merkezi ile çakışmaması durumunda ortaya çıkmaktadır. Mekanik tasarım aşamasında, kütlelerin dengeli bir şekilde yerleştirilmesi veya karşıt kütle ekleyerek

mekanik olarak kütlenin dengelenmesi ile statik kütle dengesizliği engellenebilir. Dinamik kütle dengesizliği ise, dönen bir cismin dönme merkezi etrafında hareketi sırasında ortaya çıkan ve zamanla değişen dengesizlik momenti olarak tanımlanabilmektedir. Bu etki, cismin atalet matrisinin çapraz değerlerinin sıfır olmaması sebebiyle görülmektedir. Sistemin hızlanması sırasında eksenler arasındaki etkileşimler artarak dinamik kütle dengesizliği daha belirgin hale gelmektedir. Sistemin hareketi sırasında ortaya çıktığı için mekanik tasarım aşamasında ortadan kaldırılamayan bu dinamik etki, özellikle hassas modelleme ve kontrol uygulamalarında sistem performansını doğrudan etkileyen önemli bir bozucu unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Gimbal sistemleri gibi hassas yönlendirme gerektiren uygulamalarda bu etkinin de sistemin dinamik modeline dahil edilmesi sayesinde simülasyon modeli ve gerçek sistem arasında daha uyumlu bir model kurulabilmektedir.

Yanca ve yükseliş eksenleri, sistemin dinamik kütle dengesizliği karakteristiklerini belirlemek amacıyla, pozitif ve negatif yönlerde ayrı ayrı 3, 6, 10 ve 30 [deg/s] açısal hızlarında tüm açıl aralığını kapsayacak şekilde döndürülmüştür. Her açısal hız değeri için üçüncü dereceden açısal pozisyona bağlı akım polinomları oluşturulmuştur. Bu polinomlar kullanılarak, her bir açısal pozisyon için teorik akım değerleri tahmin edilmiştir. Gerçek sistemden elde edilen akım verileri ile bu polinomlardan elde edilen tahmini akım değerleri karşılaştırılmış ve polinomların başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Pozitif ve negatif yönler için oluşturulan polinomların, açısal pozisyonlara karşılık gelen akım tahminleri bulunmuştur. Bu iki akım verisinin içinde hem sürtünme hem de kütle dengesizliği için harcanan akım verisi de bulunacağı öngörülmüştür. Bu iki veri birbirinden çıkarılıp farkı alınarak yarıya bölünmüş ve dinamik kütle dengesizliği sebebiyle çekilen açısal pozisyona bağlı akım verisi bulunmuş ve denklem 2.22'deki gibi üçüncü dereceden dinamik kütle dengesizliği polinomu elde edilmiştir. Bu denklemdeki A, B, C ve D parametreleri bilinmeyen katsayıları temsil etmektedir.

$$\text{Kütle dengesizliği polinomu} = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (2.22)$$

Farklı açısal hızlarda yapılan testler için yapılan hesaplamalar sonrasında, elde edilen polinomlarının katsayıları arasında ilişki kurularak dinamik kütle dengesizliğini temsil eden modeller oluşturulmuştur.

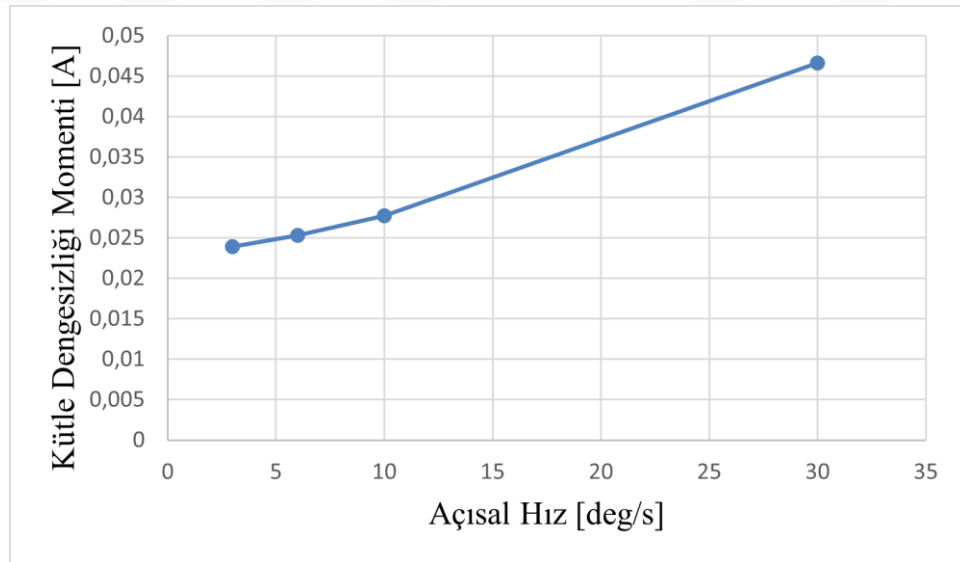
2.2.2.1 Yanca eksenı kütıe dengesizliği tanımlanması

Yanca eksenine pozitif ve negatif yönlerde uygulanan 3, 6, 10 ve 30 [deg/s] açısal hız komutları testleri sonrasında her hız değeri için dinamik kütıe dengesizliği polinomları Çizelge 2.7’deki gibi hesaplanmıştır. Şekil 2.20’de 3 [deg/s] ve Şekil 2.21’de 30 [deg/s] sabit açısal hızda hareket için yapılan testlere ilişkin grafikler bulunmaktadır.

Çizelge 2.7 : Yanca eksenı farklı hızlar için kütıe dengesizliği polinom katsayıları.

Açısal Hız [deg/s]	A	B	C	D
3	0	0	0.0001	0.0239
6	0	0	0	0.0253
10	0	0	0	0.0277
30	0	0	0.0001	0.0466

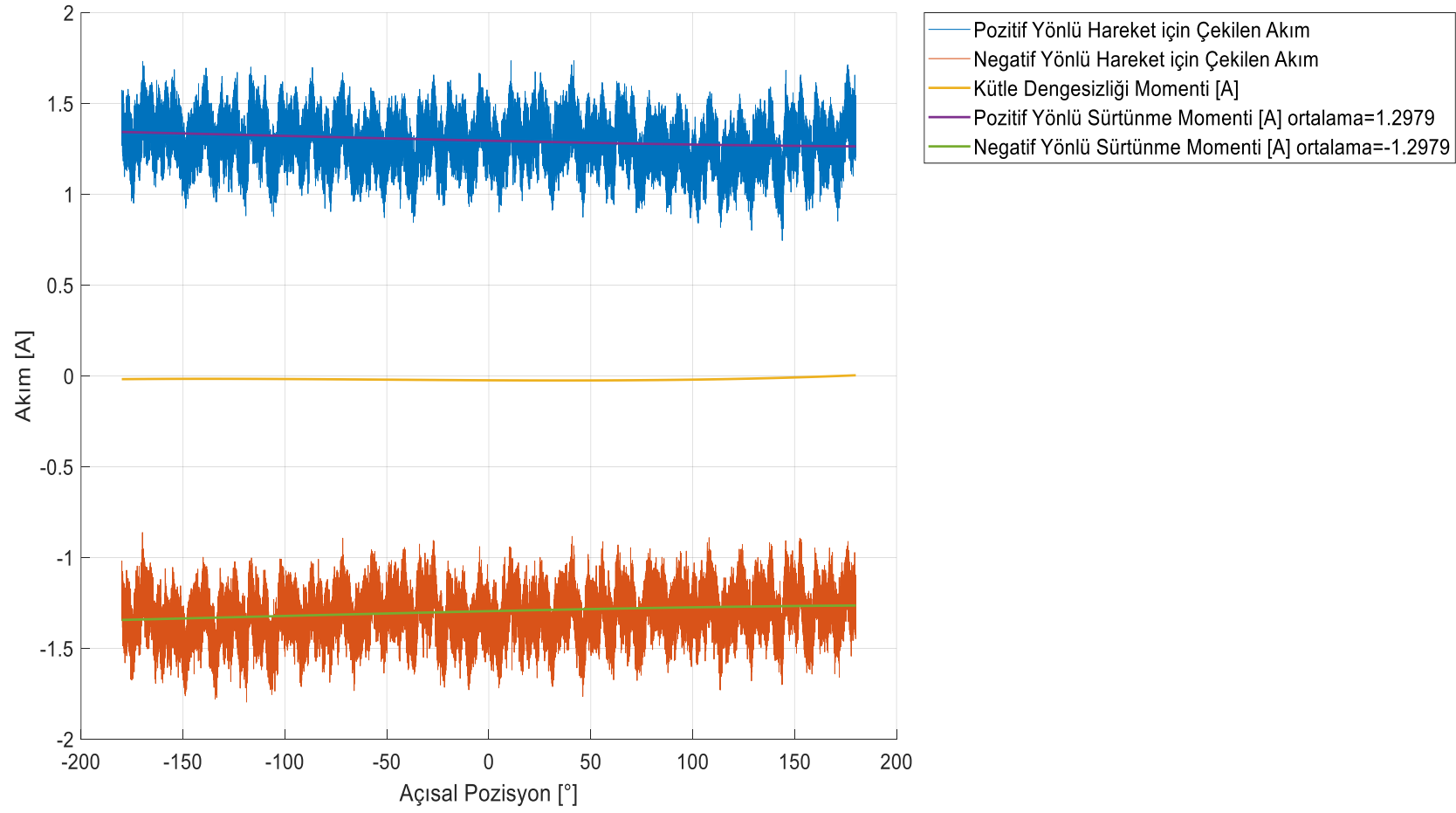
Çizelge 2.7 incelendiğinde, polinomdaki açısal pozisyona göre değışen katsayıların önemsiz olduğunu ve açısal hızın artmasıyla polinomdaki sabit katsayının artması ise santrifüj etkiden dolayı kütıe dengesizliğinin arttığını göstermektedir. Bu sebeple, dinamik kütıe dengesizliği yanca eksenı için açısal hıza bağlı olarak modellenmiştir. Şekil 2.22 incelendiğinde, 3 [deg/s] ve 30 [deg/s] arasında neredeyse doğrusal bir ilişki olduğu için denklem 2.23’teki eşitlik oluşturulmuştur.



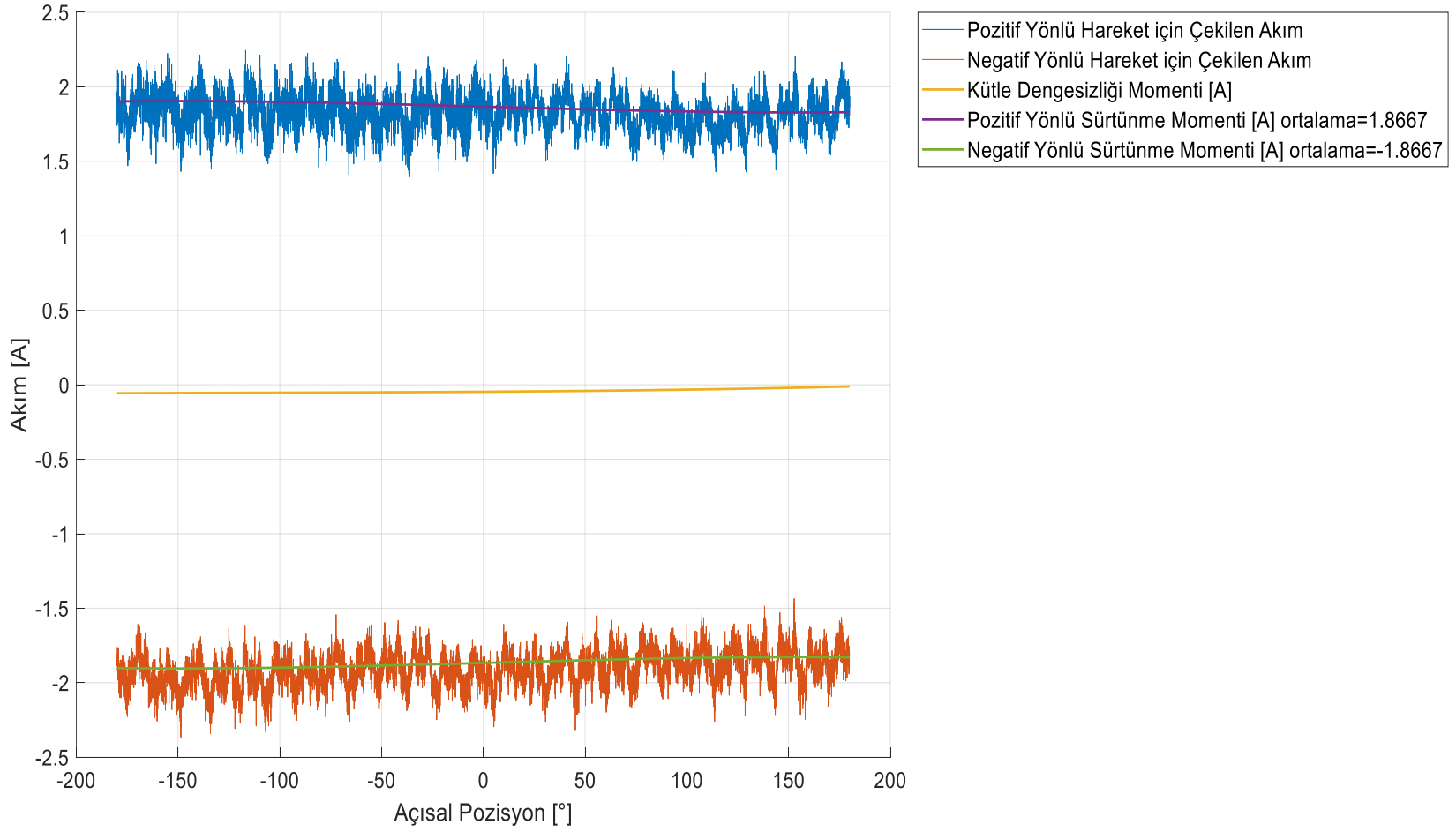
Şekil 2.20 : Yanca eksenı kütıe dengesizliği-açısal hız ilişkisi.

Kütıe dengesizliği momentinin açısal hız ile neredeyse doğrusal arttığını gözlemlenmiştir. Bu sebeple, 3 ve 30 [deg/s] arasında denklem 2.23 oluşturulmuştur.

$$\text{Kütıe dengesizliği} = (0.0214 + 0.00084 * |w|) * \text{sign}(w) \quad (2.23)$$



Şekil 2.21 : Yanca eksenli kütle dengesizliği modeli 3 [deg/s] sabit hız sonuçları.



Şekil 2.22 : Yanca eksenli kütle dengesizliği modeli 30 [deg/s] sabit hız sonuçlar.

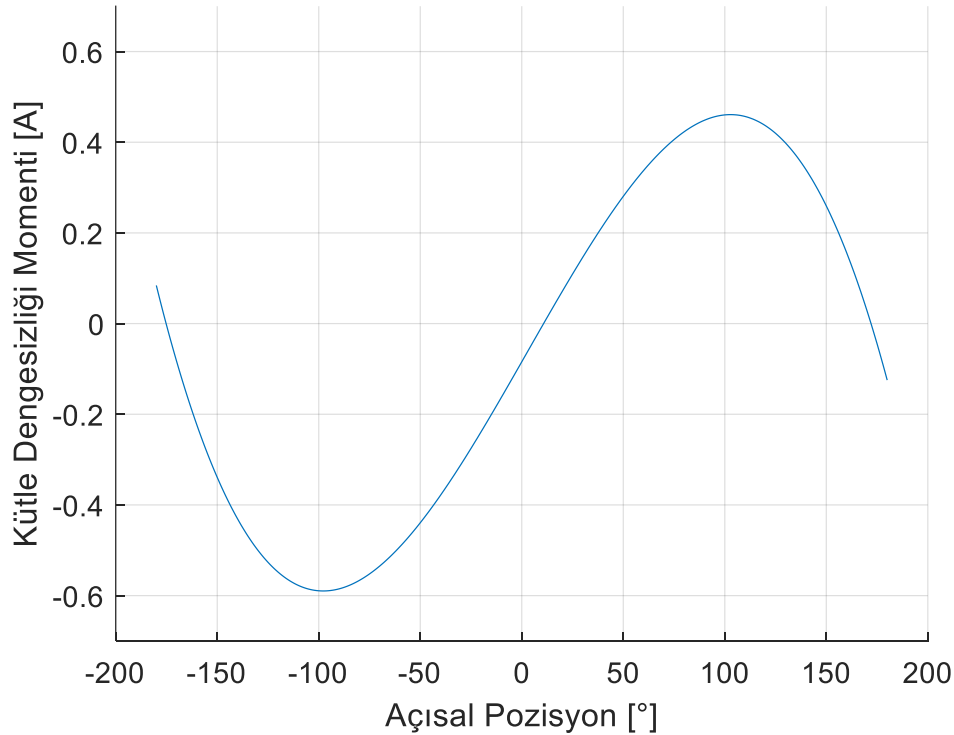
2.2.2.2 Yükseliş eksenini kütle dengesizliği tanımlanması

Yükseliş eksenine pozitif ve negatif yönlerde uygulanan 3, 6, 10 ve 30 [deg/s] sabit açısal hız komutları testleri sonrasında her hız değerinin dinamik kütle dengesizliği polinomları Çizelge 2.8'deki gibi hesaplanmıştır. Şekil 2.24'te 3 [deg/s] ve Şekil 2.25'te 30 [deg/s] sabit açısal hızda hareket için yapılan testlere ilişkin grafikler bulunmaktadır.

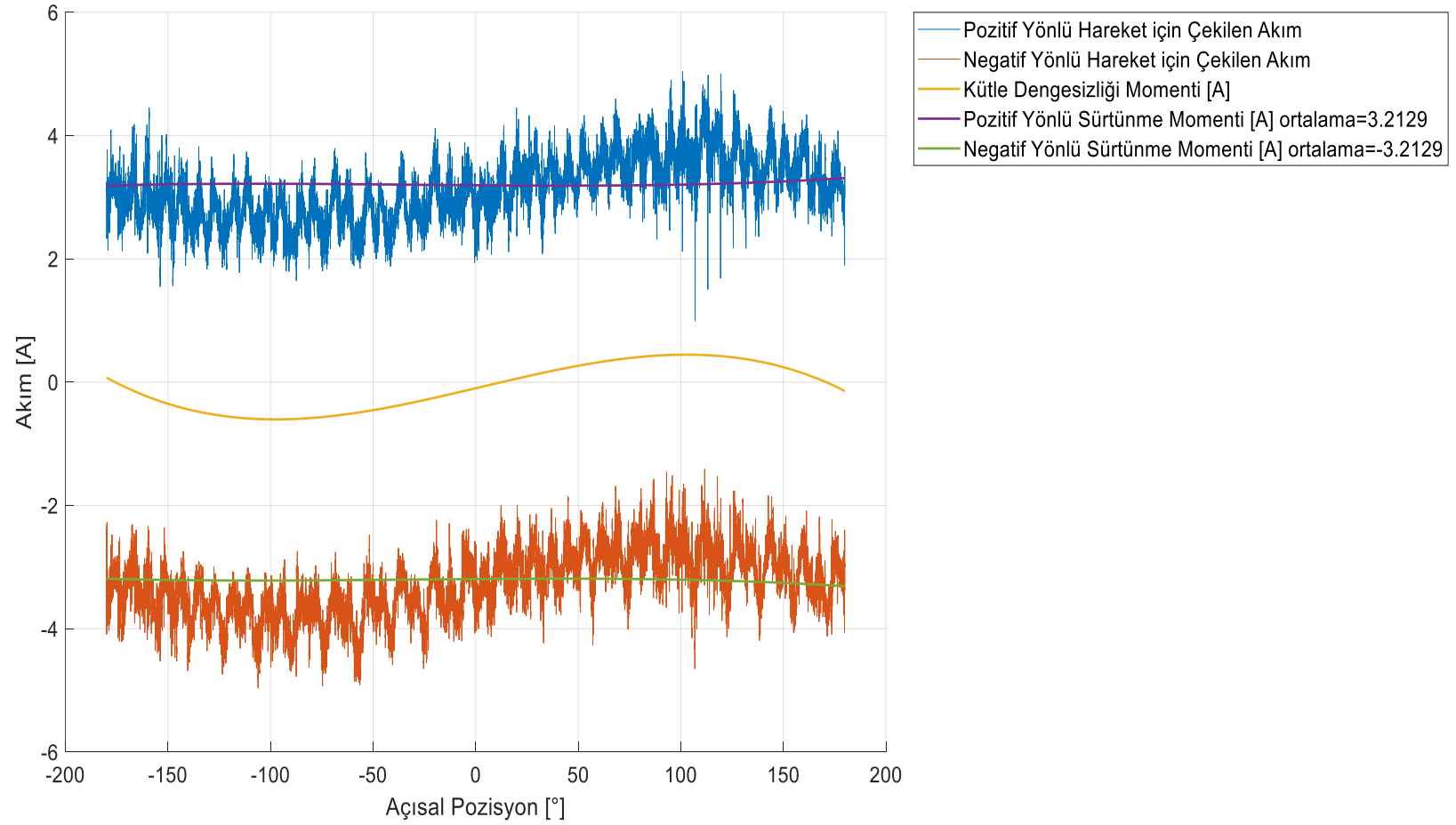
Çizelge 2.8 : Yükseliş eksenini farklı hızlar için kütle dengesizliği polinom katsayıları.

Açısal Hız [deg/s]	A	B	C	D
3	-2.6124e-07	2.0144e-06	0.0079	-0.0993
6	-2.5837e-07	2.1117e-06	0.0078	-0.0751
10	-2.6143e-07	2.0735e-06	0.0079	-0.0770
30	-2.5972e-07	1.7012e-06	0.0078	-0.0858

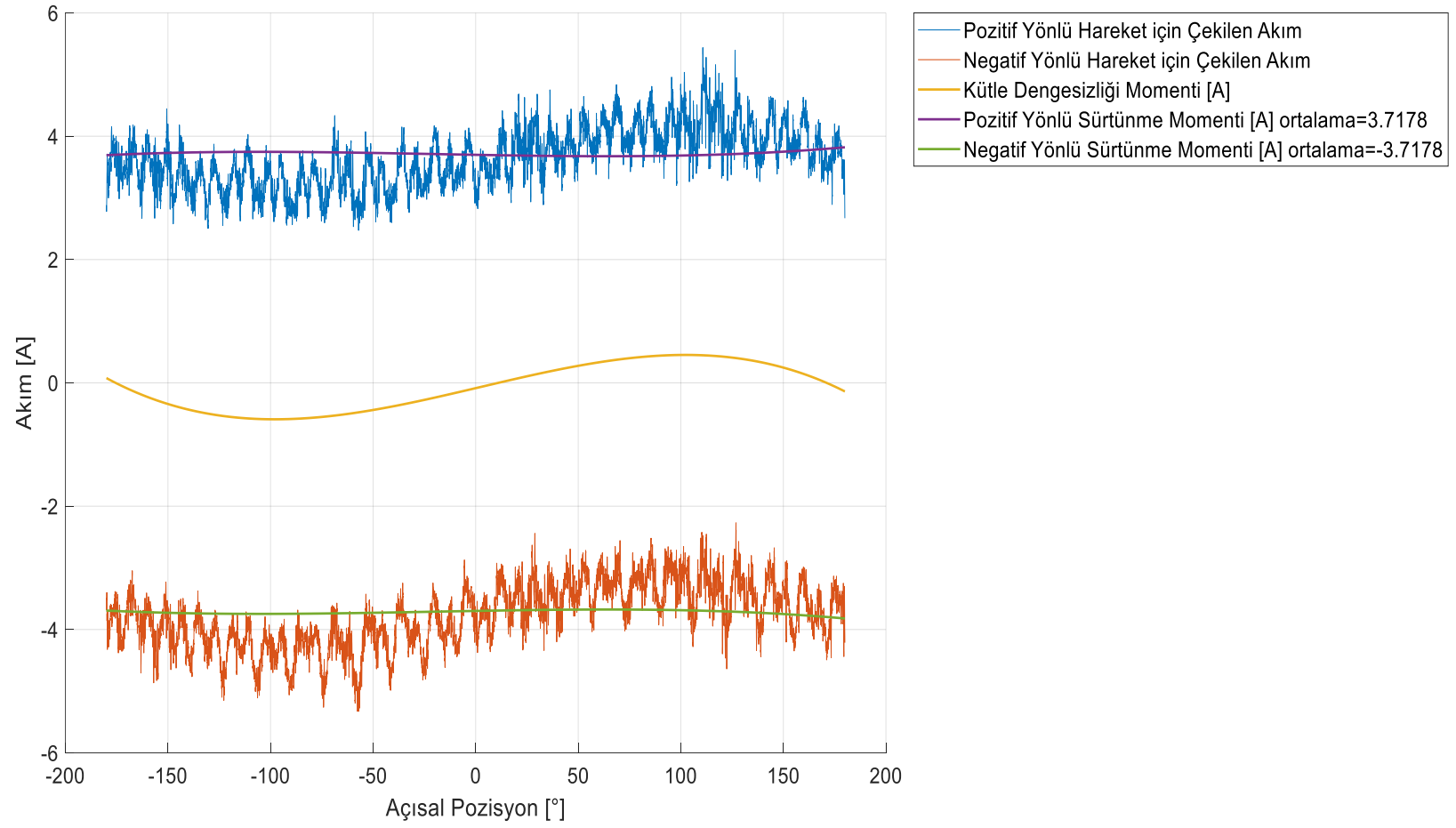
Çizelge 2.8 incelendiğinde, polinomu oluşturan tüm katsayıların ortalamaları alınmış ve bu sayede elde edilen katsayı değerleri ile Şekil 2.23'te gösterilen açısal pozisyona bağlı dinamik kütle dengesizliği modeli oluşturulmuştur.



Şekil 2.23 : Yükseliş eksenini dinamik kütle dengesizliği modeli çıktısı.



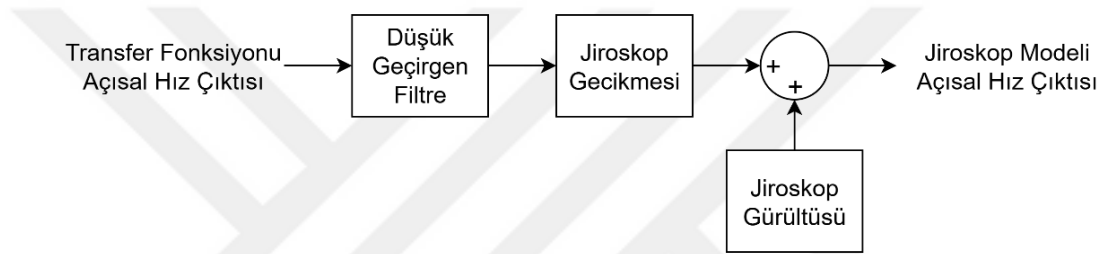
Şekil 2.24 : Yükseliş eksenli kütle dengesizliği modeli 3 [deg/s] sabit hız sonuçları.



Şekil 2.25 : Yükseliş eksenli kütle dengesizliği modeli 30 [deg/s] sabit hız sonuçları.

2.2.3 Jiroskop modeli

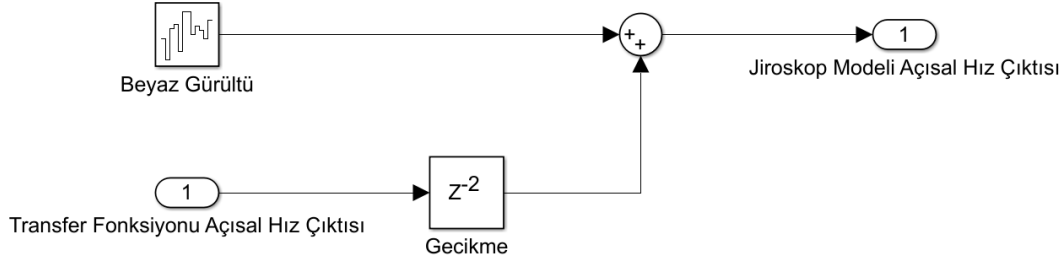
Gimbal sisteminde kullanılan jiroskop sensöründen gerçek zamanlı olarak açısal hız bilgisi alınmaktadır. Ancak bu sensörün doğası gereği; belirli bir bant genişliği ile ölçebileceği frekans aralığı sınırlandırılmıştır. Ayrıca jiroskoplar, yapılarında bulunan elektromekanik sistemler nedeniyle ölçüm gecikmesine ve beyaz gürültü gibi raslantısal sapmalara sahiptirler. Gerçek zamanlı uygulamalarda, sensörün ham verisi üzerine doğrudan yansıyan bu gecikme ve gürültü etkileri ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, jiroskobun gerçek zamanlı uygulamadaki dinamik davranışı başarılı bir şekilde modellenerek gerçeğe yakın bir ölçüm karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 2.26’da jiroskop modeline ait temsili bir görsel oluşturulmuştur.



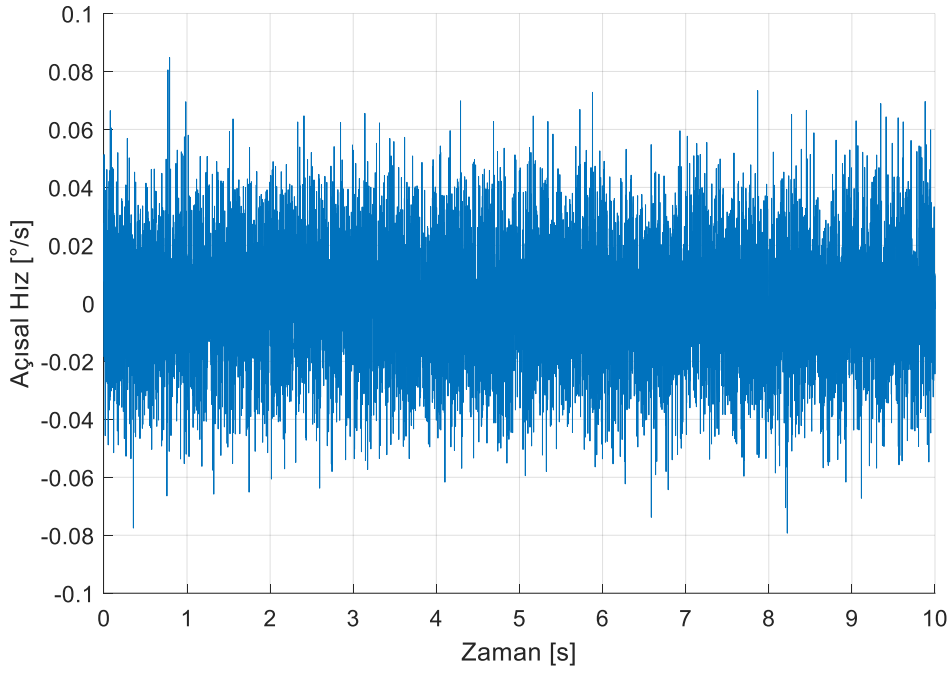
Şekil 2.26 : Temsili jiroskop modeli.

Kullanılan jiroskobun bant genişliği, gimbal sisteminin çalışma koşullarından yeteri kadar yüksek olduğu için düşük geçirgen filtre kullanılmasına gerek olmadığı değerlendirilmiştir. Jiroskobun gürültü karakteristiğinin belirlenebilmesi için, düz bir zeminde hareketsiz durumda iken belirli bir süre boyunca veri kaydı yapılmıştır. Elde edilen ölçümlerin standart sapması 0.0215 [deg/s] olarak hesaplanmış ve bu değer de beyaz gürültü tanılamasında kullanılmıştır. Sensör gecikmesi ise, tam olarak bilinemediği için gimbal dinamik modelinin modelleme başarısının artırılması amacıyla simülasyon modeli üzerinde yapılan denemeler sonucunda 2 [ms] olarak bulunmuştur. MATLAB/Simulink’te Şekil 2.27’deki görselde blok diyagramları verilen jiroskoba ait simülasyon modeli oluşturulmuştur.

Gimbal sistemi dinamik modelinin açısal hız çıktısı 0 [deg/s] olduğu koşul için jiroskoba ait Şekil 2.27’de oluşturulan simülasyon modeli çalıştırılmıştır. Elde edilen açısal hız-zaman grafiği Şekil 2.28’de bulunmaktadır. Gimbal sisteminin hem yanca hem de yükseliş eksenlerinde aynı jiroskop bulunduğu için oluşturulan jiroskop modeli, her iki eksenin de simülasyon modelinde kullanılmıştır.



Şekil 2.27 : MATLAB/Simulink'te tasarlanan Jiroskop Modeli.



Şekil 2.28 : Tasarlanan jiroskop modeli çıktı sinyali.

2.3 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modellerin Karşılaştırılması

Yanca ve yükseliş eksenleri için seçilen doğrusal dinamik modellerin atalet değerlerine sürtünme, kütle dengesizliği ve jiroskop modelleri eklenmiş ve her eksen için doğrusal olmayan dinamik modeller oluşturulmuştur. Doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modeller arasındaki performans farklı test koşullarında karşılaştırılmış ve nihai olarak yanca ve yükseliş eksenleri için dinamik modeller seçilmiştir.

Sistem tanılama aşamasında gerçek sisteme uygulanan uyarım sinyalleri her eksen için tasarlanan doğrusal ve doğrusal olmayan modellere simülasyon ortamında uygulanmıştır. Simülasyon ve gerçek sistem sonuçları karşılaştırılarak RMS doğruluğu değerleri hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik modellerin

performanslarının, doğrusal modellere göre çok daha yüksek başarıyla temsil edildiği görülmüştür. Bunun temel nedeni, doğrusal modellerde sürtünme gibi zamana, yöne, hıza ve pozisyona bağlı değişen dinamiklerin tam olarak modellenememesidir.

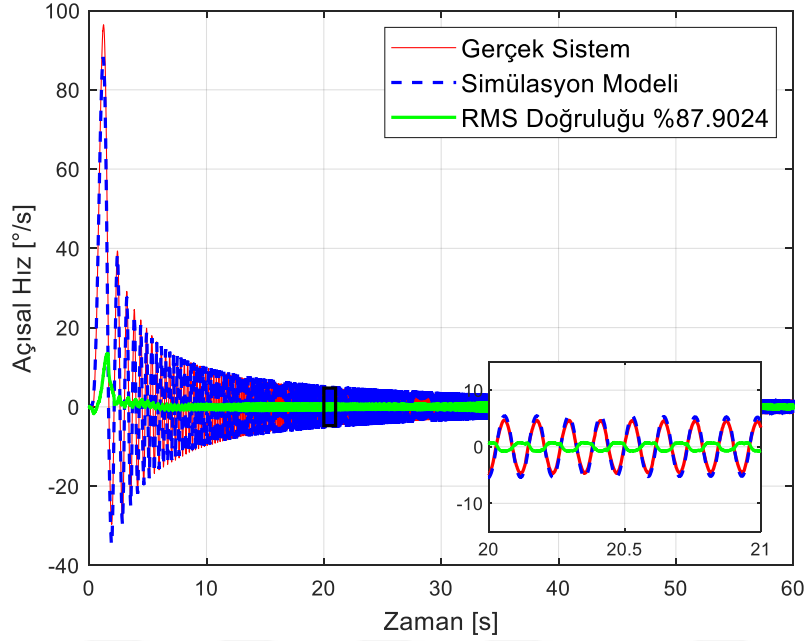
2.3.1 Yanca eksenini model seçimi

Yanca eksenini için doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modellerle gerçek sistem tepkisinin karşılaştırılması için Çizelge 2.9 oluşturulmuştur. Bu çizelge incelendiğinde yanca eksenini için doğrusal olmayan dinamik modelin nihai model olarak seçilmesine karar verilmiştir.

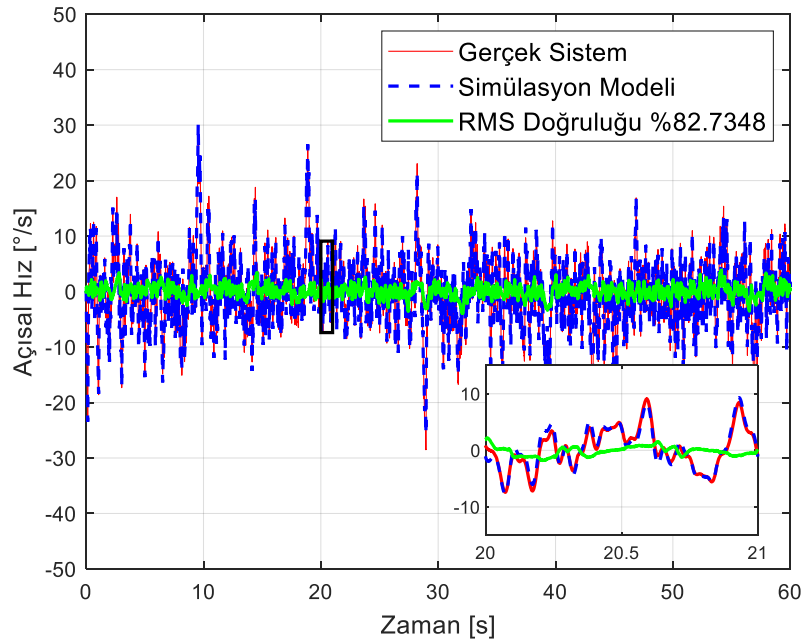
Çizelge 2.9 : Yanca eksenini doğrusal ve doğrusal olmayan model karşılaştırması.

Test No	Uyarma Sinyali	Akım Genlik [A]	Doğrusal Model RMS Doğruluğu [%]	Doğrusal Olmayan Model RMS Doğruluğu [%]
1	Süprüntü	2.4	47.6737	81.3951
2	Süprüntü	3	62.7203	85.8015
3	Süprüntü	3.6	68.7737	87.4116
4	Süprüntü	4.2	61.7974	87.2136
5	Süprüntü	4.8	56.4237	87.9024
6	PRBS	2.4	-143.6164	52.0798
7	PRBS	3	-82.317	68.4342
8	PRBS	3.6	-39.6112	76.524
9	PRBS	4.2	-4.7894	79.3316
10	PRBS	4.8	16.1216	82.7348
11	Frekans Tarama	2.4	46.3199	85.6004
12	Frekans Tarama	3	61.2113	87.4529
13	Frekans Tarama	3.6	78.5073	92.6
14	Frekans Tarama	4.2	85.3936	94.2643
15	Frekans Tarama	4.8	88.3749	95.0356

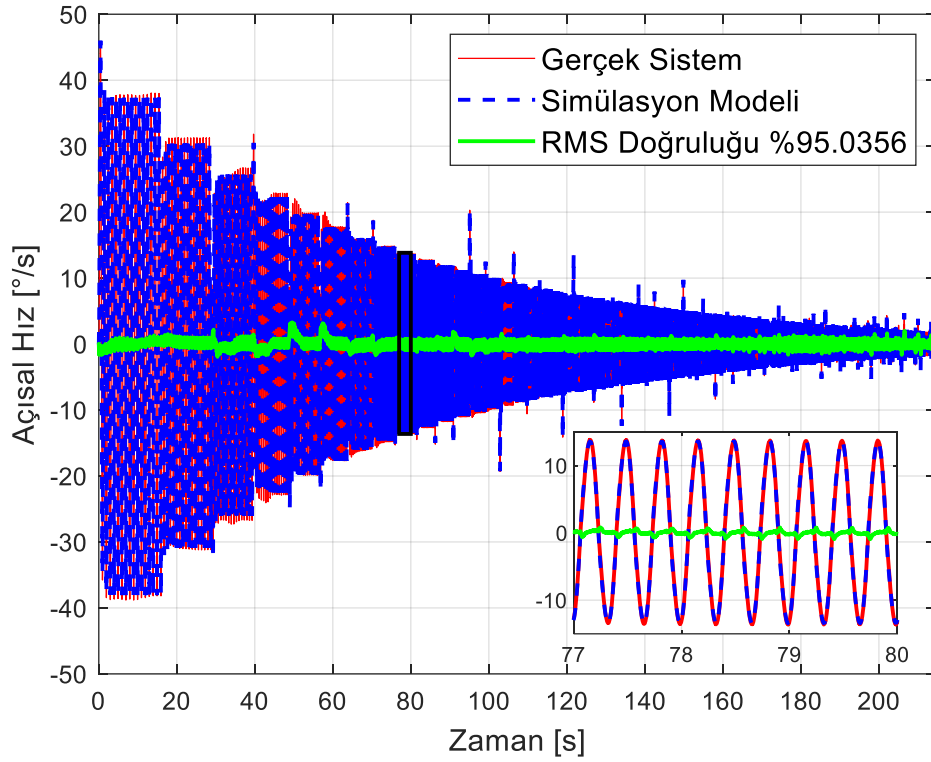
Şekil 2.29’da 4.8 [A] genlikli Süprüntü, Şekil 2.30’da 4.8 [A] genlikli PRBS ve Şekil 2.31’de 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyallerinin yanca eksenindeki doğrusal olmayan dinamik modele ve gerçek sisteme uygulanması sonucundaki açılal hız sinyallerinin grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 2.29 : Yanca eksenli 4.8 [A] genlikli Süprüntü sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.



Şekil 2.30 : Yanca eksenli 4.8 [A] genlikli PRBS sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.



Şekil 2.31 : Yanca eksen 4.8 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.

Çizelge 2.9 incelendiğinde, doğrusal modelin, gimbal sisteminin doğrusal olmayan dinamiklerini temsil etmede yeterli olmadığı görülmektedir. Buna karşın, doğrusal olmayan dinamik modelin sürtünme, kütle dengesizliği ve jiroskop sensör dinamikleri dikkate alınarak geliştirilmesi sebebiyle, farklı uyarma sinyalleri altında elde edilen sonuçlarda gerçek sistemle daha yüksek doğrulukta uyum sağladığı anlaşılmaktadır. Özellikle düşük hız bölgelerinde sürtünmenin belirginleşmesi ve orta-yüksek frekanslarda kütle dengesizliğinin etkili olması, doğrusal olmayan dinamik modelin başarısını arttıran temel unsurlardır. Ek olarak, doğrusal olmayan dinamik modelin başarısının kabul edilebilir ve yüksek olduğu görüldüğü de, gerçek sistem dinamiklerinin temsil edilemesi için yapısal esnekliklerin ve farklı çalışma koşullarında elde edilen verilerin de dikkate alınması gerektiği değerlendirilmiştir.

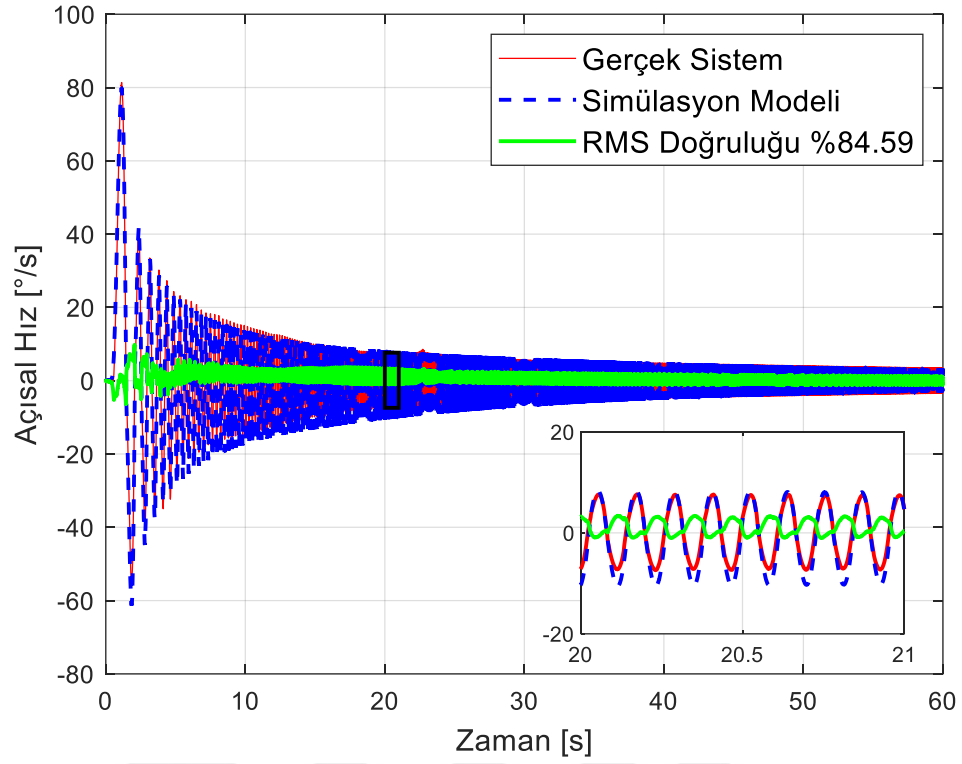
2.3.2 Yükseliş eksen model seçimi

Yükseliş eksen için doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modellerle gerçek sistem tepkisinin karşılaştırılması için Çizelge 2.10 oluşturulmuştur. Bu çizelge incelendiğinde yükseliş eksen için doğrusal olmayan dinamik modelin nihai model olarak seçilmesine karar verilmiştir.

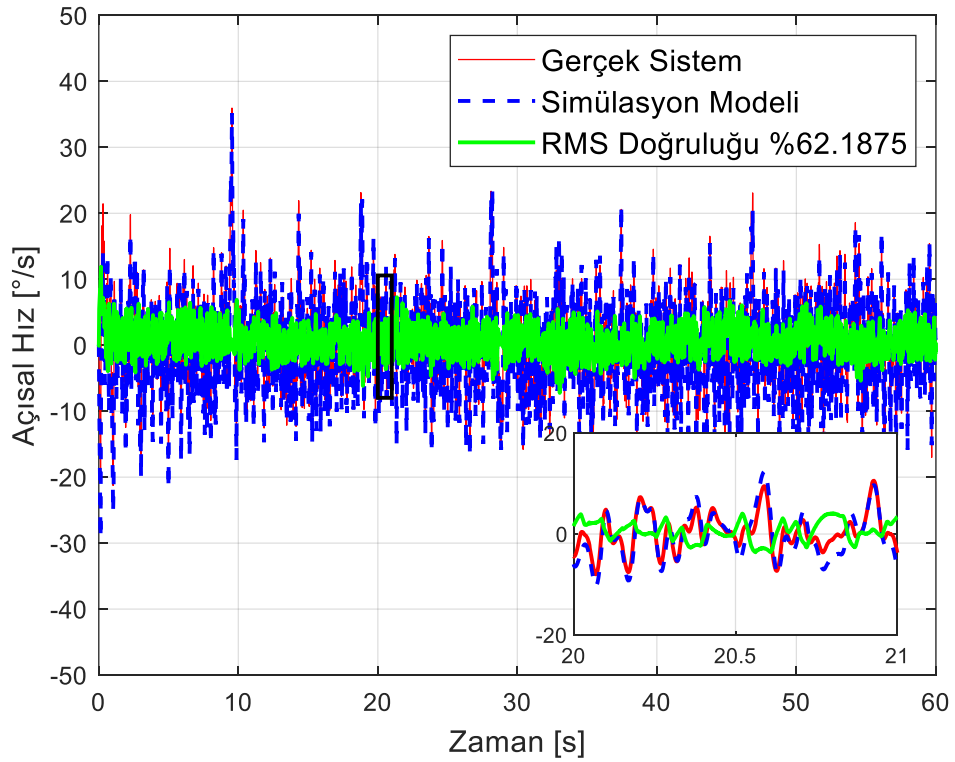
Çizelge 2.10 : Yükseliş eksenini doğrusal ve doğrusal olmayan model karşılaştırması.

Test No	Uyarma Sinyali	Akım Genlik [A]	Doğrusal Model RMS Doğruluğu [%]	Doğrusal Olmayan Model RMS Doğruluğu [%]
1	Süprüntü	4	-28.9984	52.4531
2	Süprüntü	4.5	27.1651	72.8787
3	Süprüntü	5	39.3366	69.5243
4	Süprüntü	5.5	54.8682	76.4559
5	Süprüntü	6	61.4628	84.5900
6	PRBS	4	-203.2148	-4.2568
7	PRBS	4.5	-130.4477	26.4875
8	PRBS	5	-89.1769	42.2669
9	PRBS	5.5	-56.7760	53.5018
10	PRBS	6	-32.5375	62.1875
11	Frekans Tarama	4	-35.3587	63.0958
12	Frekans Tarama	4.5	29.7123	78.4993
13	Frekans Tarama	5	52.4446	82.6725
14	Frekans Tarama	5.5	71.6104	87.5045
15	Frekans Tarama	6	79.8990	90.0253

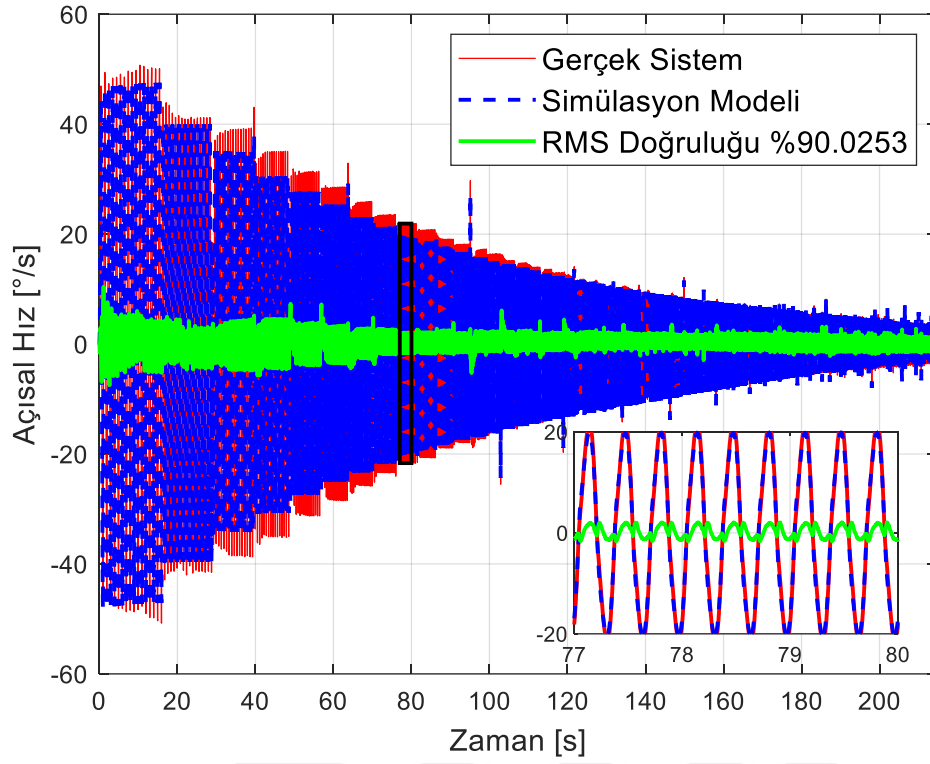
Şekil 2.32’de 6 [A] genlikli Süprüntü, Şekil 2.33’te 6 [A] genlikli PRBS ve Şekil 2.34’te 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyallerinin yükseliş eksenindeki doğrusal olmayan dinamik modele ve gerçek sistem uygulanması sonucundaki açısal hız sinyallerinin grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 2.32 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli Süprüntü sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.



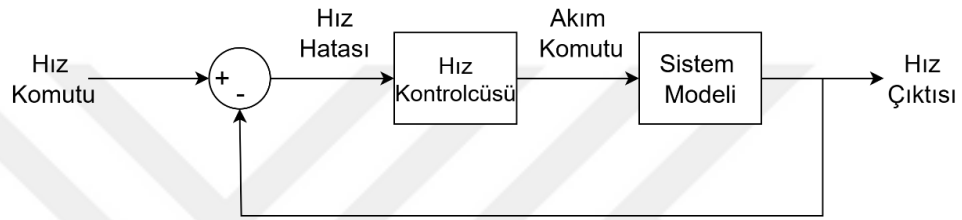
Şekil 2.33 : Yükseliş eksen 6 [A] genlikli PRBS sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.



Şekil 2.34 : Yükseliş eksenini 6 [A] genlikli Frekans Tarama sinyali doğrusal olmayan dinamik model ile gerçek sistem cevapları.

3. KONTROLCÜ TASARIMLARI

Gimbal sistemlerinin taşıdıkları faydalı yüklerin görevlerini yerine getirebilmeleri için, yönelim hassasiyetini sağlayacak şekilde yüksek performanslı hareket kontrol algoritmalarının tasarlanması gerekmektedir. Şekil 3.1’de gimbal sistemine eklenmiş geri beslemeli bir hız kontrolcüsünün blok diyagram gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.1 : Gimbal sistemi hız kontrolcüsü temsili.

Bu çalışma kapsamında, gimbal sistemin yanca ve yükseliş eksenlerine uygulanan açısal hızların denetimi amacıyla çeşitli kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Kontrolcülerin kazanç parametrelerinin en uygun biçimde belirlenebilmesi için genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Geri besleme sinyali olarak, jiroskoptan alınan açısal hız verileri kullanılmıştır. Geliştirilen farklı kontrol algoritmaları, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli üzerinde çeşitli açısal hız komutları uygulanarak test edilmiştir. Elde edilen sistem cevapları ile performans isterleri karşılaştırılmıştır. Bu performans isterleri ise Çizelge 3.1’de bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 : Gimbal sistemi performans isterleri.

Performans İsteri	Başarı Değeri
Oturma Zamanı [ms]	≤ 200
Maksimum Aşma [%]	≤ 10
Hedef Takip Performansı [%]	≥ 90
Bant genişliği [Hz]	≥ 8
Maksimum Akım [A]	≤ 8

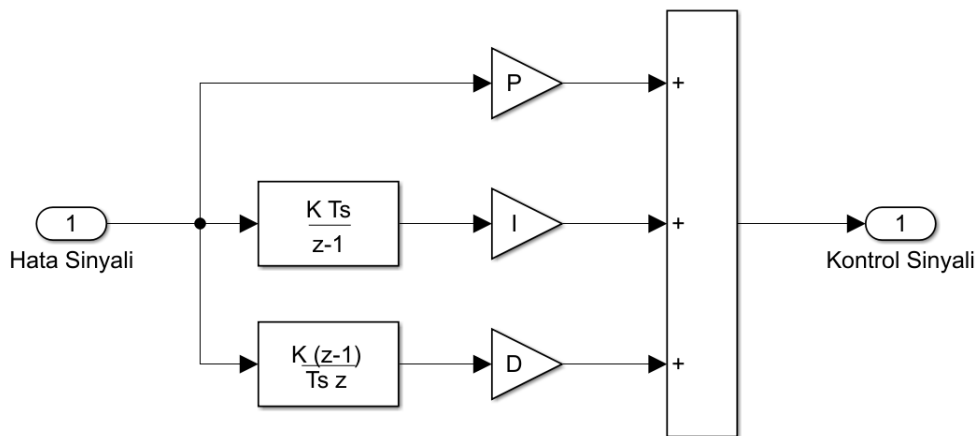
3.1 Kontrol Yöntemleri

3.1.1 Oransal-Integral (PI) kontrol yöntemi

PID kontrol yöntemi, kontrol teorisi uygulamalarında yaygın kullanılan ve pratikte birçok sistemde başarılı sonuçlar veren bir kontrol yöntemidir. Referans sinyal ile geri besleme sinyali arasındaki farkı hesaplayarak oluşturulan hata sinyali PID kontrol sisteminin giriş sinyalini oluşturmaktadır. Yapısında bulundurduğu oransal (P), integral (I) ve türev (D) işlemleri ile, hata sinyalini azaltmak üzere çalışan PID kontrol yöntemi, geçici rejim cevabını iyileştirmek ve kalıcı hata oluşumunu azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Oransal terim, hata sinyali ile doğru orantılı olacak şekilde sistemin hızlı tepki vermesini sağlamaktadır. İntegral terimi, oransal kazancın uygulanması sonrasında sistemde kalan kalıcı hal hatasını zamanla toplayarak ortadan kaldırmaya çalışmaktadır. Türev terimi ise, hata sinyalinin değişim hızına tepki göstermekte ve ani değişimlere karşı sisteme uygulanacak aşırı salınımları yumuşatarak azaltmaktadır.

$$G_C = K_P + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de, G_C ifadesi sistemin kontrol girişini temsil etmekte olup, klasik bir PID kontrolcü yapısını göstermektedir. Burada K_P oransal kazancı, K_I , integral kazancını ve K_D türevsel kazancı ifade etmektedir. $e(t)$ ise, referans sinyal ile sistem çıkışı arasındaki hata sinyalidir. MATLAB/Simulink ortamında PID kontrolcüsü Şekil 3.2’deki gibi modellenmektedir.

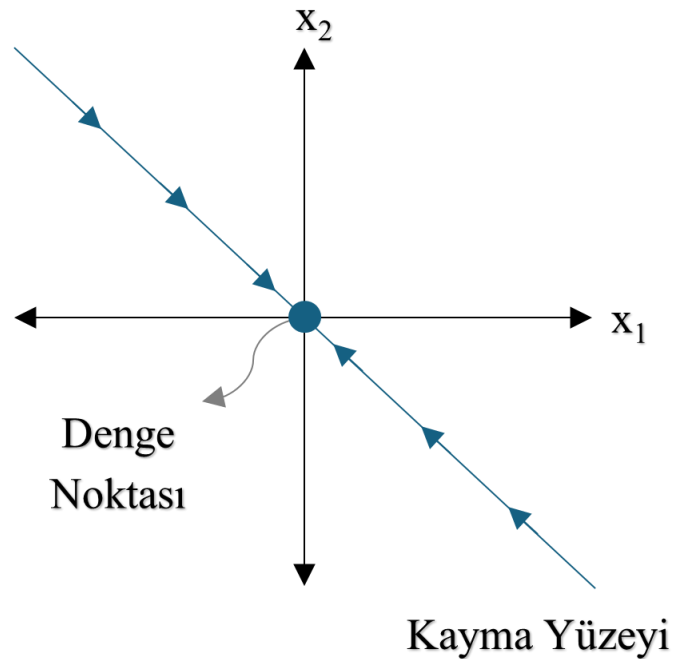


Şekil 3.2 : PID Kontrolcü Gösterimi.

Ancak, gerçek zamanlı uygulamalarda türev alma işleminin kullanılması sonucunda, yüksek frekanslı gürültülere karşı kontrol sisteminin hassasiyeti artmaktadır. Bu durum, sistemde istenmeyen gürültü ve kararsızlıklara neden olabilmektedir. Bu alışma kapsamında, türev teriminden oluşacak gürültünün önlenebilmesi için PID kontrolü yerine PI kontrolü kullanılmıştır.

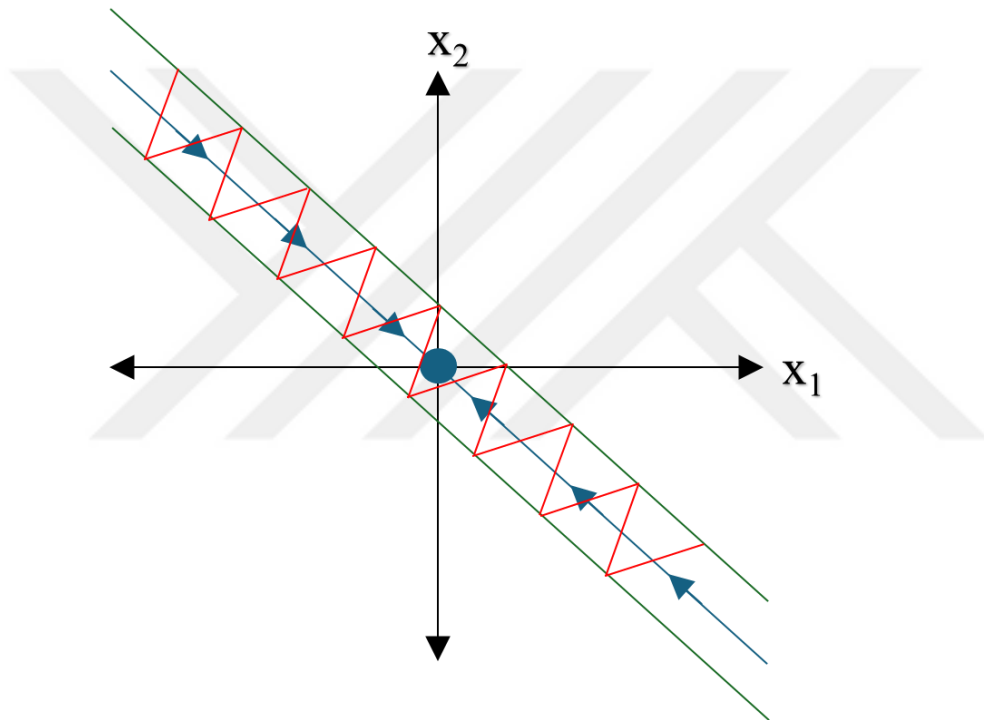
3.1.2 Super Twisting Kayan Kipli Kontrol (ST-KKK) yöntemi

Kayan Kipli Konrol (KKK) yöntemi, kontrol teorisi uygulamalarında belirsizlik içeren, doğrusal olmayan ve dış bozuculara maruz kalan sistemlerin denetimde yaygın olarak kullanılan gürbüz bir kontrol yöntemidir. Kayan Kipli Kontrol, referans sinyal ile geri besleme sinyali arasındaki hata bilgisini kullanarak, sistemi önceden tanımlanmış bir kayma yzerine yönlendirmekte ve sistemin bu yüzey üzerinde kalabilmesini hedeflemektedir. Bu kontrol yöntemi, model belirsizliklerine ve bozucu etkilere karşı direnç göstererek hızlı tepki süresi sunmaktadır. Kayma yüzeyine ulaşan kontrol sistemi, bu yüzey üzerinde kalacak şekilde tasarlandığı için kararlı ve güvenilir bir kontrol davranışı elde edilebilmektedir. Kayma yüzeyi oluşturulurken hata ve hatanın türevi değerlendirilerek sistemin dinamik davranışını yansıtan bir yüzey tanımlanır. Kayan Kipli kontrolü, şekil 3.3'te gösterildiği gibi kayma yüzeyini denge noktasına taşıyarak sistemin kararlı hle gelmesini sağlayan bir kontrol yöntemidir.



şekil 3.3 : Kayan Kipli Kontrol - Kayma Yüzeyi.

Ancak, Kayan Kipli Kontrol yönteminin kullanımında çatırdama olarak adlandırılan, yüksek frekanslı salınımlardan oluşan titreme davranışı kontrol edilmek istenen sistem üzerinde görülebilmektedir. Şekil 3.4'te çatırdamayı temsil eden bir görsel bulunmaktadır. Bu durum, fiziksel sistemdeki hareket kontrolünü sağlayan aktüatörlerin yorulmasına, enerji kayıplarına ve kontrol performansının düşmesine neden olabilmektedir. Kayan Kipli Kontrol yöntemleri incelendiğinde çatırdama probleminin önlenmesi ve hassas bir şekilde kontrol sisteminin tasarlanabilmesi için Super Twisting Kayan Kipli Kontrol (ST-KKK) yöntemi bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 3.4 : Kayan Kipli Kontrol – Çatırdama.

Literatür araştırmasında kayma yüzeyi olarak, sistemin referans değerine olan sapmasını temsil eden hata sinyali ile bu hata sinyalinin türevi durum değişkenleri olarak kullanılmıştır.

$$e = w_{referans} - w_{geri\ besleme} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de, $w_{referans}$ sisteme uygulanan referans açısal hızı, $w_{Geri\ Besleme}$ sensörler aracılığıyla ölçülen sistemin açısal hız çıktısını ve aralarındaki fark olan e hata sinyalini göstermektedir. Denklem 3.3’te, $\dot{e}$ hata sinyalinin türevini ve s kayma yüzeyini temsil etmektedir.

$$s = e + \dot{e} \quad (3.3)$$

Kontrol sistemi döngüsü, 1000 [Hz] örnekleme frekansında çalışmaktadır. Kontrol sinyali her 1 [ms] aralıklarla üretileceği için türev terimlerinin kullanımı durumunda küçük bir ölçüm gürültüsünün bile kontrol sinyalinde çatırdama oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, kayma yüzeyi tasarlanırken hata sinyalinin türevi kullanılmamış ve sadece hata sinyali kayma yüzeyi olarak kabul edilmiştir.

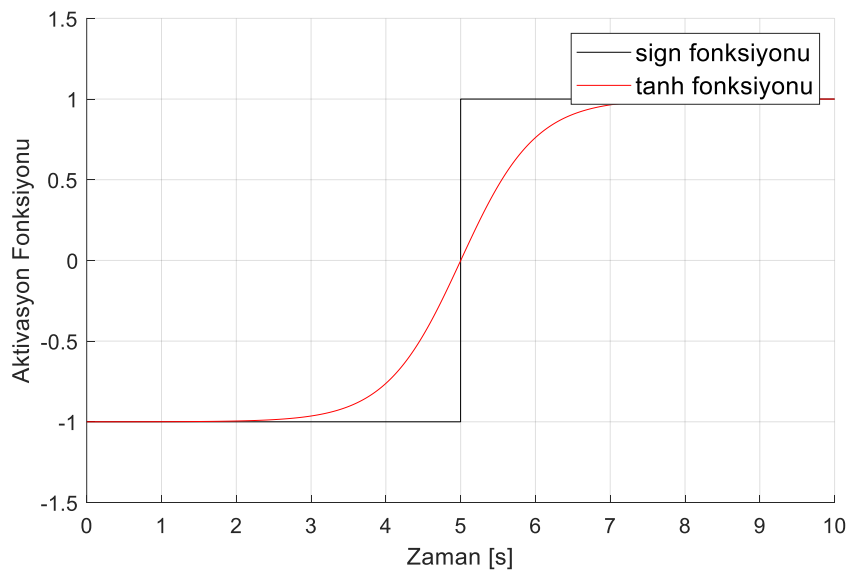
$$s = e \quad (3.4)$$

Super Twisting Kayan Kipli Kontrol algoritması matematik formülü denklem 3.5'te gösterilmektedir.

$$U_t = -K_1 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) - \int K_2 \text{sign}(s) dt \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te, U_t kontrol sinyalini, K_1 ve K_2 kontrol kazançlarını ve $\text{sign}(s)$ kullanılan aktivasyon fonksiyonunu temsil etmektedir.

Kontrol sinyalindeki çatırdamının azaltılması amacıyla, keskin geçişli aktivasyon fonksiyonu olan $\text{sign}(s)$ yerine $\tanh(s)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Bu sayede, keskin geçişler yumuşatılarak kontrol sinyalinde meydana gelebileceği değerlendirilen çatırdamanın önlenmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.5'te $\tanh(s)$ aktivasyon fonksiyonu ile keskin geçişlerin yumuşatıldığı görülmektedir.



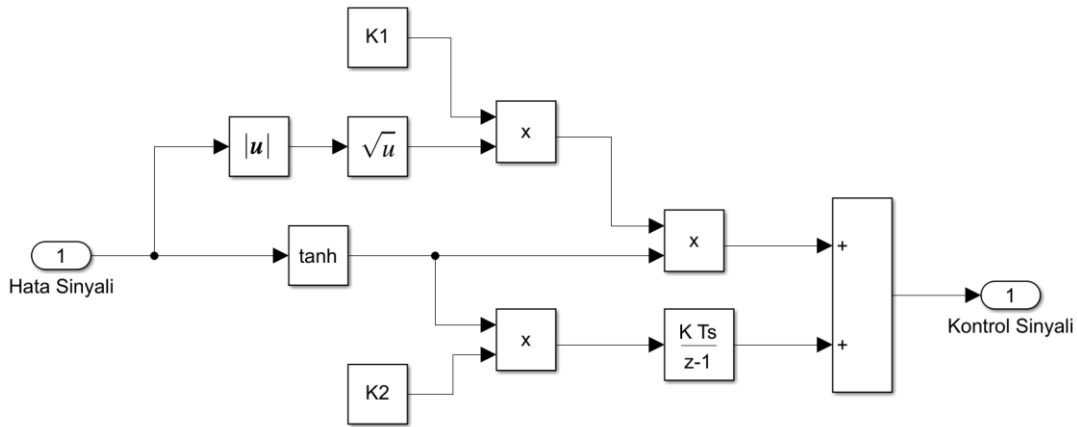
Şekil 3.5 : Aktivasyon fonksiyonu karşılaştırması.

$$\tanh(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}} \quad (3.6)$$

$$U_t = -K_1 \sqrt{|s|} \tanh(s) - \int K_2 \tanh(s) dt \quad (3.7)$$

Denklem 3.6’da kullanılan $\tanh(s)$ fonksiyonunun matematiksel ifadesi tanımlanmaktadır. Denklem 3.7’de $\text{sign}(s)$ yerine $\tanh(s)$ yazılmış kontrol denklemi bulunmaktadır.

Super Twisting Kayan Kipli Kontrolcü MATLAB/Simulink’te Şekil 3.6’daki gibi modellenmiştir.

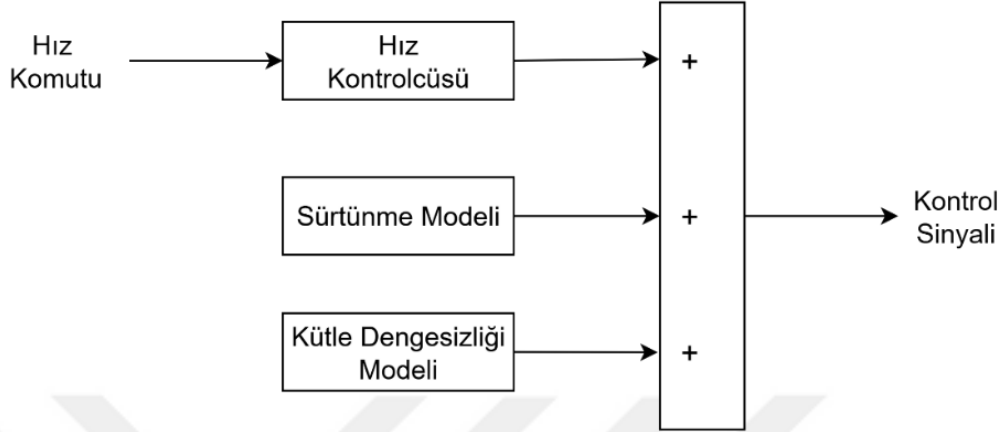


Şekil 3.6 : Super Twisting Kayan Kipli Kontrol gösterimi.

3.1.3 İleri besleme yönteminin kontrol yapısına entegrasyonu

İleri besleme yöntemi, kontrol edilmek istenen sistemin tahmin edilebilir bozucu etkilerinin önceden giderilmesi amacıyla kullanılan bir kontrol yaklaşımıdır. Gimbal sistemleri gibi hassas hareket kontrolü gerektiren uygulamalarda, sistemin dinamik yapısında yer alan sürtünme ve kütle dengesizliği kaynaklı bozucu etkiler hedef takibi performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu tür bozucu etkiler, geri besleme kontrolüyle bastırılmaya çalışıldığında, kontrolcü geç tepki verebilmekte ve sistem kararsızlığa yaklaşarak aşırı akım üretebilmektedir. Bu çalışmada, gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerine ait sürtünme ve kütle dengesizliği modelleri kullanılarak ileri besleme kontrol yöntemi PI ve ST-KKK yapılarına entegre edilmiştir. Şekil 3.7’de, sistemin kontrolü amacıyla hız kontrolcüsüne ek olarak, ileri besleme kontrol yapısı ile birlikte sürtünme ve kütle dengesizliği modelleri entegre edilmiştir. Sürtünme ve kütle dengesizliği modelleri sayesinde, gimbal sisteminde ayrıca

modellenen doğrusal olmayan etkiler önceden tahmin edilerek kontrol sinyaline gerekli telafi bileşenleri eklenmiştir. Sıfır hız geçişlerindeki düşük hız bölgelerinde ortaya çıkan ölü bölge davranışları engellenmiştir.



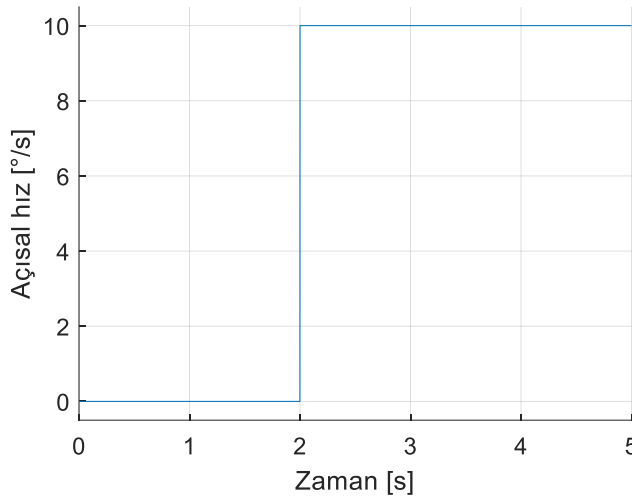
Şekil 3.7 : İleri besleme entegrasyonu.

3.2 Genetik Algoritma ile Kontrol Kazançlarının Optimizasyonu

Genetik algoritmalar, doğada meydana gelen doğal seçim ve evrimsel biyolojik mekanizmalardan ilham alınarak geliştirilen bir optimizasyon ailesine verilen isimdir. Karmaşık ve analitik çözümü zor olan çok parametrelili problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır. Evrimsel süreçteki mutasyon, doğal seçim ve çaprazlama gibi mekanizmalar genetik algoritmaların temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Optimize edilecek her bir parametre birer gen olarak tanımlanır. Bu genleri üzerinde taşıyan ve problemin çözümünü temsil eden yapı ise kromozum olarak adlandırılır. Belirli sayıda kromozumun bir araya gelmesiyle oluşan çözüm adayları topluluğu popülasyon olarak tanımlanır ve genetik algoritma, arama ve optimizasyon işlemleri bu popülasyon üzerinde gerçekleştirilir. Başlangıçta rastgele oluşturulan popülasyondaki her bir kromozomun problemin çözümüne katkısı önceden tanımlanmış bir amaç fonksiyonu aracılığıyla sayısal olarak değerlendirilir. Elitizm, en uygun çözüme sahip bireylerin doğrudan bir sonraki nesle aktarılmasını sağlayarak iyi çözümlerin korunmasını amaçlar. Doğal seçim aşamasında, popülasyondaki bireyler arasından yeni popülasyonun oluşturulmasında ebeveyn olarak kullanılacak kromozomlar seçilir. Seçilen bu iki ebeveynin genetik bilgileri, çaprazlama işlemi ile birleştirilerek yeni kromozomlar oluşturulur. Ardından, mutasyon işlemi uygulanarak yeni bireylerde küçük rastgele değişikliklerin oluşması sonucunda genetik çeşitlilik

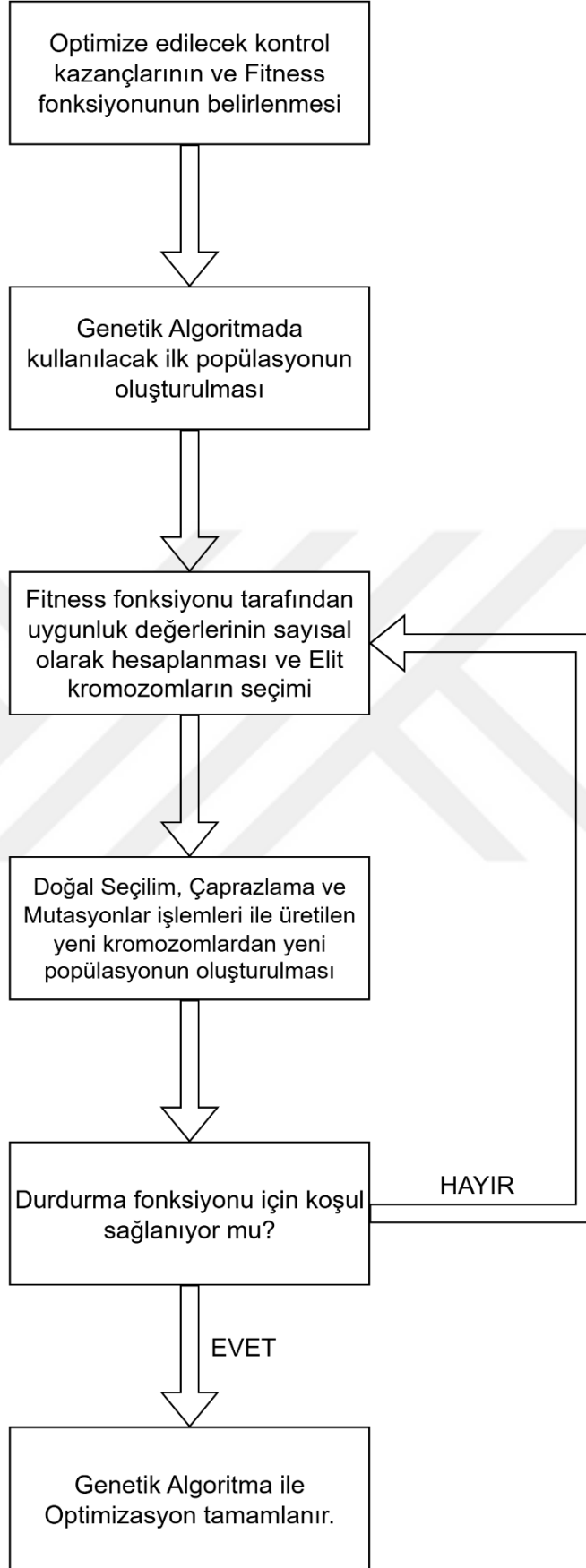
sağlanır. Genetik algoritma süreci, durdurma koşulu sağlanana kadar yinelemeli olarak devam eder. Her popülasyon değişimi ve yeni bireylerin oluşturulması süreci bir jenerasyon olarak adlandırılır.

Kontrol algoritmalarının kazançlarının belirlenmesinde farklı ayarlama yöntemleri kullanılabilmektedir. Ancak bu yöntemler, çoğu zaman doğrusal sistem varsayımlarına dayandığı için karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde istenen performansı sağlamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, kontrol kazançlarının optimizasyon tabanlı yöntemlerle belirlenmesi, modern kontrol sistemlerinde tercih edilen bir yaklaşım haline gelmiştir. Bu çalışmada, gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenleri için tasarlanan PI, PI+İleri besleme, ST-KKK ve ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin kazançları genetik algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Gimbal sisteminin her eksenine, Şekil 3.8’de gösterilen 10 [deg/s] adım girişi uygulanarak farklı amaç fonksiyonları (IAE, ISE, ITAE, ITSE) için kontrol kazançları hesaplanmıştır.



Şekil 3.8 : Kontrol kazançları için giriş sinyali.

Her bir genetik algoritma iterasyon döngüsü 30 jenerasyondan ve 50 popülasyondan meydana gelmektedir. Her jenerasyon sonunda, en yüksek doğruluğa sahip bir elit birey doğrudan bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Yeni kromozomların oluşturulmasında, %60 oranında çaprazlama ve %40 oranında mutasyon uygulanmıştır. Ebeveyn seçiminde ise bireylerin uygunluğu rulet seçim yöntemi ile seçilmiştir. Bu yapı sayesinde hem yüksek kaliteli çözümler korunmuş hem de genetik çeşitlilik sağlanarak yerel minimumlara takılma riski azaltılmıştır. Genetik algoritmanın akış şeması Şekil 3.9’da bulunmaktadır.



Şekil 3.9 : Genetik Algoritma akış şeması.

3.2.1 Amaç fonksiyonları

Genetik algoritma ile kontrol kazançlarının optimizasyonunda aşağıdaki amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Her bir amaç fonksiyonu, kontrol sisteminin performansını sayısal olarak değerlendirmek amacıyla tasarlanmış ve sıfıra yaklaştıkça sistem performansının iyileştiğini ifade etmektedir. Kontrol sistemindeki hata sinyalleri kullanılarak aşağıdaki amaç fonksiyonları oluşturulmuştur:

IAE (Integral Absolute Error): (Denklem 3.8) Ani hata değişimlerine karşı duyarlı değildir, genel hata büyüklüğünü ön plana çıkartır.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.8)$$

ISE (Integral Square Error): (Denklem 3.9) Büyük hataların daha ağır şekilde cezalandırılmasını sağlar.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3.9)$$

ITAE (Integral Time Absolute Error): (Denklem 3.10) Geç dengeye gelen sistemleri cezalandırır.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (3.10)$$

ITSE (Integral Time Square Error): (Denklem 3.11) Zaman ve hata büyüklüğümü dikkate alarak geçici rejim cevabı performansını değerlendirir.

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (3.11)$$

3.2.2 Yanca eksenini için kontrol kazançlarının bulunması

Yanca eksenini için MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli kullanılarak, farklı amaç fonksiyonlarına göre Genetik Algoritma tabanlı bir program yazılarak her kontrol her kontrol yöntemi için optimize edilmiş kazançlar

hesaplanmıştır. Kontrol algoritmaları için optimize edilmiş kazançlar PI ve PI+İleri besleme için Çizelge 3.2’de ve ST-KKK ve ST-KKK+İleri besleme için Çizelge 3.3’te sunulmaktadır.

Gerçek sistem üzerinde yapılan deneysel gözlemler sonucunda, PI kontrolcünün oransal kazancının (K_P) 3.25’in üzerine çıktığında, yüksek frekanslı titremeler meydana gelmiştir. Sistemin stabilitesini korumak ve titreşimleri önlemek amacıyla K_P değeri 3.25 ile sınırlandırılarak Genetik Algoritma ile optimizasyon yapılmıştır.

Çizelge 3.2 : Yanca eksenli PI ve PI+İleri besleme kontrolcü kazançları.

Amaç Fonksiyonu	PI Kontrol			PI+İleri besleme Kontrol		
	K_P	K_I	Fitness Değeri	K_P	K_I	Fitness Değeri
IAE	3.0180	11.4176	0.2410	3.0021	1.6798	0.2420
ISE	3.2497	11.7310	1.0685	3.2498	1.9175	1.0698
ITAE	2.8423	11.2343	0.5310	2.8247	1.5156	0.5317
ITSE	3.2497	11.7522	2.1453	3.2498	1.9121	2.1478

Çizelge 3.3 : Yanca eksenli ST-KKK ve ST-KKK +İleri besleme kontrolcü kazançları.

Amaç Fonksiyonu	ST-KKK Kontrol			ST-KKK+İleri besleme Kontrol		
	K_1	K_2	Fitness Değeri	K_1	K_2	Fitness Değeri
IAE	5.1232	54.3303	0.2375	4.7435	0.0463	0.2383
ISE	5.3318	58.0042	1.0687	4.8893	0.0002	1.0697
ITAE	5.0650	54.0238	0.5221	4.6854	0.0149	0.5202
ITSE	7.0536	59.1501	2.1457	4.8561	0.0020	2.1477

3.2.3 Yükseliş eksenli için kontrol kazançlarının bulunması

Yükseliş eksenli için MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli kullanılarak, farklı amaç fonksiyonlarına göre Genetik Algoritma tabanlı bir program yazılarak her kontrol her kontrol yöntemi için optimize edilmiş kazançlar hesaplanmıştır. Kontrol algoritmaları için optimize edilmiş kazançlar PI ve PI+İleri besleme için Çizelge 3.4’te ve ST-KKK ve ST-KKK+İleri besleme için Çizelge 3.5’te sunulmaktadır.

Gerçek sistem üzerinde yapılan deneysel gözlemler sonucunda, PI kontrolcünün oransal kazancının (K_P) 3.25’in altına indiğinde ve 3.75’in çıktığında, yüksek frekanslı

titremeler meydana gelmiştir. Titreşimlerin önlenmesi amacıyla K_p kazancı sınırlandırılarak genetik algoritma ile optimizasyon yapılmıştır.

Çizelge 3.4 : Yükseliş eksenini PI ve PI+İleri besleme kontrolcü kazançları.

Amaç Fonksiyonu	PI Kontrol			PI+İleri besleme Kontrol		
	K_p	K_i	Fitness Değeri	K_p	K_i	Fitness Değeri
IAE	3.2510	28.0122	0.2203	3.2500	1.8869	0.2206
ISE	3.7489	28.6627	0.8773	3.7500	2.3276	0.8747
ITAE	3.2500	28.0087	0.4921	3.2536	1.9137	0.4919
ITSE	3.5953	28.5450	1.7609	3.7498	2.3326	1.7555

Çizelge 3.5 : Yükseliş eksenini ST-KKK ve ST-KKK +İleri besleme kontrolcü kazançları.

Amaç Fonksiyonu	ST-KKK Kontrol			ST-KKK+İleri besleme Kontrol		
	K_1	K_2	Fitness Değeri	K_1	K_2	Fitness Değeri
IAE	3.9446	142.5717	0.2192	3.3040	0.0117	0.2111
ISE	4.1624	137.2613	0.8778	3.5970	1.8103	0.8762
ITAE	5.0505	132.5542	0.4835	6.7653	59.5443	0.5164
ITSE	4.2231	140.3904	1.7619	3.5439	0.0051	1.7567

3.3 Kontrolcü Performanslarının Karşılaştırılması

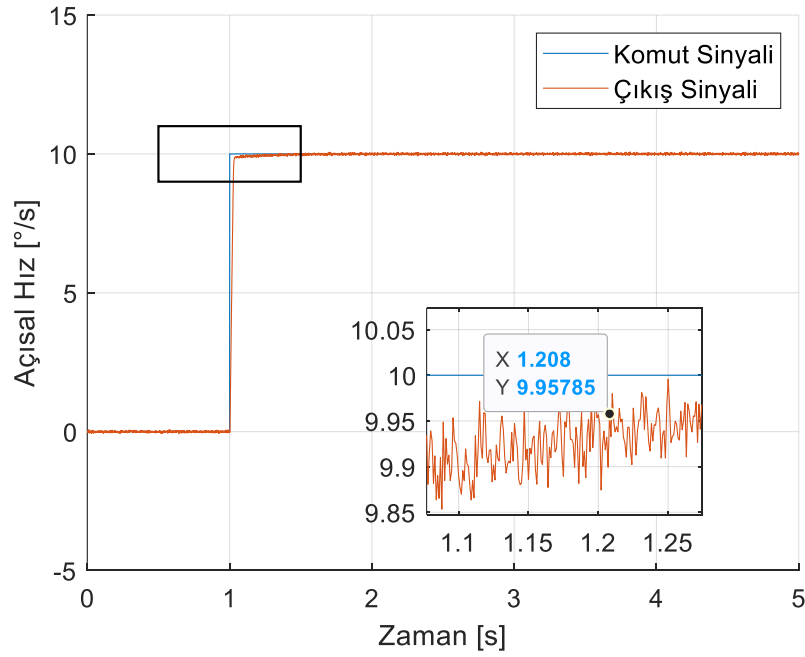
Genetik algoritmalar ile optimize edilen kazançlara sahip kontrol algoritmaları, gimbal sistemi için belirlenen performans istekleri doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Her eksen için, kontrol algoritması çıkışındaki kontrol sinyali 8 [A] ile sınırlandırılmıştır. Komut sinyali olarak Genetik Algoritma ile kontrol kazançlarının ayarlanması sırasında kullanılan 10 [deg/s] açısal hız adım girişi kullanılarak kontrol kazançlarının tasarım noktası için maksimum aşma ve oturma zamanları ölçülmüştür. Ek olarak, gimbal sisteminin hedef takibi performansı, farklı frekans ve genliklerdeki sinüs dalgası komutları kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm test senaryoları, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hedef takip performansının hesaplanması için denklem 3.12’de verilen formül kullanılmıştır. Bu denklemdeki, $w_{Giriş}$ kontrol sistemine uygulanan açısal hız komutunu ve $w_{Çıkış}$ gimbal sistemi modelinden elde edilen açısal hız çıktısını temsil etmektedir.

$$RMS Doğruluğu [\%] = \frac{rms(w_{Giriş} - w_{Çıkış})}{rms(w_{Giriş})} \times 100 \quad (3.12)$$

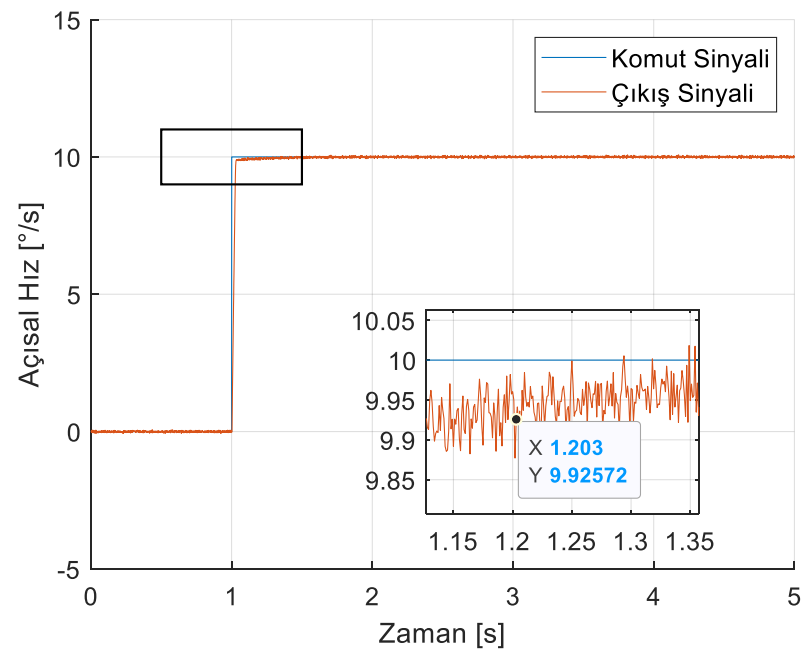
3.3.1 Yanca eksen kontrolcü performansları

3.3.1.1 PI kontrolcü seçimi

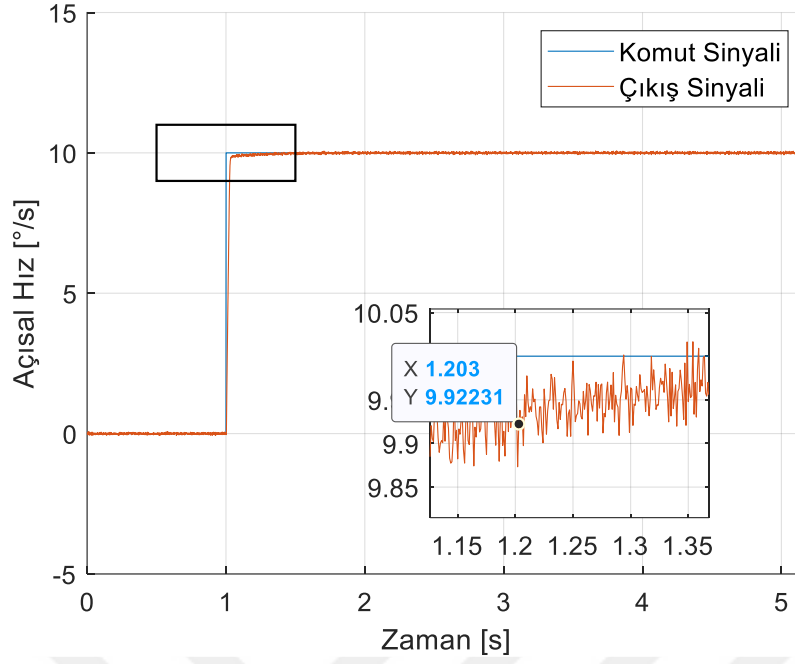
Şekil 3.10'da IAE, Şekil 3.11'de ISE, Şekil 3.12'de ITAE ve Şekil 3.13'te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkileri görselleri ve sayısal karşılıkları Çizelge 3.6'da bulunmaktadır.



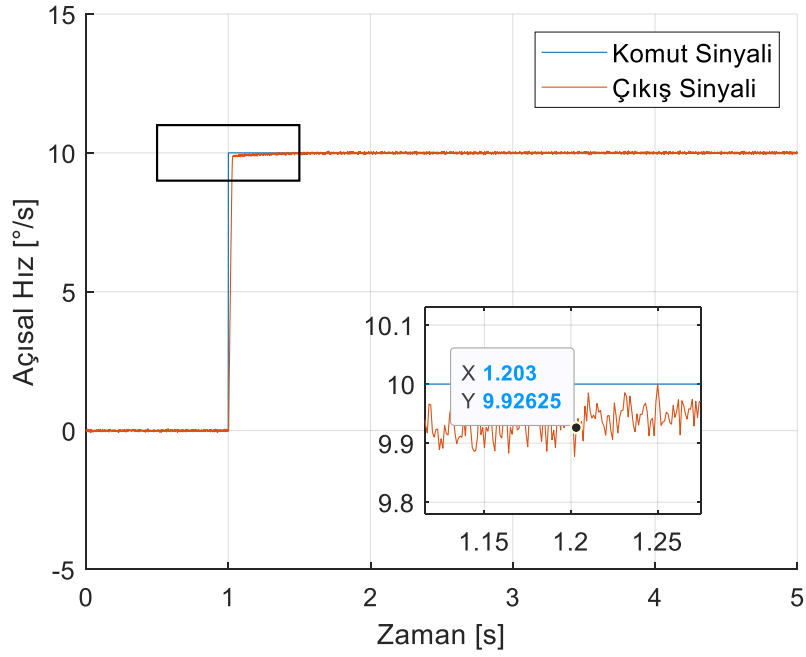
Şekil 3.10 : Yanca eksen IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.11 : Yanca eksen ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.12 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.

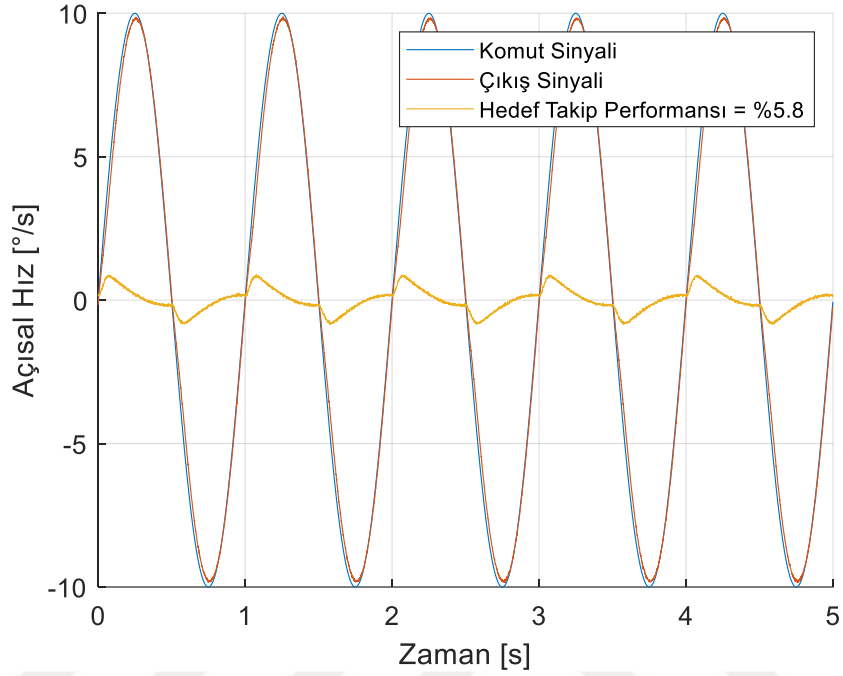


Şekil 3.13 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.

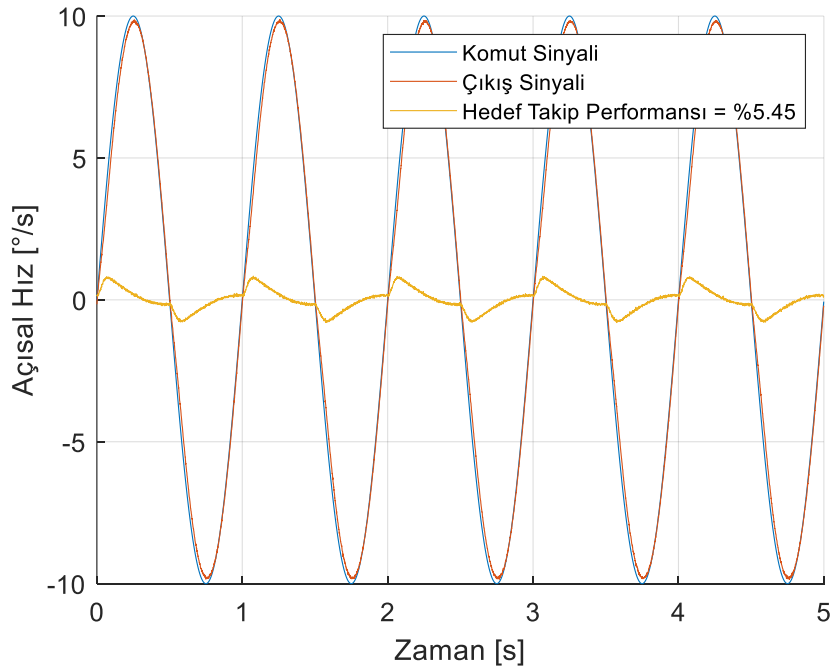
Çizelge 3.6 : Yanca eksenli PI kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	208	203	203	203
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	0

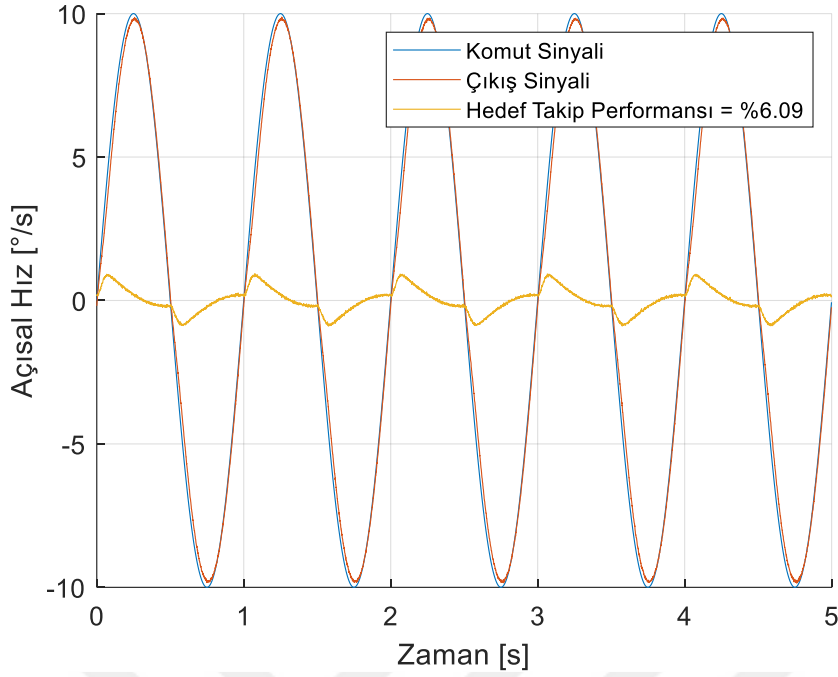
Şekil 3.14'te IAE, Şekil 3.15'te ISE, Şekil 3.16'da ITAE ve Şekil 3.17'de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



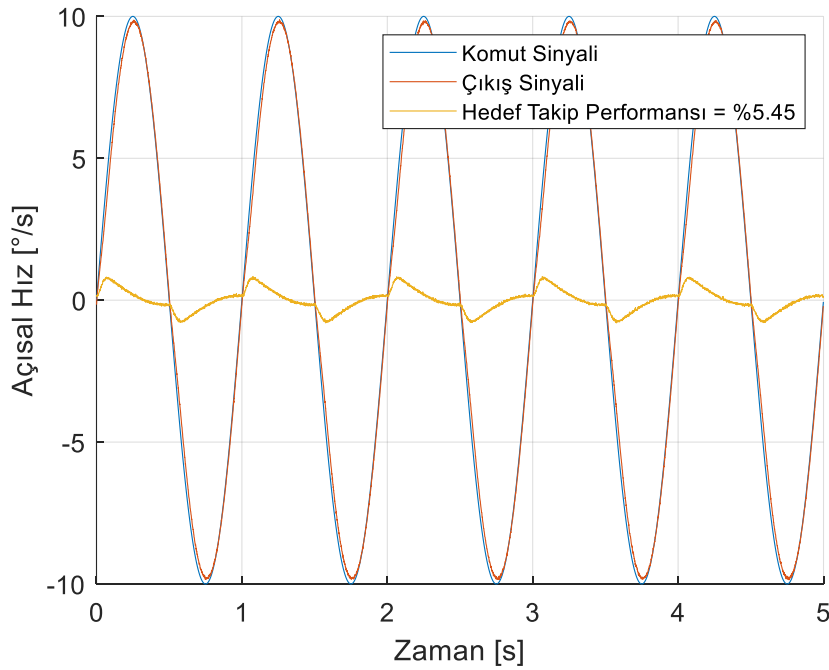
Şekil 3.14 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.15 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.16 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.17 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

PI kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.7’de sunulmuştur.

Çizelge 3.7 : Yanca eksenli PI kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 9.71	% 9.13	% 10.19	% 9.12
2	20	1	% 4.16	% 3.91	% 4.37	% 3.91
3	30	1	% 3.76	% 3.53	% 3.95	% 3.53
4	10	1	% 5.80	% 5.45	% 6.09	% 5.45
5	10	0.1	% 1.60	% 1.53	% 1.65	% 1.53
6	10	0.5	% 4.31	% 4.09	% 4.48	% 4.09
7	10	2	% 8.19	% 7.64	% 8.66	% 7.64
8	10	5	% 17.66	% 16.46	% 18.69	% 16.46

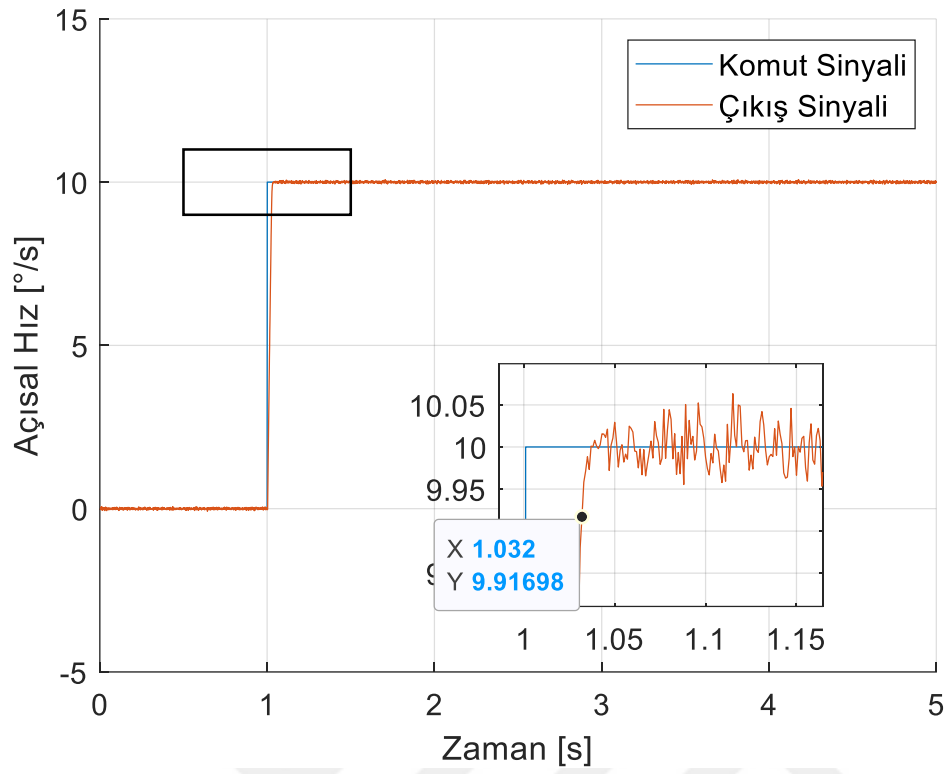
Çizelge 3.6 incelendiğinde, adım giriş sinyaline karşı elde edilen yerleşme zamanı sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu ve maksimum aşmanın gerçekleşmediği görülmüştür. Bu durum, sistemin giriş değişimlerine karşı dengeli bir geçiş cevabı sergilediğini ve aşırı osilasyon eğilimi göstermediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.7 incelendiğinde ise, ISE ve ITSE amaç fonksiyonlarıyla optimize edilen kazançlara sahip PI kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ISE ve ITSE için neredeyse aynı performans sonuçları elde edildiği görülmüştür. Bu iki amaç fonksiyonu için de elde edilen kazançların birbirine çok yakın olması göz önünde bulundurularak, ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_P = 3,2497$; $K_I = 11,7310$)

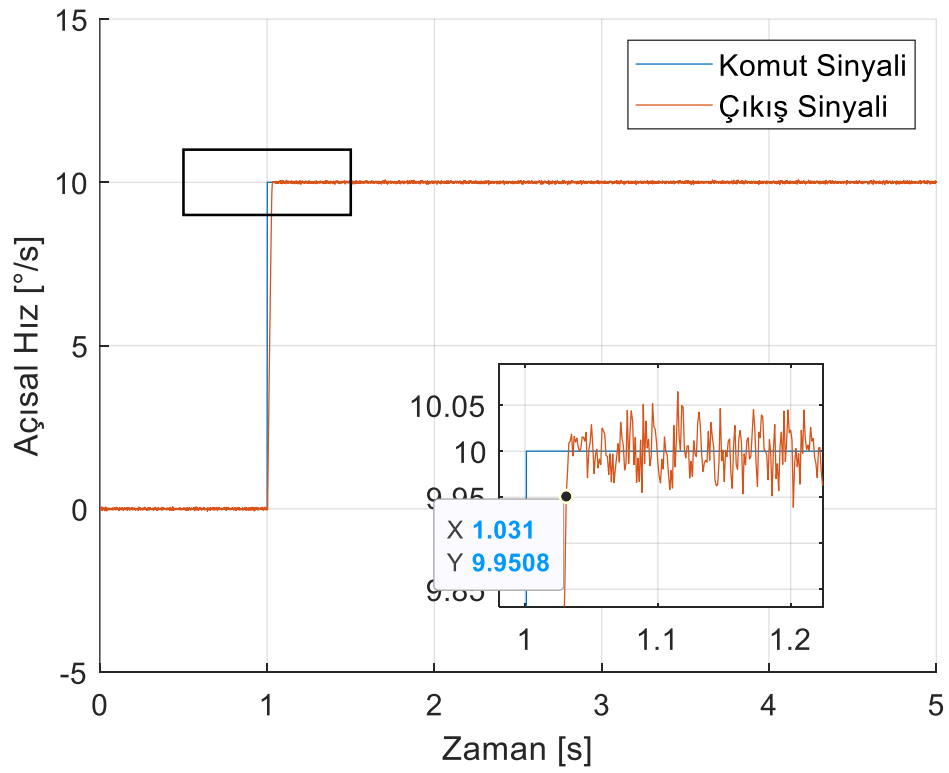
3.3.1.2 PI+İleri besleme kontrolcü seçimi

Şekil 3.18’de IAE, Şekil 3.19’da ISE, Şekil 3.20’de ITAE ve Şekil 3.21’de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkileri görselleri ve sayısal karşılıkları Çizelge 3.8’de bulunmaktadır.

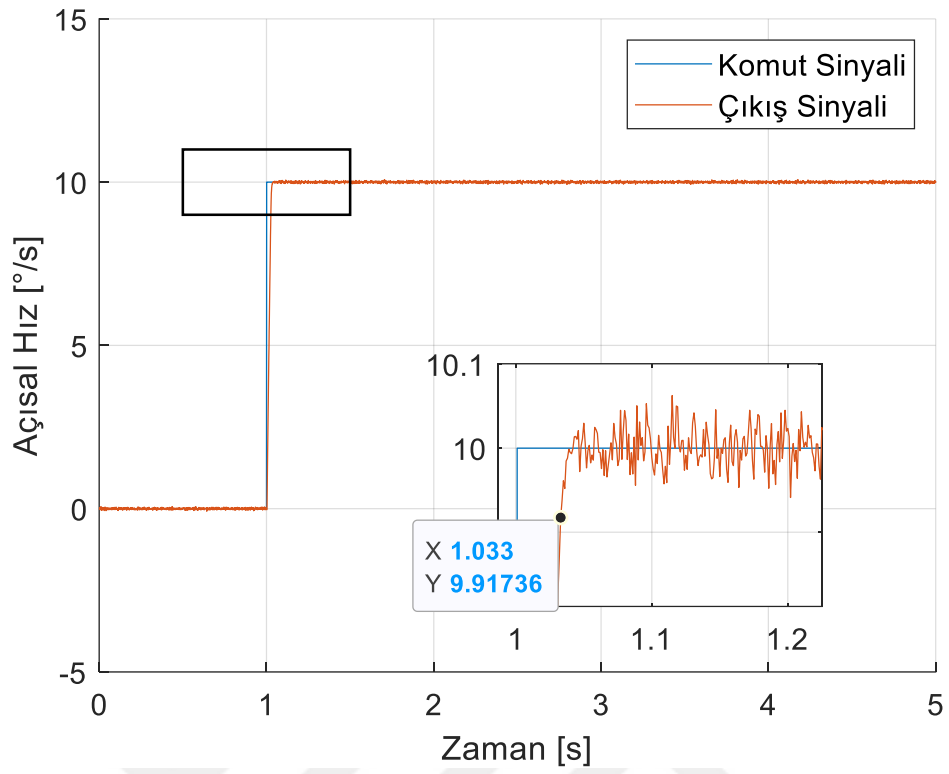
Çizelge 3.8 incelendiğinde, amaç fonksiyonlarına göre seçilen PI+İleri besleme kontrolcülerin adım giriş sinyaline verdikleri tepki sonucunda yerleşme zamanı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve maksimum aşmanın oluşmadığı görülmüştür. PI+İleri besleme kontrol algoritmasına karşı gimbal sistemi kararlı bir geçici hal cevabı sunduğu ve kalıcı hal hatasına da çok kısa sürede yerleştiği görülmüştür.



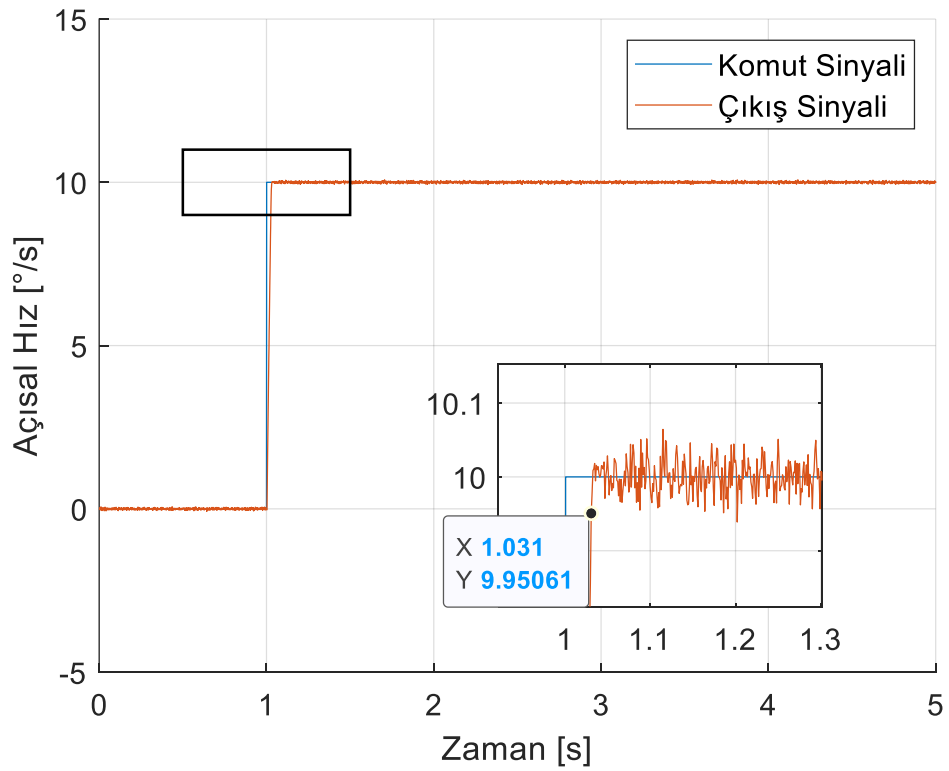
Şekil 3.18 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.19 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.20 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



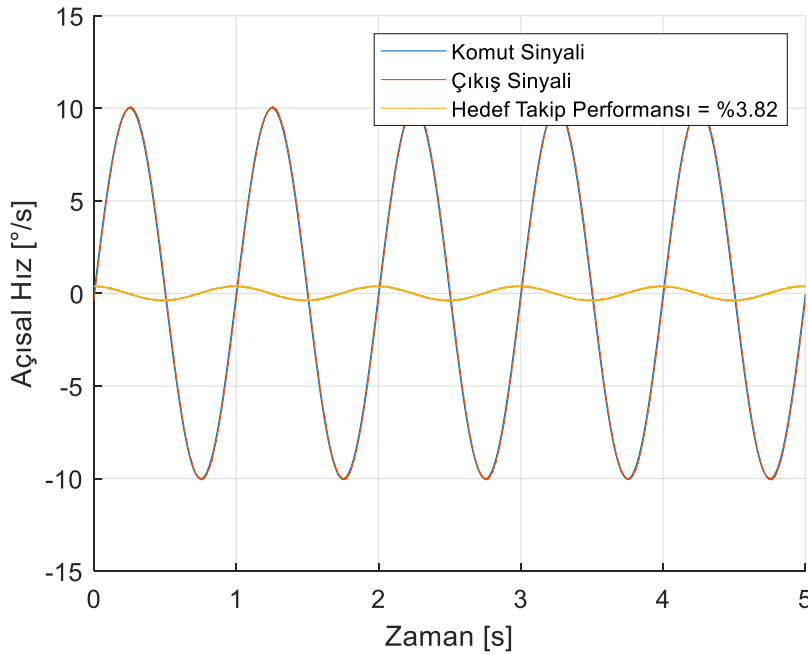
Şekil 3.21 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

Çizelge 3.8 : Yanca eksenli PI+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

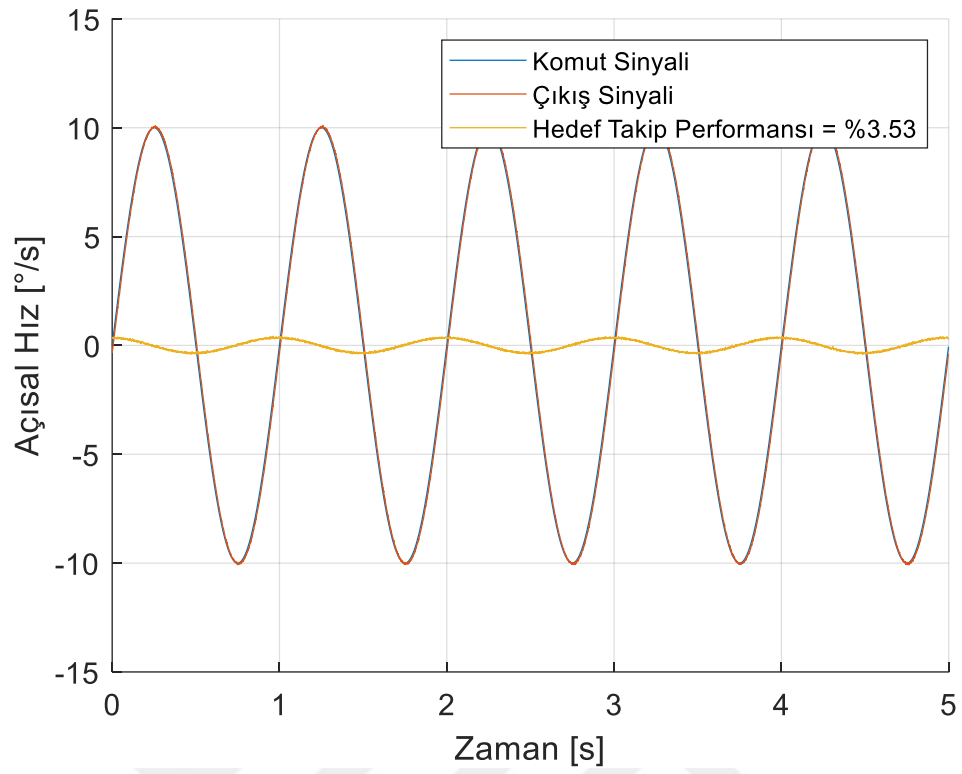
	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	32	31	33	31
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	0

Şekil 3.22’de IAE, Şekil 3.23’te ISE, Şekil 3.24’te ITAE ve Şekil 3.25’te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır. PI+İleri besleme kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

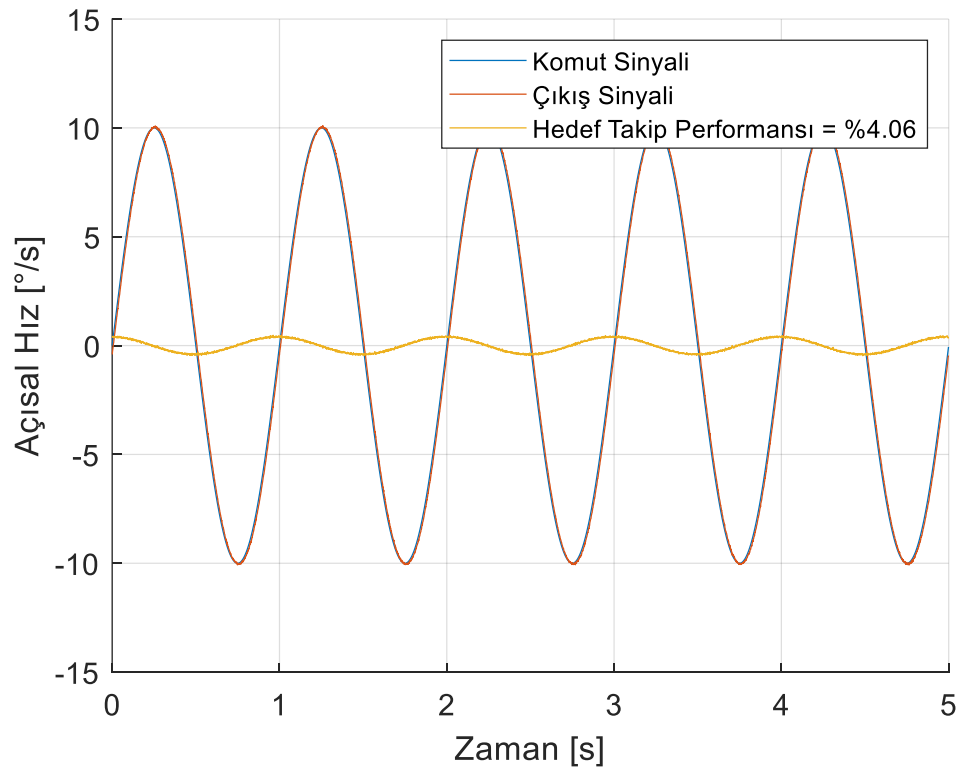
Çizelge 3.9 incelendiğinde ISE ve ITSE amaç fonksiyonlarıyla optimize edilen kazançlara sahip PI+İleri Besleme kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu iki amaç fonksiyonu ile elde edilen kazançlar neredeyse aynı değerlere ve performans sonuçlarına sahip olduğu için sadeleştirme amacıyla ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_P = 3,2498$; $K_I = 1,9175$)



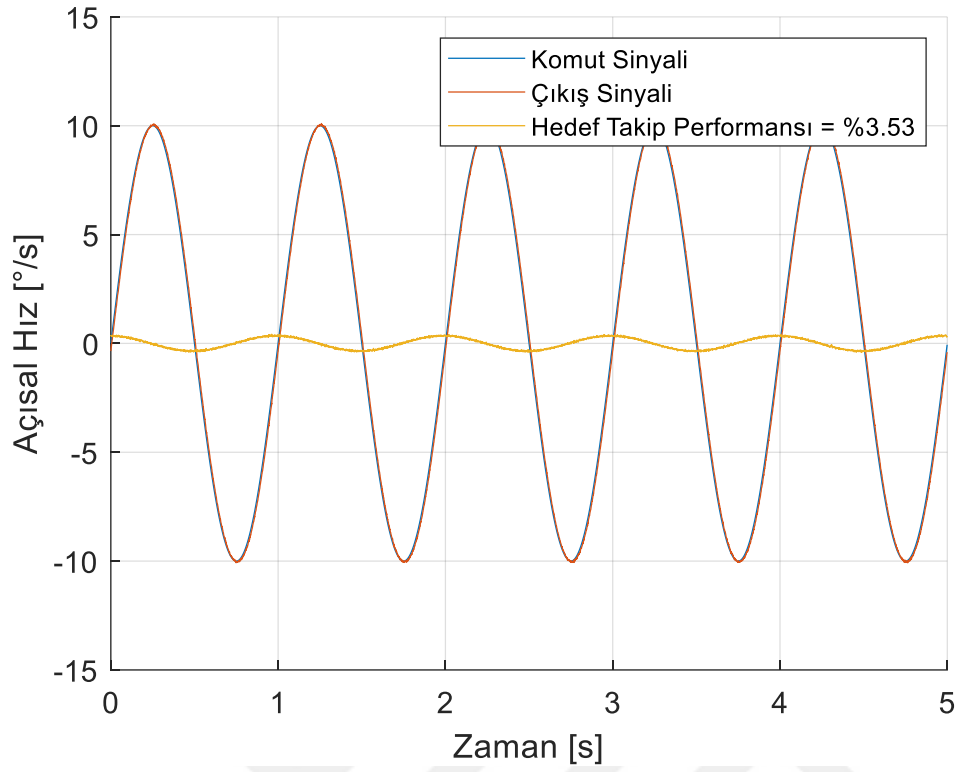
Şekil 3.22 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.23 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.24 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



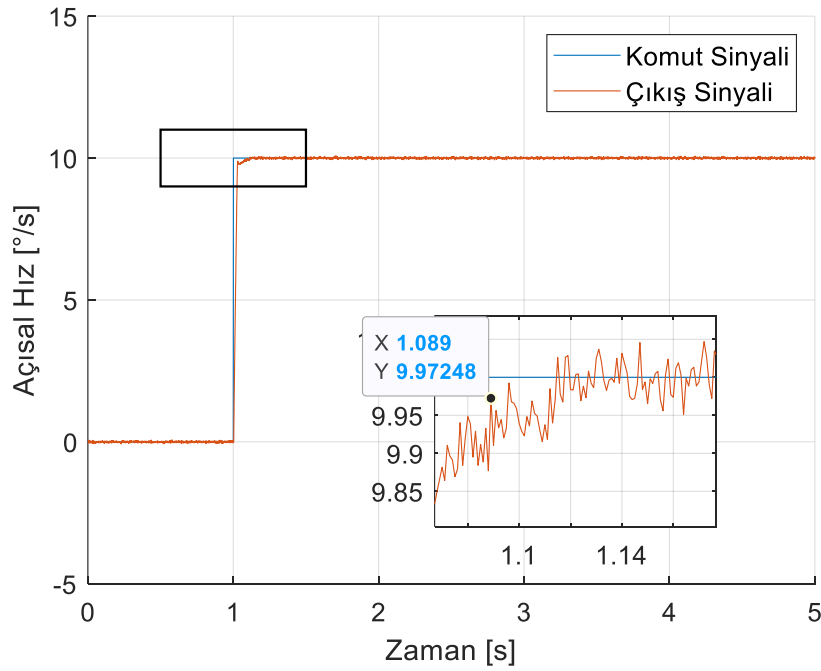
Şekil 3.25 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

Çizelge 3.9 : Yanca eksenli PI+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

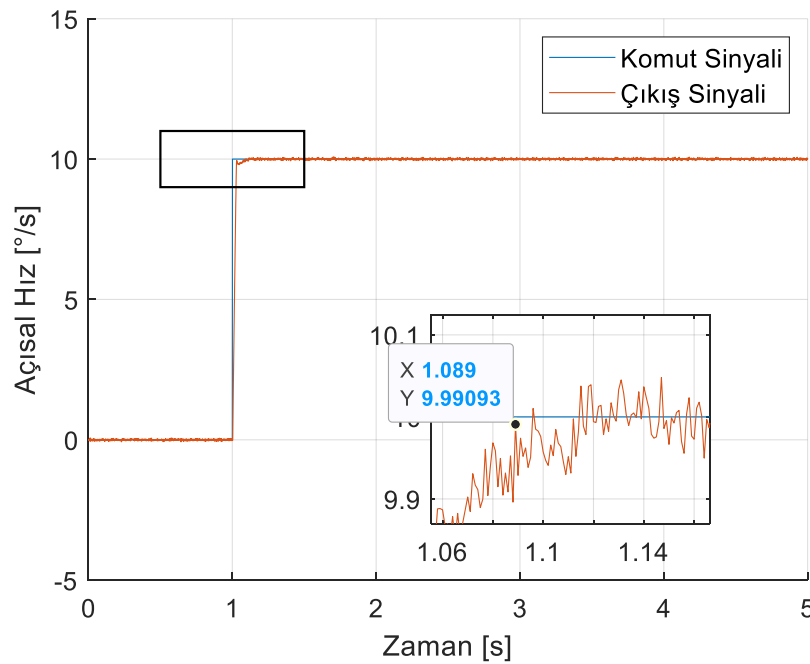
Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 3.86	% 3.58	% 4.10	% 3.58
2	20	1	% 3.81	% 3.52	% 4.05	% 3.52
3	30	1	% 3.81	% 3.52	% 4.05	% 3.52
4	10	1	% 3.82	% 3.53	% 4.06	% 3.53
5	10	0.1	% 0.44	% 0.42	% 0.45	% 0.42
6	10	0.5	% 1.91	% 1.77	% 2.03	% 1.77
7	10	2	% 7.64	% 7.06	% 8.12	% 7.06
8	10	5	% 19.05	% 17.63	% 20.22	% 17.63

3.3.1.3 ST-KKK kontrolcü seçimi

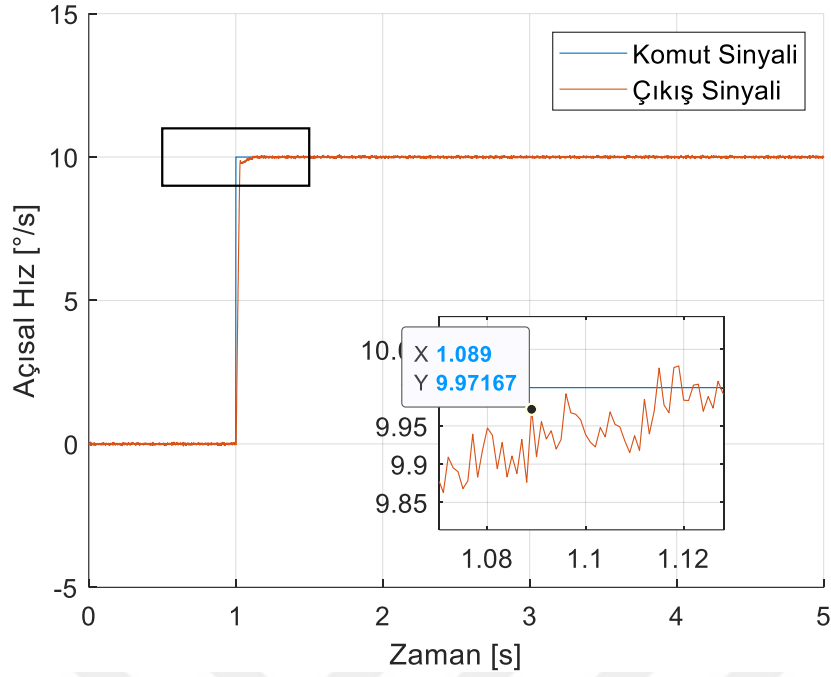
Şekil 3.26’da IAE, Şekil 3.27’de ISE, Şekil 3.28’de ITAE ve Şekil 3.29’da ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller ve bu tepkilerin sayısal karşılıkları Çizelge 3.10’da bulunmaktadır.



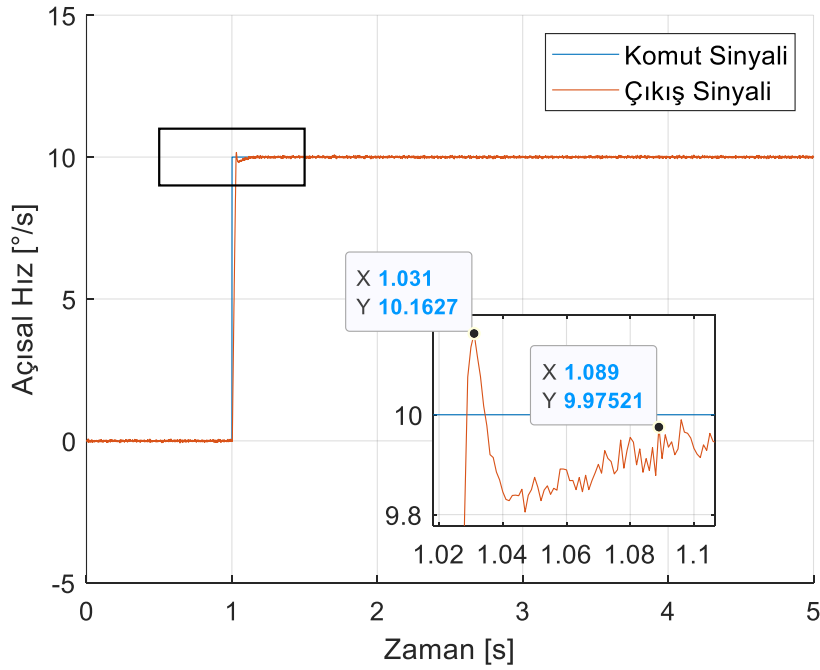
Şekil 3.26 : Yanca ekseni IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.27 : Yanca ekseni ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.28 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.

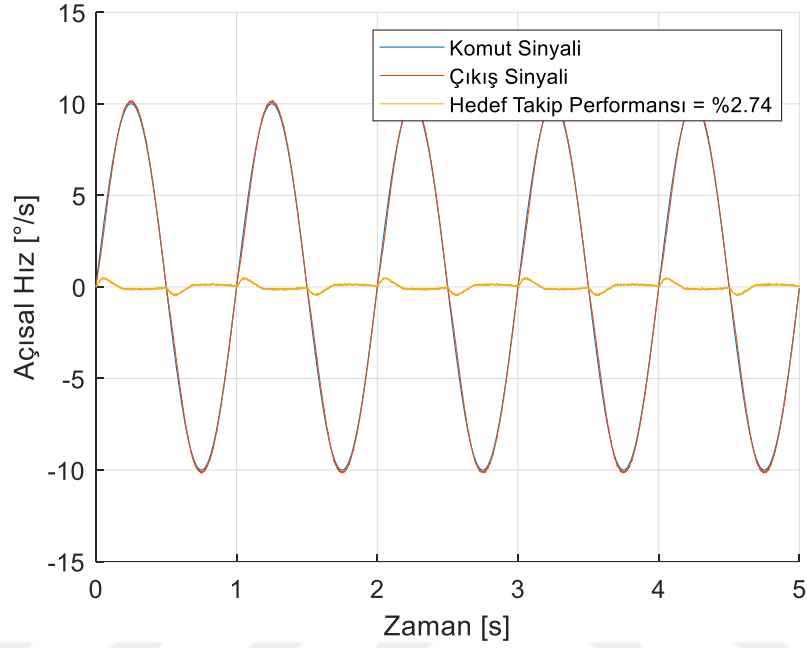


Şekil 3.29 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.

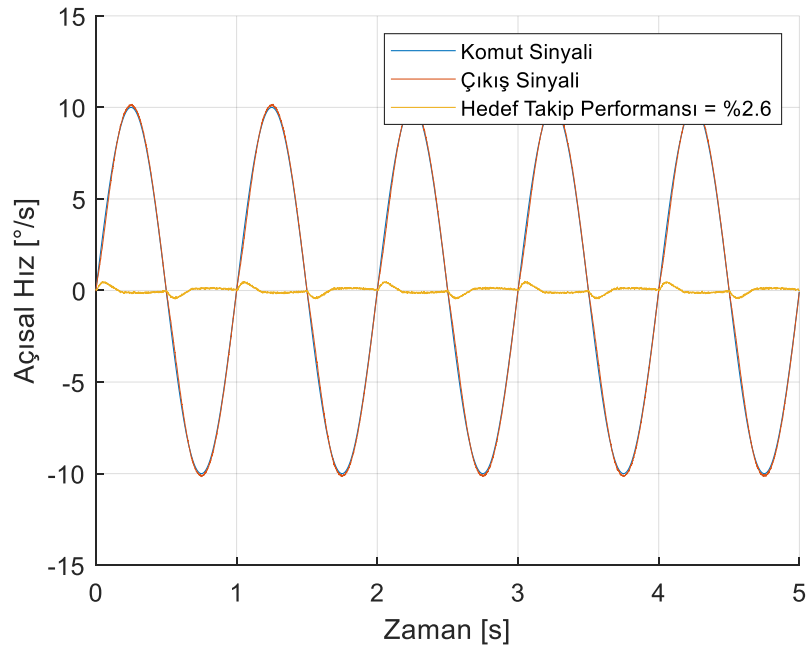
Çizelge 3.10 : Yanca eksenli ST-KKK kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	89	89	89	89
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	1,6

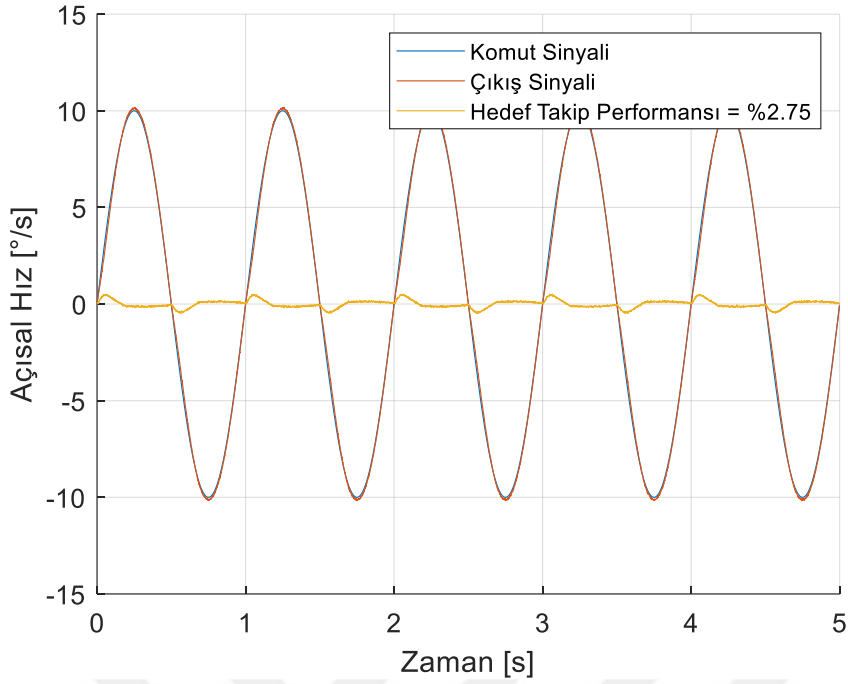
Şekil 3.30’da IAE, Şekil 3.31’de ISE, Şekil 3.32’de ITAE ve Şekil 3.33’te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



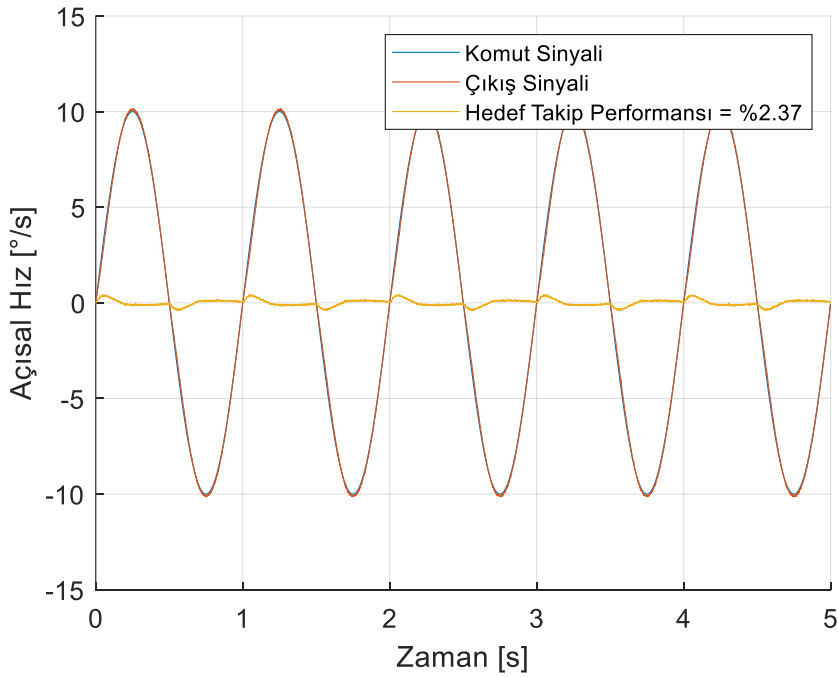
Şekil 3.30 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.31 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.32 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.33 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

ST-KKK kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.11’de sunulmuştur.

Çizelge 3.11 : Yanca eksen ST-KKK kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

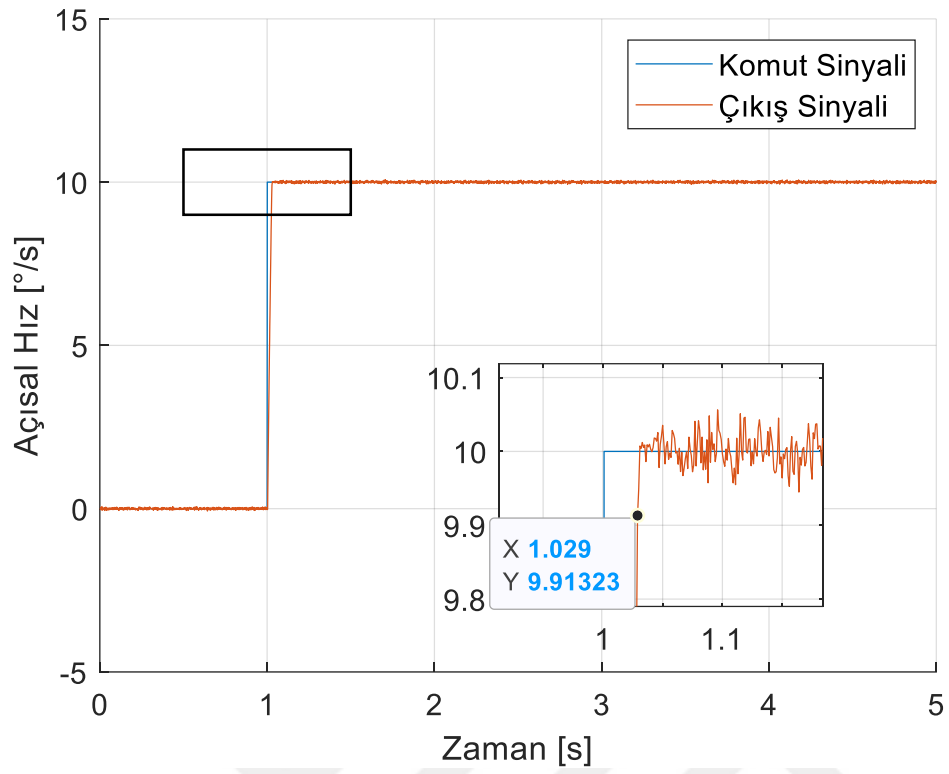
Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 4.66	% 4.42	% 4.69	% 4.05
2	20	1	% 1.83	% 1.73	% 1.84	% 1.60
3	30	1	% 1.59	% 1.50	% 1.60	% 1.39
4	10	1	% 2.74	% 2.60	% 2.75	% 2.37
5	10	0.1	% 0.60	% 0.58	% 0.60	% 0.56
6	10	0.5	% 1.73	% 1.64	% 1.74	% 1.51
7	10	2	% 5.27	% 5.02	% 5.31	% 4.43
8	10	5	% 13.82	% 13.25	% 13.98	% 10.32

Çizelge 3.10 incelendiğinde, adım giriş sinyaline karşı elde edilen maksimum aşma değerleri incelendiğinde, ITSE amaç fonksiyonu ile optimize edilen ST-KKK algoritmasının % 1,6 maksimum aşması olduğu görülmüştür. Bu durumun, kontrol algoritmasının komut sinyalindeki değişimlere hızlı yanıt verme kabiliyetinin olduğu değerlendirilmiştir. Bu aşma miktarının ise, kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu kabul edilmiştir.

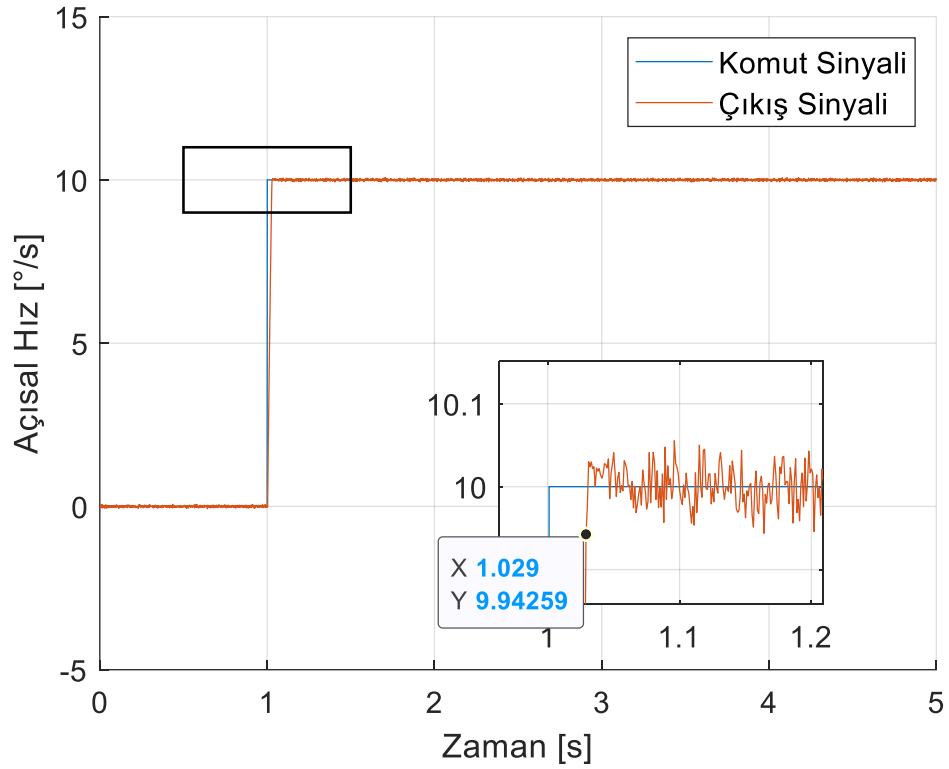
Çizelge 3.11 incelendiğinde, ITSE amaç fonksiyonuyla optimize edilen kazançlara sahip ST-KKK kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ITSE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_1 = 7,0536$; $K_2 = 59,1501$)

3.3.1.4 ST-KKK+İleri besleme kontrolcü seçimi

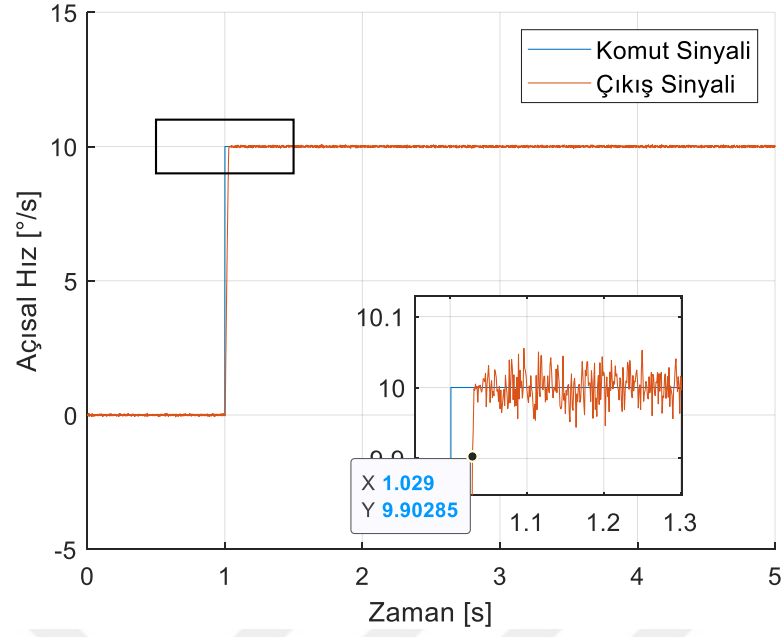
Şekil 3.34’Te IAE, Şekil 3.35’de ISE, Şekil 3.36’da ITAE ve Şekil 3.37’de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller ve bu tepkilerin sayısal karşılıkları Çizelge 3.12’de bulunmaktadır.



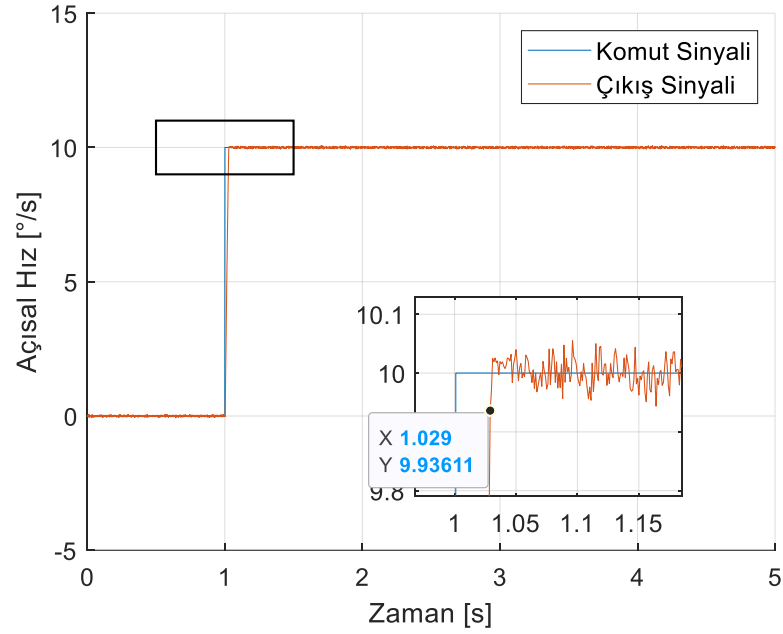
Şekil 3.34 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.35 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.36 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

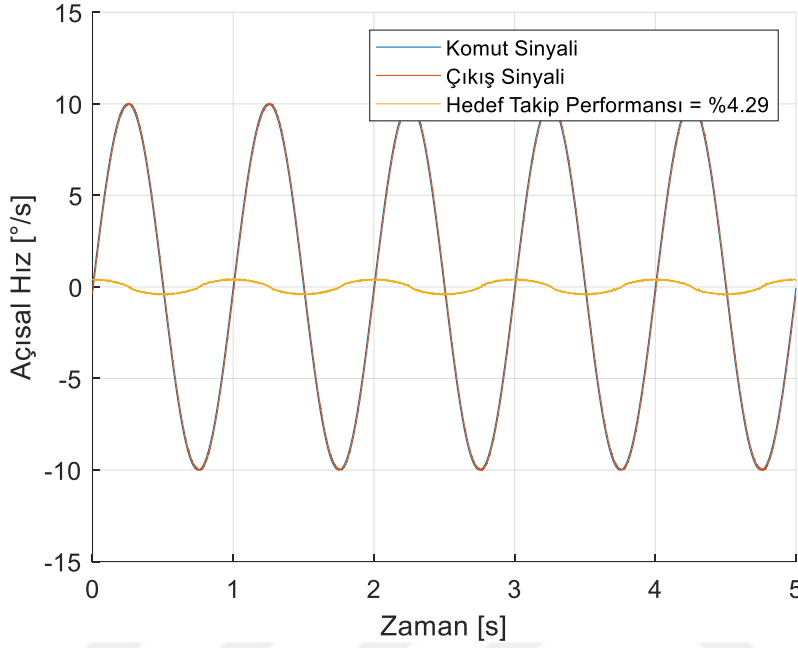


Şekil 3.37 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

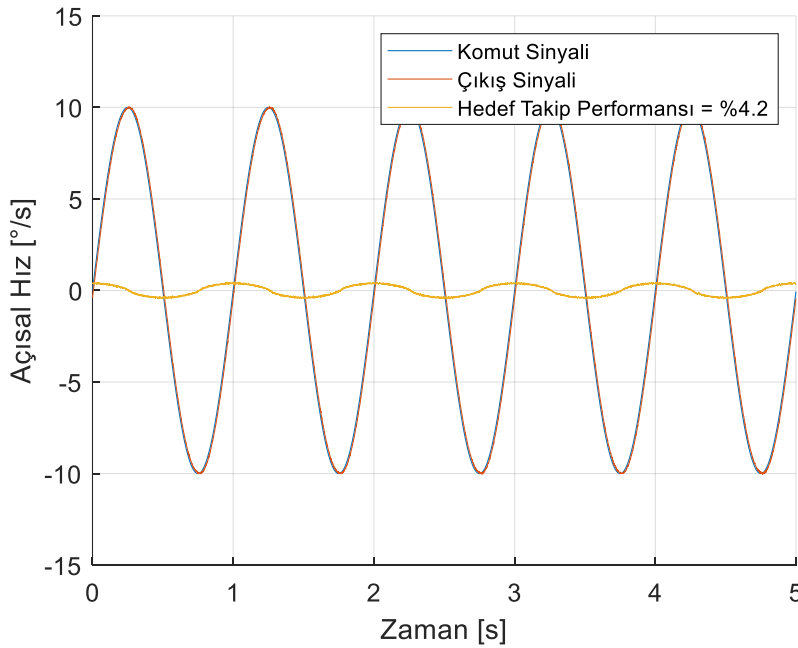
Çizelge 3.12 : Yanca eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	29	29	29	29
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	0

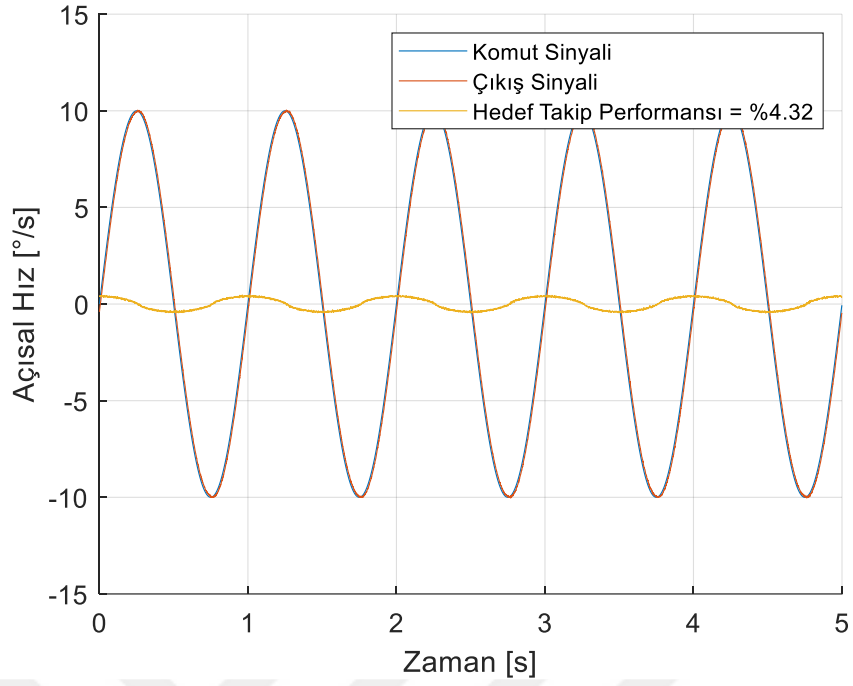
Şekil 3.38’de IAE, Şekil 3.39’da ISE, Şekil 3.40’da ITAE ve Şekil 3.41’de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



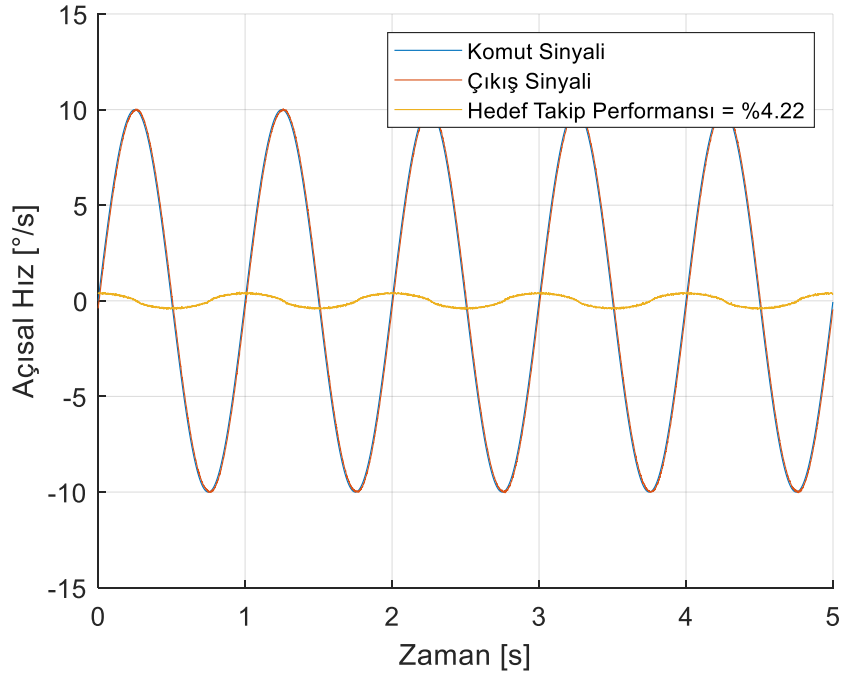
Şekil 3.38 : Yanca eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.39 : Yanca eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.40 : Yanca eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.41 : Yanca eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

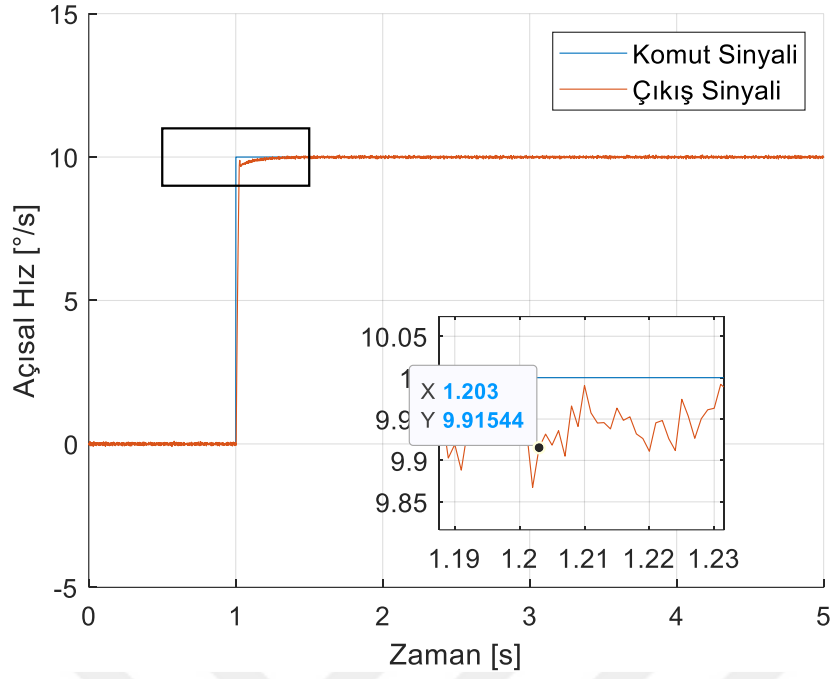
PI kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.13'te sunulmuştur.

Çizelge 3.13 : Yanca eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

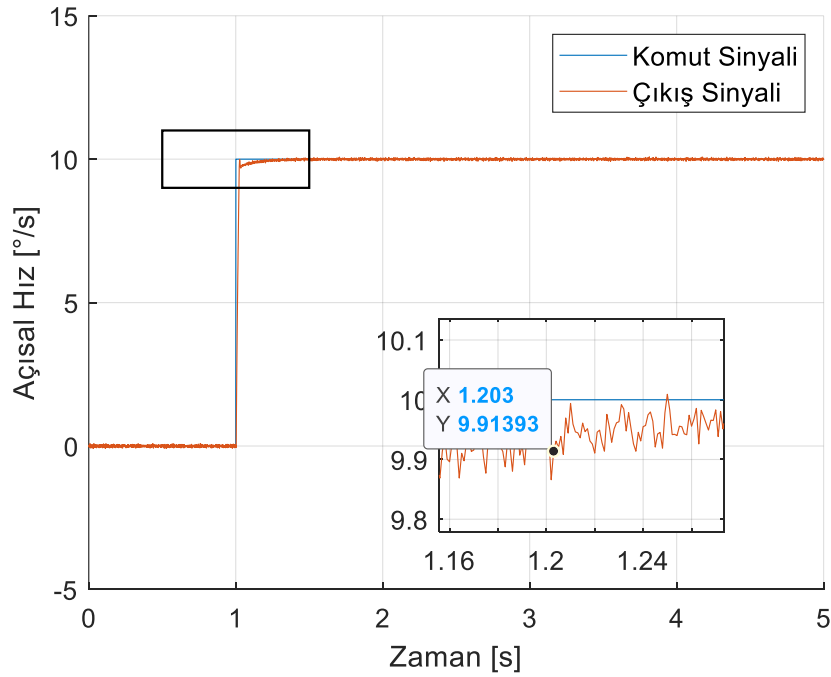
Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 5.33	% 5.22	% 5.37	% 5.24
2	20	1	% 3.55	% 3.47	% 3.59	% 3.49
3	30	1	% 3.29	% 3.20	% 3.32	% 3.22
4	10	1	% 4.29	% 4.20	% 4.32	% 4.22
5	10	0.1	% 0.93	% 0.91	% 0.93	% 0.91
6	10	0.5	% 2.66	% 2.61	% 2.69	% 2.62
7	10	2	% 7.10	% 6.93	% 7.16	% 6.97
8	10	5	% 16.34	% 15.78	% 16.57	% 15.90

Çizelge 3.12 incelendiğinde, ileri besleme eklenen kontrol algoritmalarında yerleşme zamanının oldukça kısa olduğu görülmüştür. Gimbal sistemi simülasyon modelinde bulunan sürtünme ve kütle dengesizliği modelleri ileri besleme olarak kullanıldığından, yalnızca gimbal ataletine karşı optimize edilen kontrol kazançları bu doğrusal olmayan etkilerden büyük ölçüde bağımsız hale gelmiştir. Bu durum, simülasyon ortamında daha hızlı ve kararlı tepkilerin görülmesini sağlamaktadır. Ancak, gerçek sistem üzerinde tam olarak modellenemeyen sürtünme fenomeni dinamikleri kontrol kazançlarının etkinliğini gerçek sistem üzerinde sınırlayacaktır.

Çizelge 3.13 incelendiğinde, ISE amaç fonksiyonuyla optimize edilen kazançlara sahip KKK+İleri besleme kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_1 = 4,8561$; $K_2 = 0,0020$)



Şekil 3.44 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.

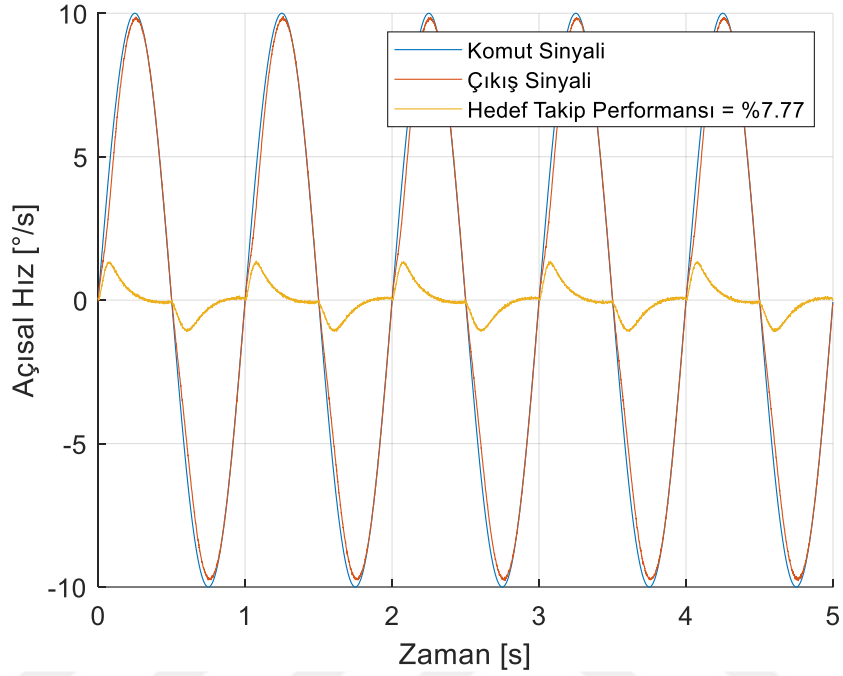


Şekil 3.45 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü adım girişi.

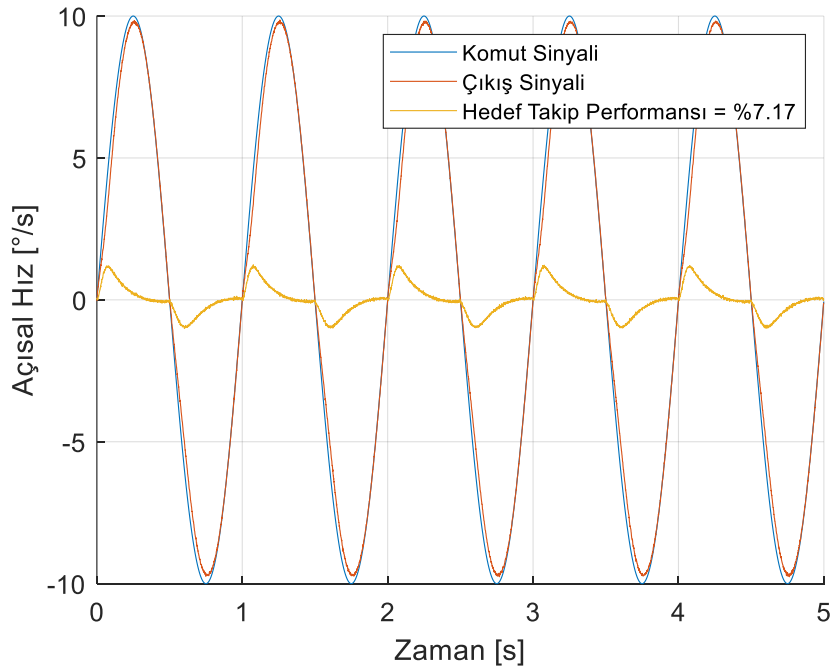
Çizelge 3.14 : Yükseliş eksenli PI kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	203	203	203	203
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	0

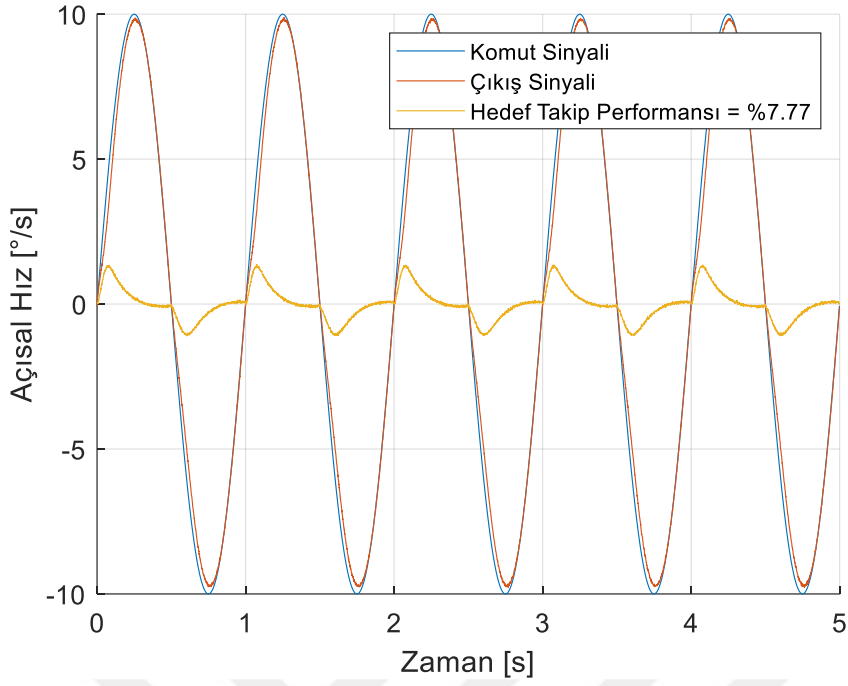
Şekil 3.46’da IAE, Şekil 3.47’de ISE, Şekil 3.48’de ITAE ve Şekil 3.49’da ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



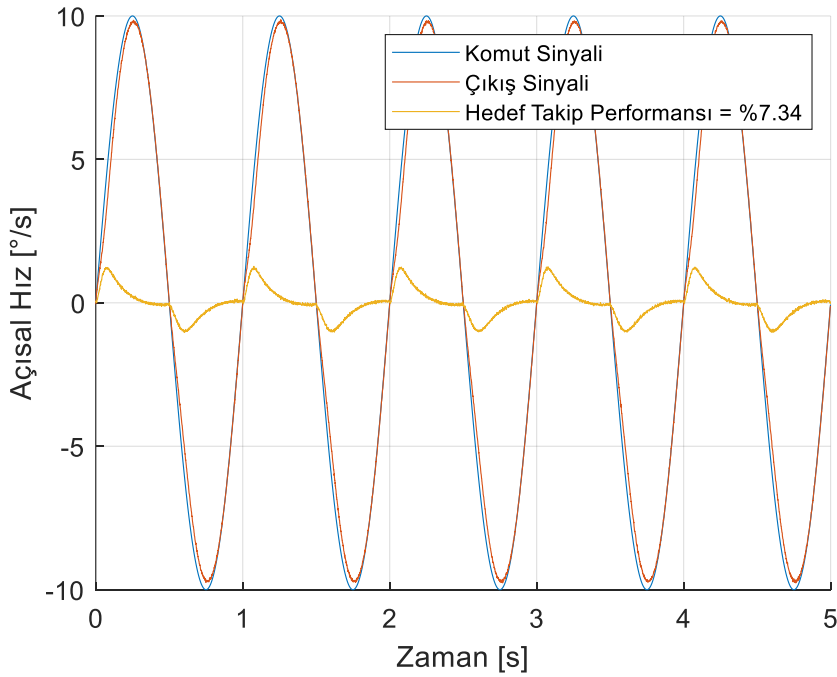
Şekil 3.46 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.47 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.48 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.49 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

PI kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.15'te sunulmuştur.

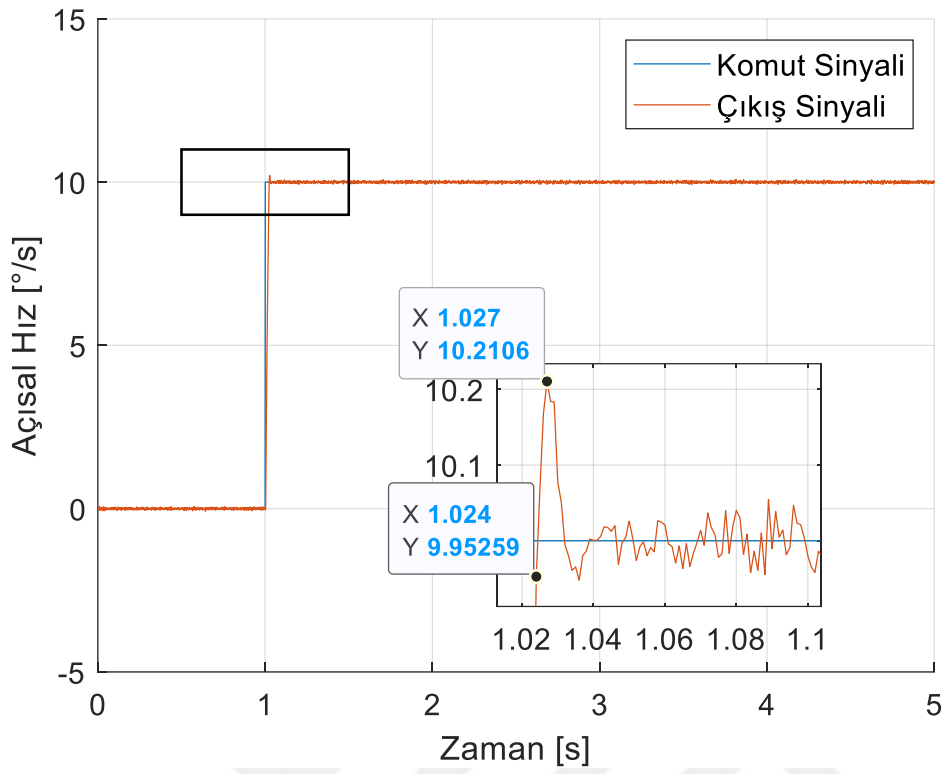
Çizelge 3.15 : Yükseliş eksenli PI kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 14.21	% 13.20	% 14.21	% 13.48
2	20	1	% 4.33	% 3.99	% 4.33	% 4.08
3	30	1	% 3.19	% 2.94	% 3.19	% 3.01
4	10	1	% 7.77	% 7.17	% 7.77	% 7.34
5	10	0.1	% 1.86	% 1.77	% 1.86	% 1.79
6	10	0.5	% 5.34	% 5.02	% 5.34	% 5.10
7	10	2	% 9.71	% 8.70	% 9.71	% 8.98
8	10	5	% 11.79	% 10.35	% 11.79	% 10.76

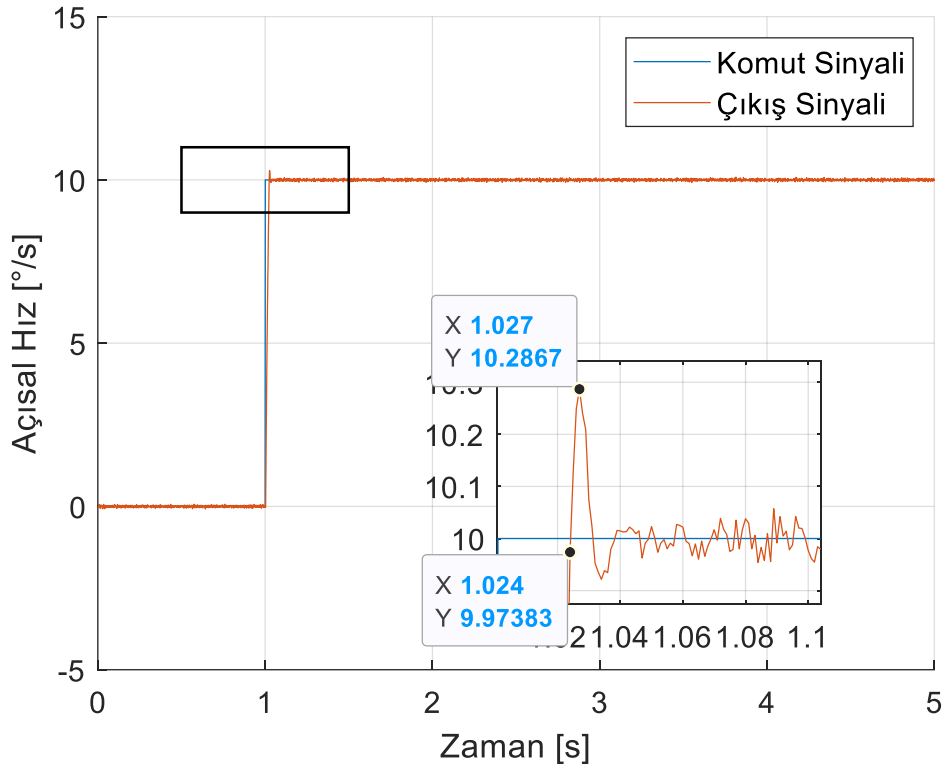
Çizelge 3.15 incelendiğinde, ISE amaç fonksiyonuyla optimize edilen kazançlara sahip PI kontrolcünün en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_P = 3,7489$; $K_I = 28,6627$)

3.3.2.2 PI+İleri besleme kontrolcü seçimi

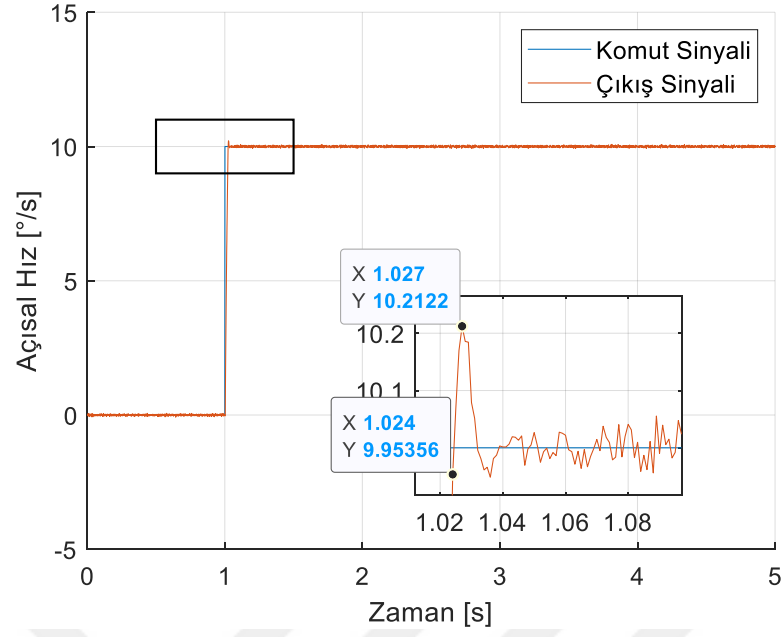
Şekil 3.50’de IAE, Şekil 3.51’de ISE, Şekil 3.52’de ITAE ve Şekil 3.53’te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller ve bu tepkilerin sayısal karşılıkları Çizelge 3.16’da bulunmaktadır.



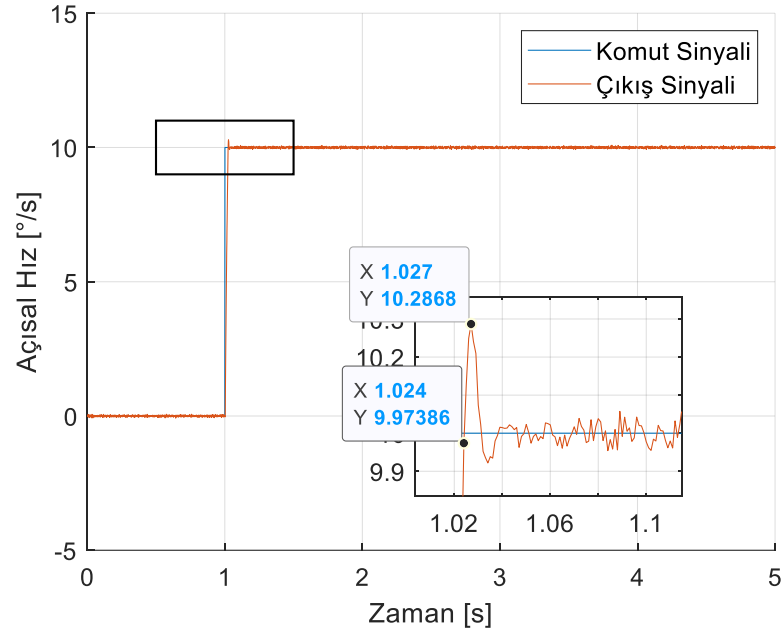
Şekil 3.50 : Yükseliş ekseni IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.51 : Yükseliş ekseni ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.52 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

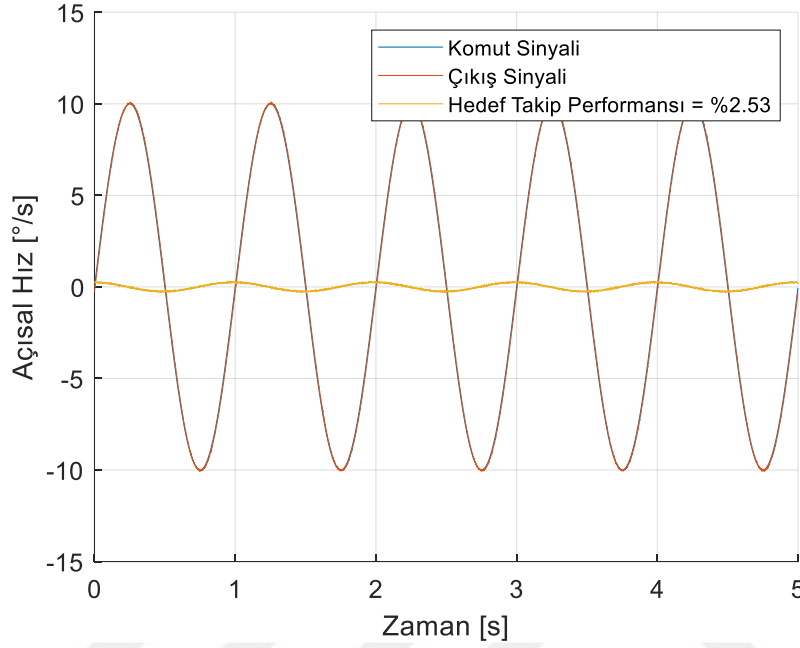


Şekil 3.53 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

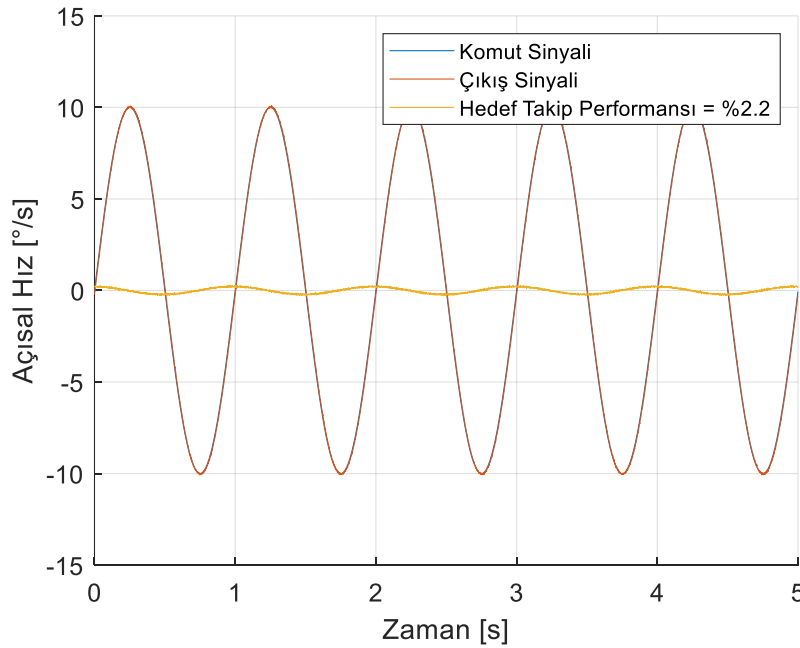
Çizelge 3.16 : Yükseliş eksenli PI+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	32	31	33	31
Maksimum Aşma [%]	2.11	2.87	2.12	2.87

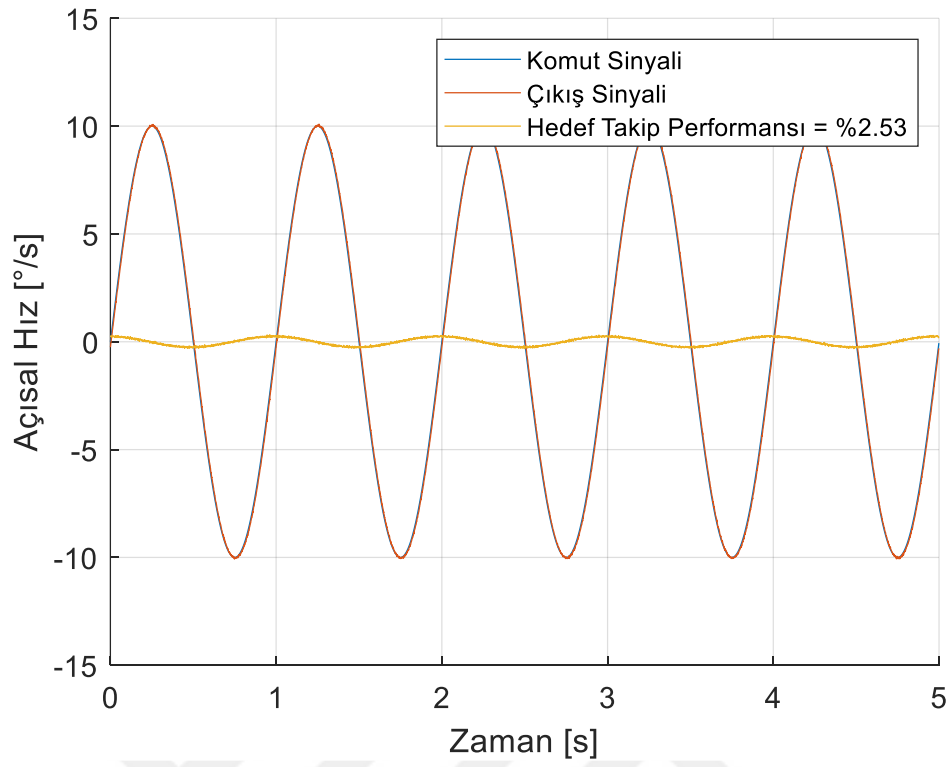
Şekil 3.54'te IAE, Şekil 3.55'te ISE, Şekil 3.56'da ITAE ve Şekil 3.57'de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen PI+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



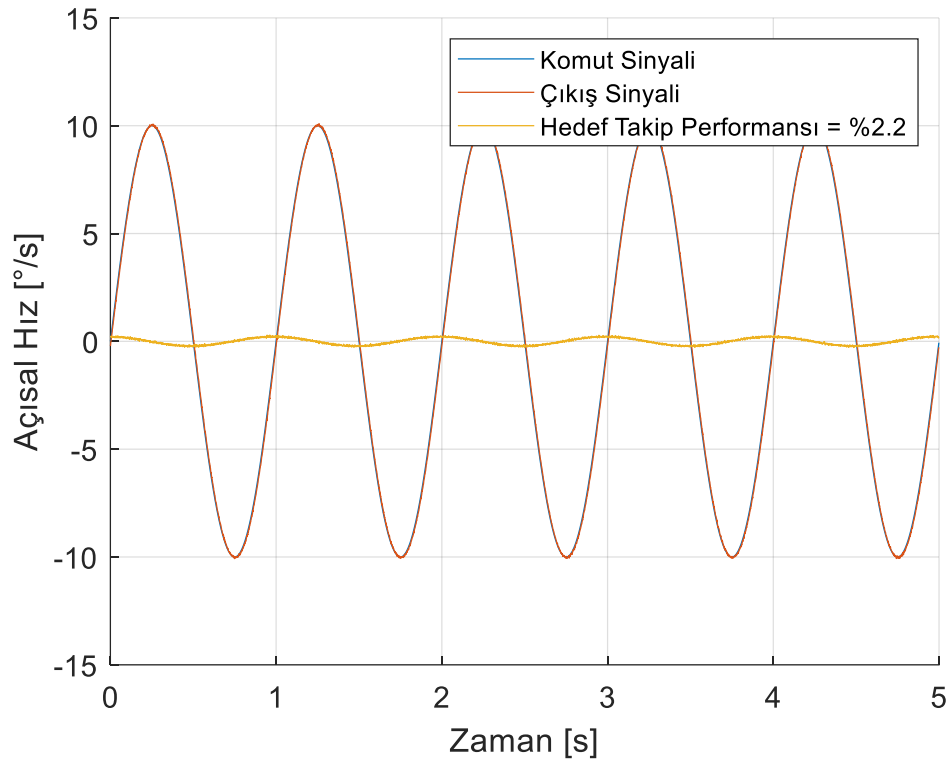
Şekil 3.54 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.55 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.56 : Yükseliş ekseni ITAE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.57 : Yükseliş ekseni ITSE amaç fonksiyonu PI+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

PI+İleri besleme kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.17’de sunulmuştur.

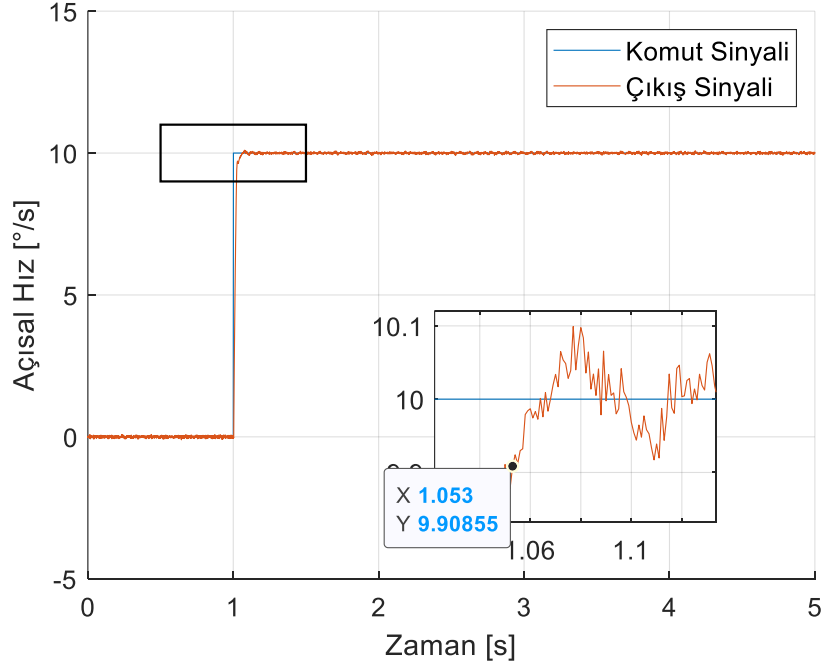
Çizelge 3.17 : Yükseliş ekseni PI+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 2.60	% 2.28	% 2.60	% 2.28
2	20	1	% 2.52	% 2.18	% 2.51	% 2.18
3	30	1	% 2.51	% 2.18	% 2.51	% 2.18
4	10	1	% 2.53	% 2.20	% 2.53	% 2.20
5	10	0.1	% 0.39	% 0.39	% 0.39	% 0.39
6	10	0.5	% 1.28	% 1.13	% 1.28	% 1.13
7	10	2	% 5.05	% 4.38	% 5.04	% 4.38
8	10	5	% 12.63	% 10.95	% 12.61	% 10.95

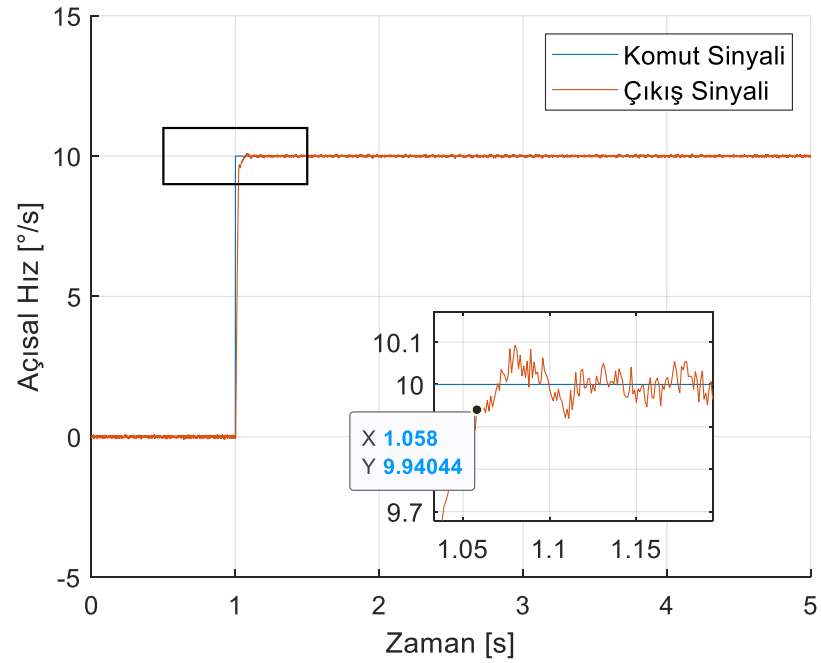
Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17 incelendiğinde, ISE ve ITSE amaç fonksiyonlarıyla optimize edilen kazançlara sahip PI+İleri Besleme kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu iki amaç fonksiyonu ile elde edilen kazançlar neredeyse aynı değerlere ve performans sonuçlarına sahip olduğu için sadeleştirme amacıyla ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_P = 3,7500$; $K_I = 2,3276$)

3.3.2.3 ST-KKK kontrolcü seçimi

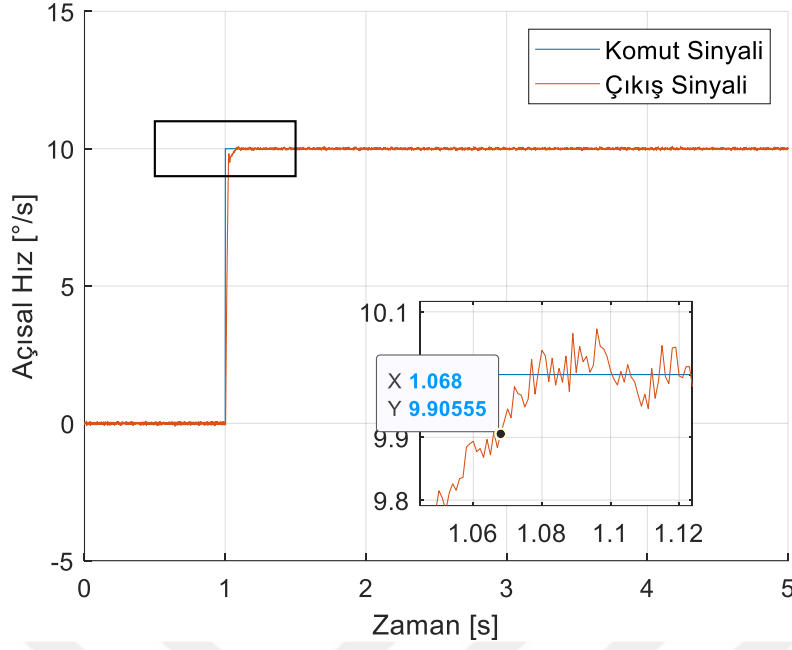
Şekil 3.58’de IAE, Şekil 3.59’da ISE, Şekil 3.60’ta ITAE ve Şekil 3.61’de ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller ve bu tepkilerin sayısal karşılıkları Çizelge 3.18’de bulunmaktadır.



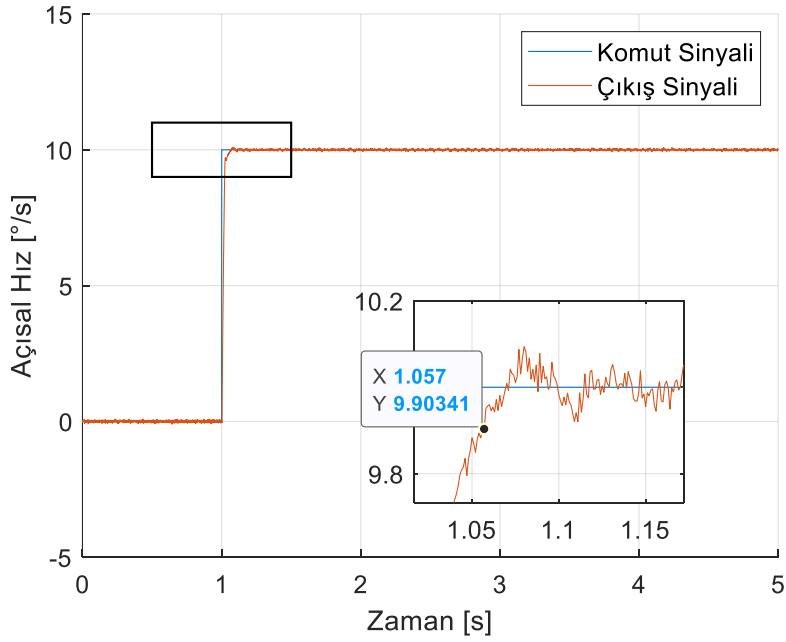
Şekil 3.58 : Yükseliş ekseni IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.59 : Yükseliş ekseni ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.60 : Yükseliş ekseni ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.

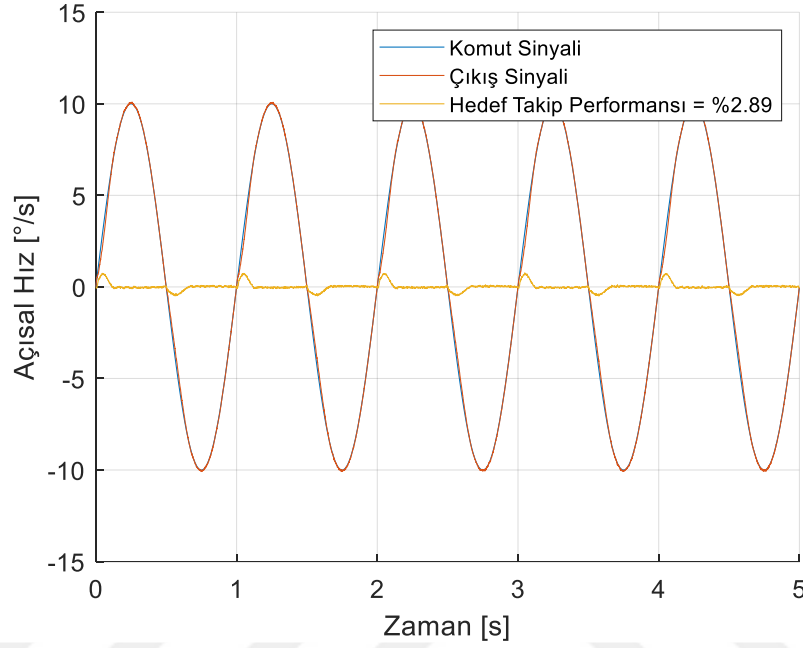


Şekil 3.61 : Yükseliş ekseni ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü adım girişi.

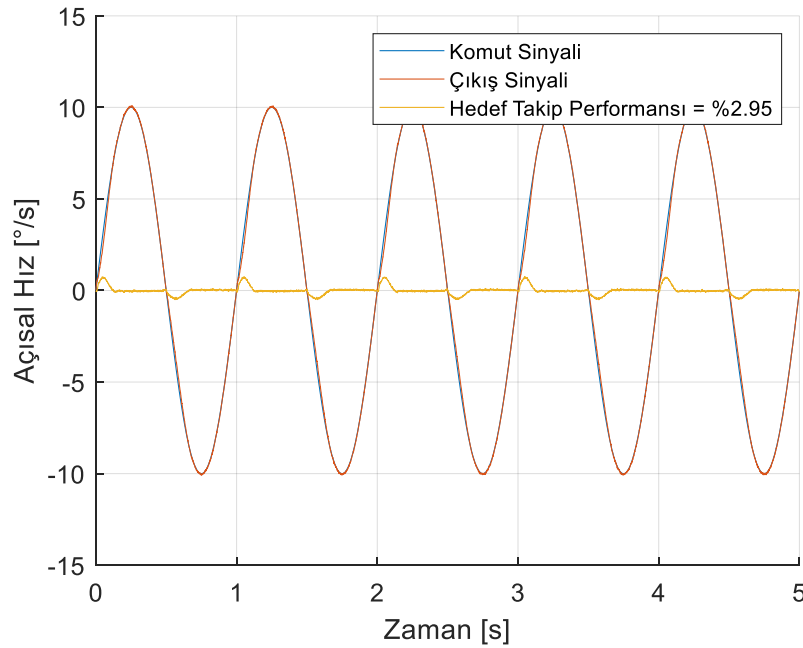
Çizelge 3.18 : Yükseliş ekseni ST-KKK kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	53	58	68	57
Maksimum Aşma [%]	0	0	0	0

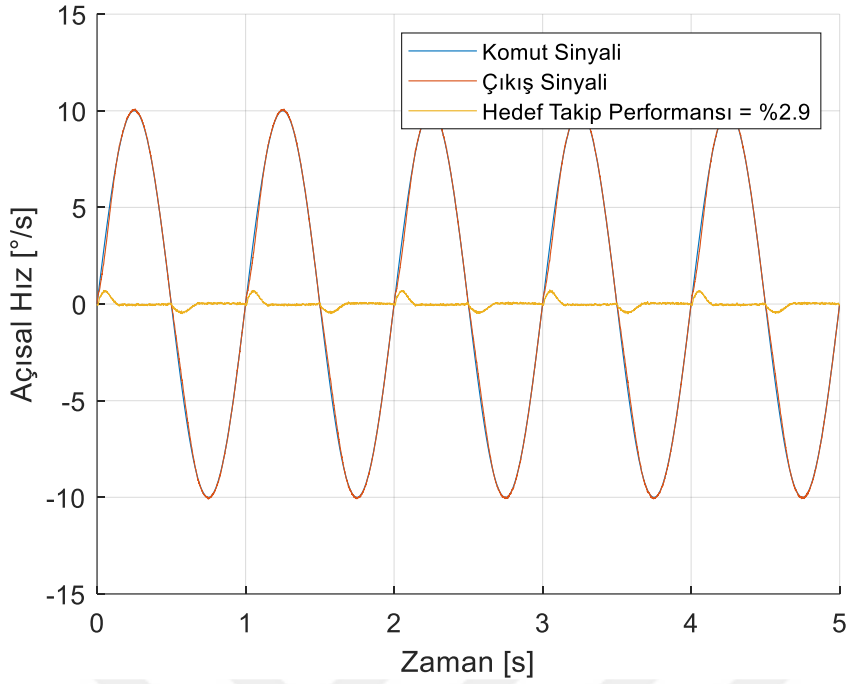
Şekil 3.62’de IAE, Şekil 3.63’te ISE, Şekil 3.64’de ITAE ve Şekil 3.65’te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



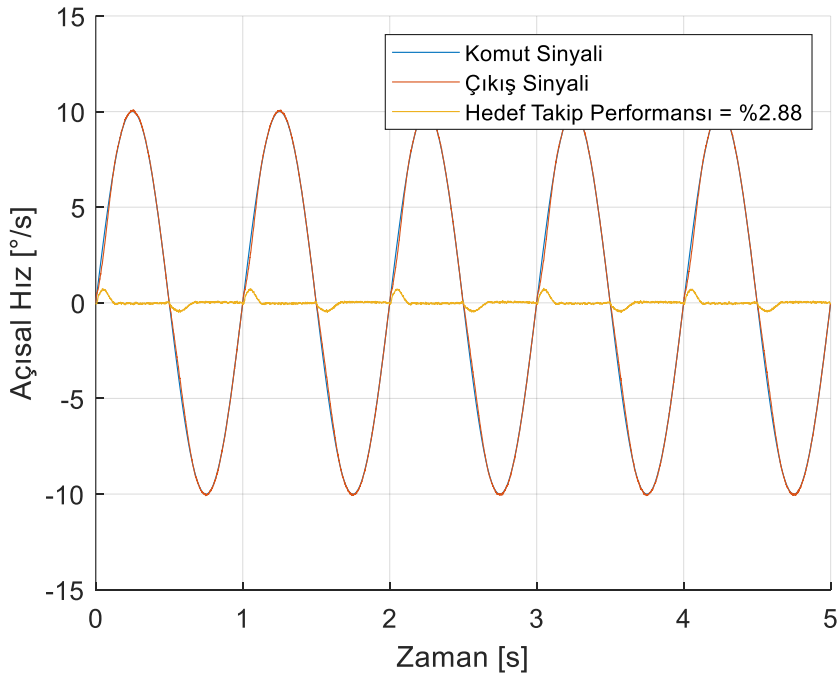
Şekil 3.62 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.63 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.64 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.65 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

ST-KKK kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.19’de sunulmuştur.

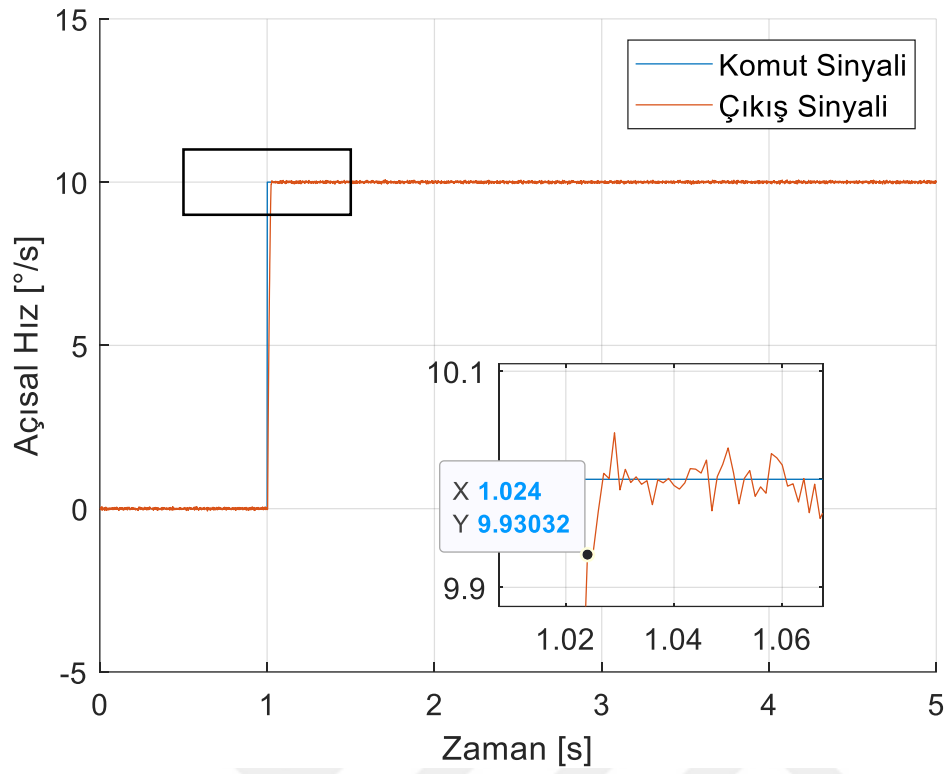
Çizelge 3.19 : Yükseliş eksenli ST-KKK kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 4.82	% 4.95	% 4.96	% 4.84
2	20	1	% 1.74	% 1.76	% 1.69	% 1.72
3	30	1	% 1.30	% 1.31	% 1.24	% 1.28
4	10	1	% 2.89	% 2.95	% 2.90	% 2.88
5	10	0.1	% 0.59	% 0.60	% 0.60	% 0.59
6	10	0.5	% 1.73	% 1.77	% 1.78	% 1.74
7	10	2	% 4.57	% 4.61	% 4.41	% 4.51
8	10	5	% 9.21	% 9.14	% 8.35	% 8.97

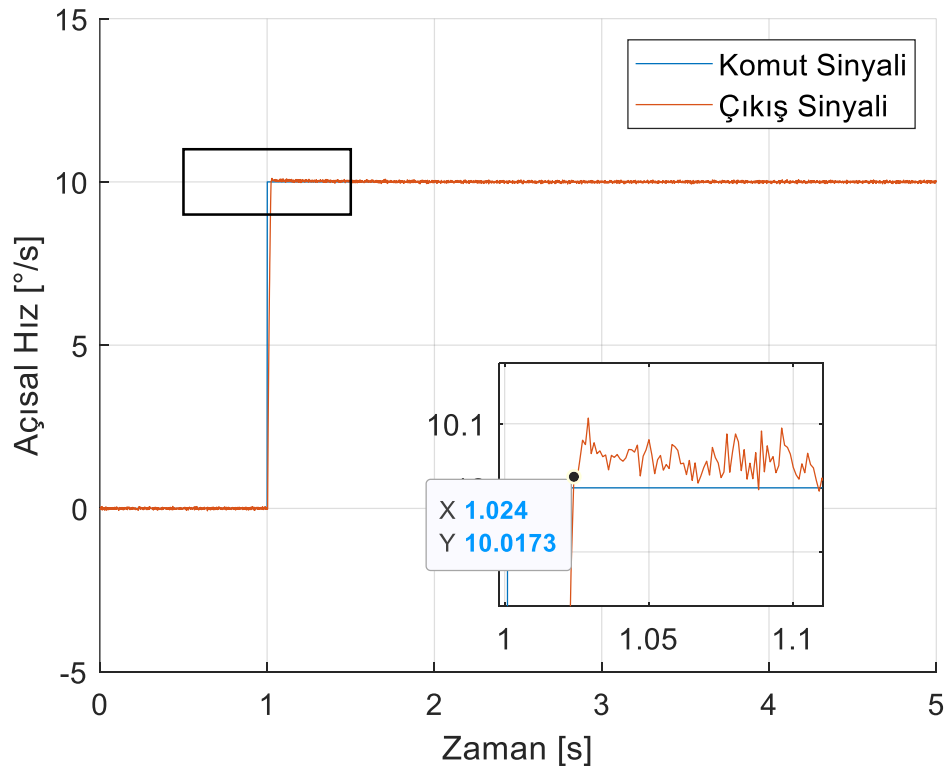
Çizelge 3.18 ve Çizelge 3.19 incelendiğinde, ITSE amaç fonksiyonuyla optimize edilen kazançlara sahip ST-KKK kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ITSE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_1 = 4,2231$; $K_2 = 140,3904$)

3.3.2.4 ST-KKK+İleri besleme kontrolcü seçimi

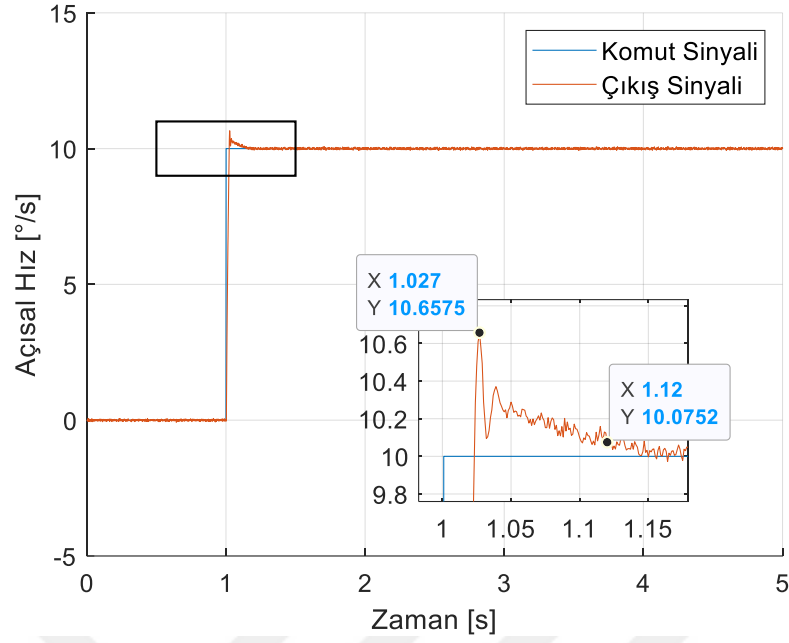
Şekil 3.66’da IAE, Şekil 3.67’de ISE, Şekil 3.68’de ITAE ve Şekil 3.69’da ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] adım giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller ve bu tepkilerin sayısal karşılıkları Çizelge 3.20’de bulunmaktadır.



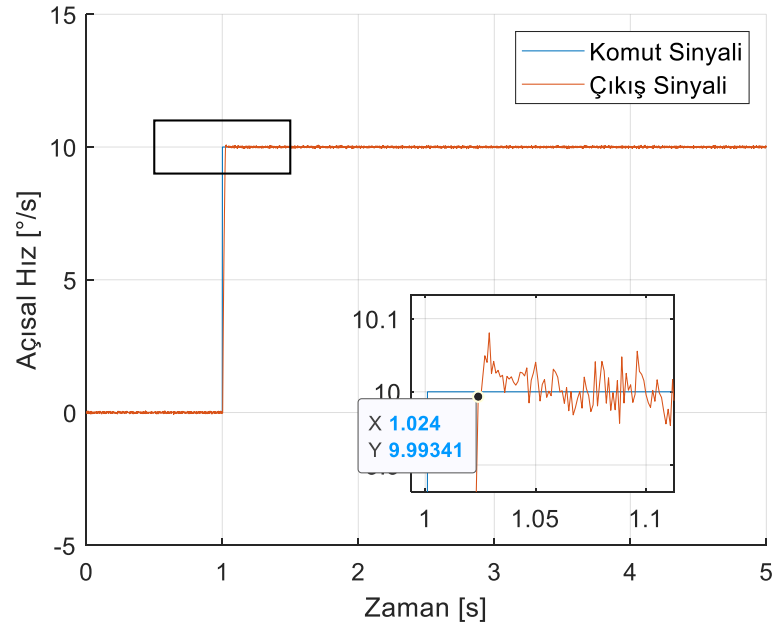
Şekil 3.66 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.67 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.



Şekil 3.68 : Yükseliş eksenli ITAE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

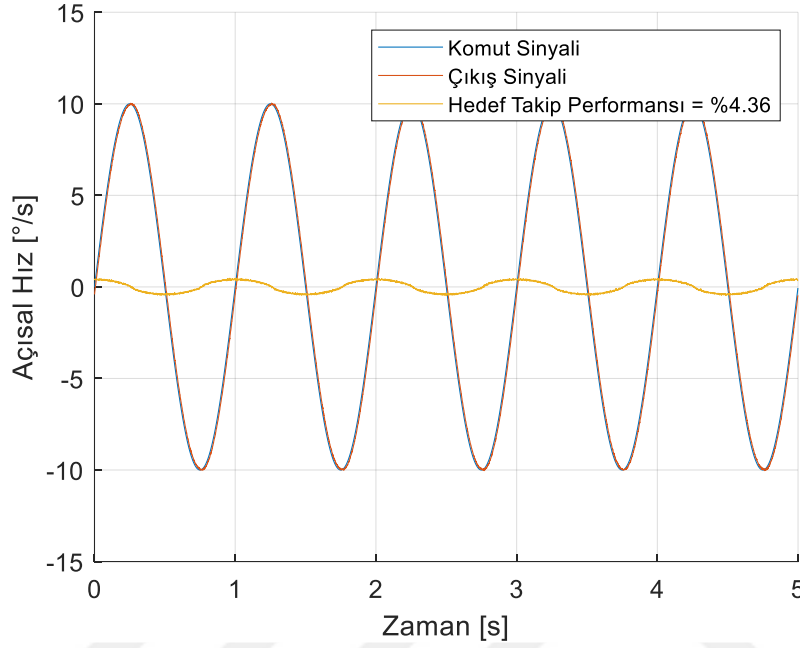


Şekil 3.69 : Yükseliş eksenli ITSE amaç fonksiyonu KKK+İleri besleme kontrolcüsü adım girişi.

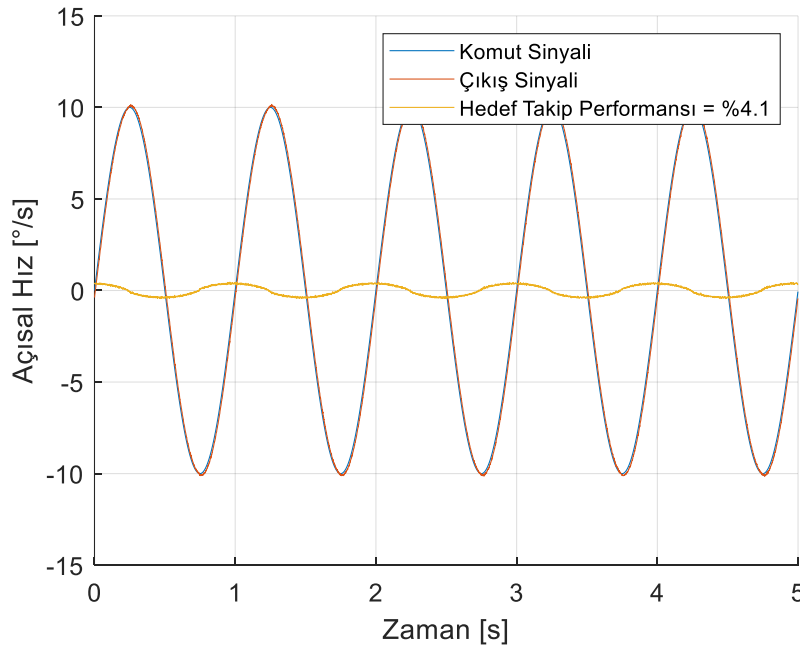
Çizelge 3.20 : Yükseliş eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü adım girişi karşılaştırması.

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Yerleşme Zamanı [ms]	24	24	27	24
Maksimum Aşma [%]	0	0	6.58	0

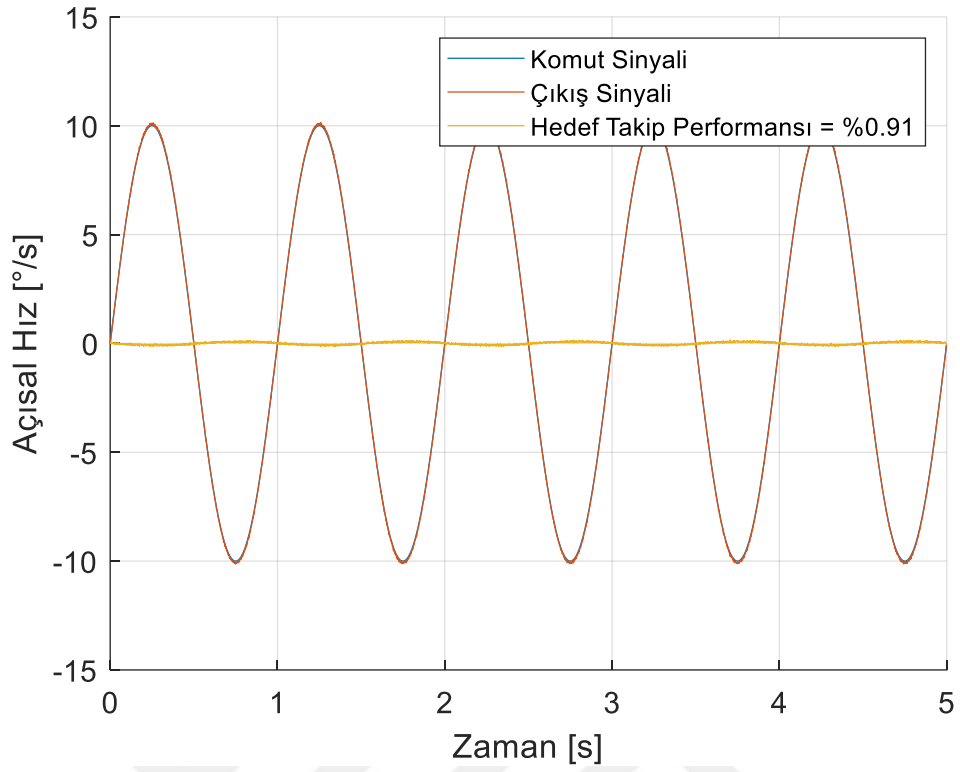
Şekil 3.70'te IAE, Şekil 3.71'de ISE, Şekil 3.72'de ITAE ve Şekil 3.73'te ITSE amaç fonksiyonlarına göre optimize edilen ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin 10 [deg/s] genliğe ve 1 [Hz] frekansa sahip sinüs giriş sinyaline karşı sistem tepkilerine ait görseller bulunmaktadır.



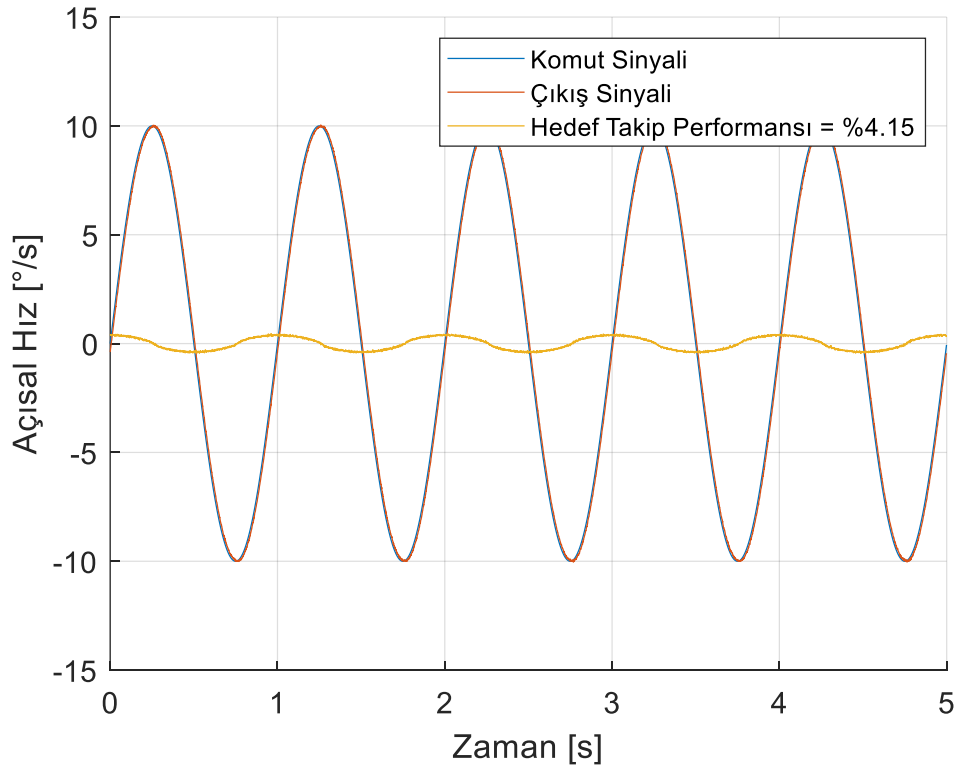
Şekil 3.70 : Yükseliş eksenli IAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.71 : Yükseliş eksenli ISE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.72 : Yükseliş eksenini ITAE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.



Şekil 3.73 : Yükseliş eksenini ITSE amaç fonksiyonu ST-KKK+İleri besleme kontrolcüsü 10 [deg/s] ve 1 [Hz] Sinüs girişi.

ST-KKK+İleri besleme kontrolcülerin hedef takip performansı kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için farklı genliklerde ve frekanslarda sinüs giriş sinyalleri uygulanmış ve hedef takip performans değerleri Çizelge 3.21’de sunulmuştur.

Çizelge 3.21 : Yükseliş eksenli KKK+İleri besleme kontrolcü hedef takip performansı karşılaştırması.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Hedef Takip Performansı Hatası [%]			
			IAE	ISE	ITAE	ITSE
1	5	1	% 5.42	% 5.10	% 1.08	% 5.17
2	20	1	% 3.62	% 3.39	% 0.86	% 3.43
3	30	1	% 3.36	% 3.12	% 0.85	% 3.16
4	10	1	% 4.36	% 4.10	% 0.91	% 4.15
5	10	0.1	% 0.94	% 0.46	% 0.32	% 0.90
6	10	0.5	% 2.71	% 2.47	% 0.38	% 2.59
7	10	2	% 7.24	% 6.80	% 2.99	% 6.86
8	10	5	% 16.83	% 15.31	% 8.36	% 15.52

Çizelge 3.20 ve Çizelge 3.21 incelendiğinde, ISE amaç fonksiyonuyla optimize edilen kazançlara sahip KKK kontrolcülerin en uygun sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. ISE amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrol kazançları gerçek sistem üzerinde denenmek üzere seçilmiştir. ($K_1 = 3,5439$; $K_2 = 0,0051$)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bir önceki bölümde MATLAB/Simulink ortamında, gimbal sistemi ve kontrol algoritmalarını içeren simülasyon modeli kullanılarak tasarlanan ve seçilen Çizelge 4.1'deki kazançlara sahip PI, PI+İleri besleme, ST-KKK, ST-KKK+İleri besleme kontrol algoritmaları gerçek gimbal sistemi yazılımına entegre edilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, kontrol algoritmalarının gerçek sistem üzerindeki performansları farklı referans giriş sinyalleri altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Simülasyon çalışmaları sonrasında seçilen kontrolcü kazançları.

Kontrol Yöntemi	Yanca Eksen		Yükseliş Eksen	
	K_P veya K_1	K_I veya K_2	K_P veya K_1	K_I veya K_2
PI	3.2497	11.7310	3.7489	28.6627
PI+İleri besleme	3.2498	1.9175	3.7500	2.3276
ST-KKK	7.0536	59.1501	4.2231	140.3904
ST-KKK+İleri besleme	4.8561	0.0020	3.5439	0.0051

4.1 Tek Eksenli Çalışma Durumunda Kontrolcü Performansları

Bu bölümde, gimbal sisteminin her bir eksen için bağımsız olarak gerçekleştirilen hareket kontrol deneylerine yer verilmiştir. Simülasyon ortamında kullanılan referans giriş sinyalleri, deneysel doğrulama amacıyla birebir aynı şekilde gerçek gimbal sistemine uygulanmıştır. Böylece, kontrol algoritmalarının hem simülasyon modeli

üzerindeki hem de fiziksel sistemdeki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar ışığında, sistem dinamiklerine en başarılı performansı veren kontrol algoritması seçilmiş ve nihai kontrolcü tasarımı bu doğrultuda tamamlanmıştır.

4.1.1 Yanca eksen kontrolcü seçimi

Gimbal sisteminin yanca eksenine, her kontrol algoritması için ayrı ayrı 10 [deg/s] açısal hız sinyali adım komut sinyali uygulanarak maksimum aşma ve yerleşme zamanı performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de her kontrol algoritması için komut ve geri besleme sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde yapılan değerlendirmeler:

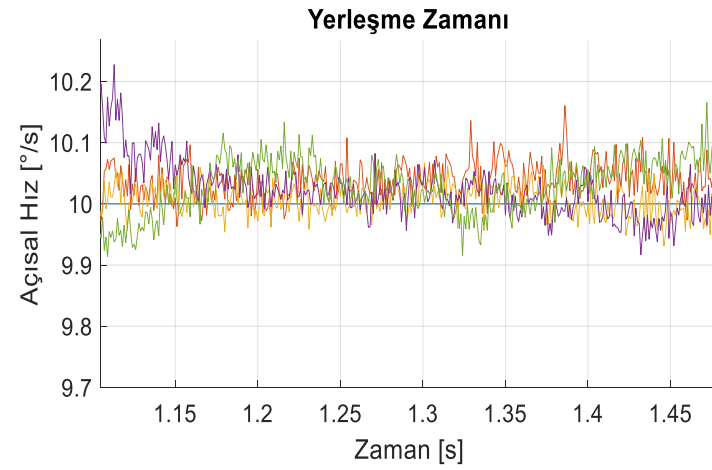
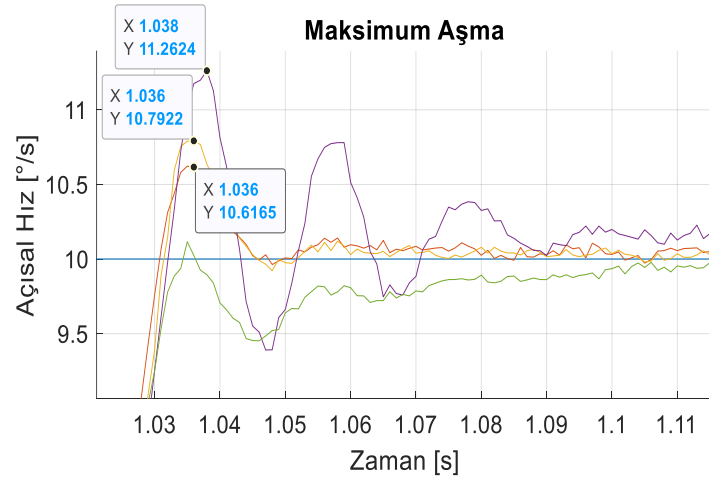
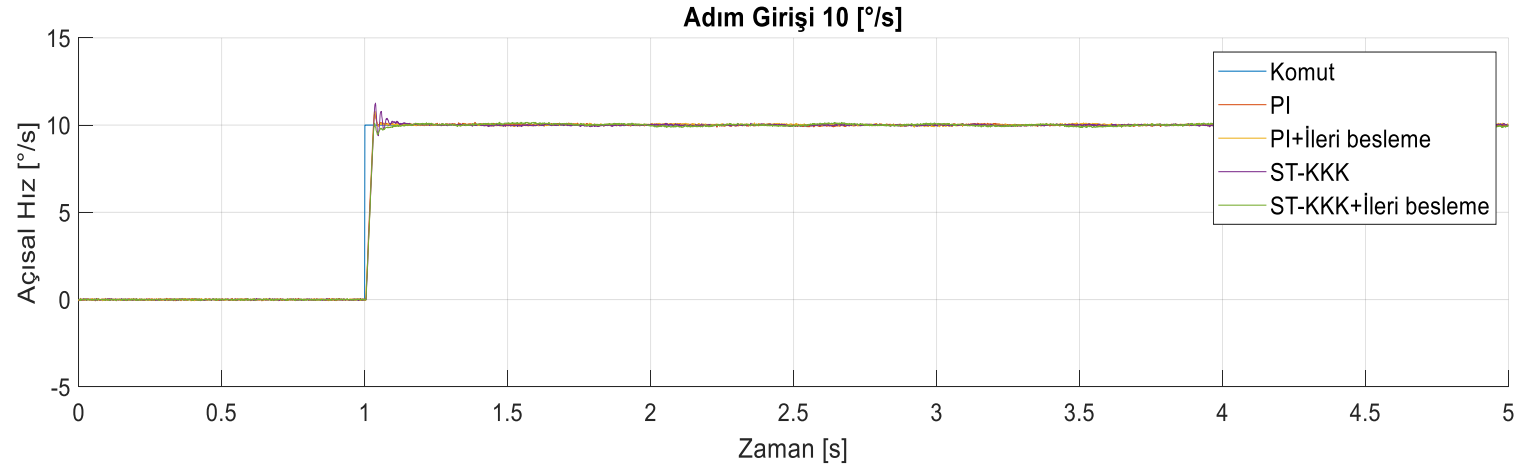
- Yerleşme zamanı performans isteri olan 200 [ms] değerini PI+İleri besleme ve ST-KKK kontrol algoritmaları sağlamıştır. Diğer kontrol algoritmaları toleranslar içinde hareket kontrolü gösterememişlerdir.
- Maksimum aşma performans isteri olan %10 değerini ST-KKK haricindeki tüm kontrol algoritmaları sağlayabilmiştir.

Her kontrol algoritmasına ayrı ayrı 10 [deg/s] genlikli ve 1 [Hz] frekanslı bir sinüs dalgası komut sinyali olarak uygulanmış ve hedef takip performansı hata değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2’de her kontrol algoritması için komut ve geri besleme sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde yapılan değerlendirme:

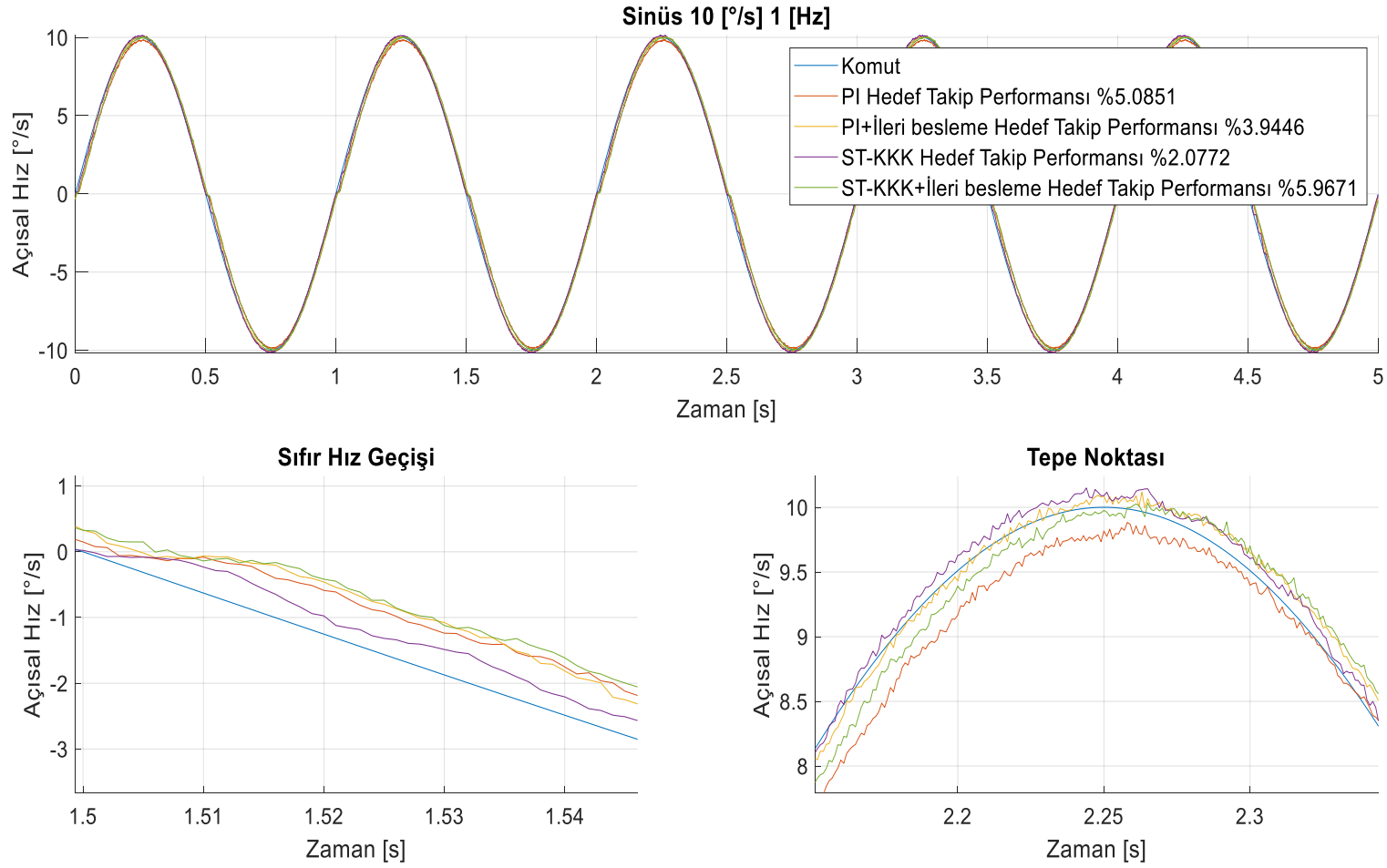
- ST-KKK kontrol algoritması kullanılarak uygulanan sinüs komutlarının sıfır geçişlerinde, tepe noktalarında ve hedef takip performanslarında diğer kontrol yöntemlerine göre üstünlük sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.2’de ise, farklı genliklere ve frekanslara sahip sinüs komut sinyalleri altında her bir kontrol algoritmasının hedef takip performansı sonuçları hem simülasyon ortamında hem de gerçek sistem üzerinde elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Nihai kontrolcü seçimi için, gerçek sistem üzerinde uygulanan testler sonrasında yapılan değerlendirme:

- ST-KKK kontrol algoritmasının, adım komut sinyali karşısında gözlemlenen maksimum aşmasının %10’un üzerinde olması durumu, hedef takip performansı açısından tolere edilebilir bulunmuş ve bu durum kontrolcünün tercih edilmesini engellememiştir.



Şekil 4.1 : Yanca eksenini 10 [deg/s] adım girişine karşılık kontrolcülerin tepkisi.



Şekil 4.2 : Yanca eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık kontrol algoritmalarının performansları.

Çizelge 4.2 : Yanca eksen simülasyon ve gerçek sistem hedef takip performansları.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Simülasyon Sonuçları				Gerçek Sistem Sonuçları			
			PI	PI+İleri besleme	ST-KKK	ST- KKK+İleri besleme	PI	PI+İleri besleme	ST-KKK	ST- KKK+İleri besleme
1	5	1	% 9.13	% 3.58	% 4.05	% 5.24	% 9.36	% 6.37	% 4.03	% 10.71
2	20	1	% 3.91	% 3.52	% 1.60	% 3.49	% 3.46	% 3.11	% 1.29	% 3.85
3	30	1	% 3.53	% 3.52	% 1.39	% 3.22	% 3.01	% 3.04	% 1.08	% 3.23
4	10	1	% 5.45	% 3.53	% 2.37	% 4.22	% 5.09	% 3.94	% 2.08	% 5.97
5	10	0.1	% 1.53	% 0.42	% 0.56	% 0.91	% 1.44	% 1.30	% 0.62	% 2.39
6	10	0.5	% 4.09	% 1.77	% 1.51	% 2.62	% 3.85	% 2.34	% 1.43	% 4.38
7	10	2	% 7.64	% 7.06	% 4.43	% 6.97	% 6.85	% 7.06	% 3.58	% 8.70
8	10	5	% 16.46	% 17.63	% 10.32	% 15.90	% 14.44	% 16.88	% 8.10	% 16.38

4.1.2 Yükseliş eksen kontrolcü seçimi

Gimbal sisteminin yanca eksenine, her kontrol algoritması için ayrı ayrı 10 [deg/s] açısal hız sinyali adım komut sinyali uygulanarak maksimum aşma ve yerleşme zamanı performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'te her kontrol algoritması için komut ve geri besleme sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 4.3 incelendiğinde yapılan değerlendirmeler:

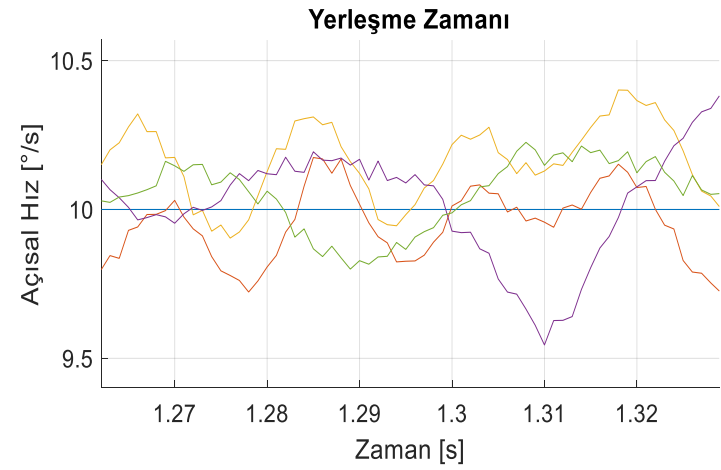
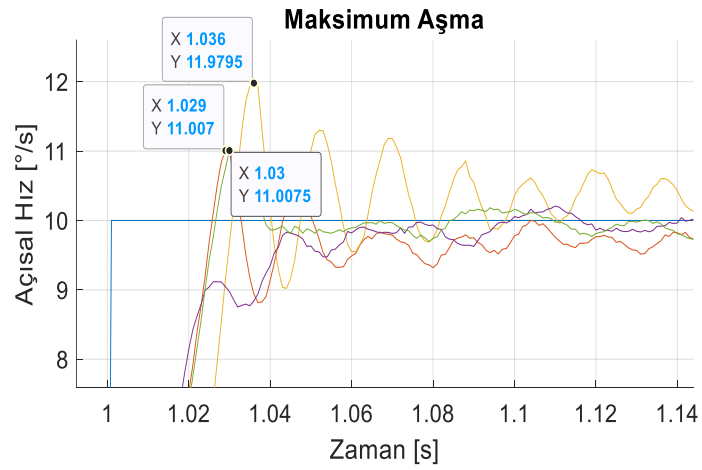
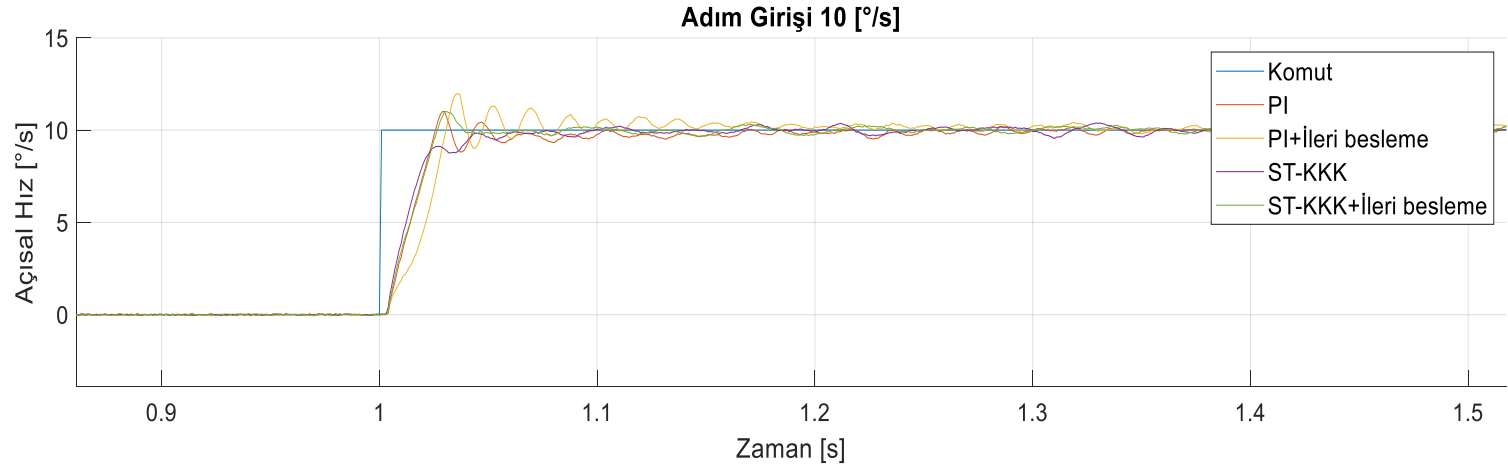
- Yerleşme zamanı performans isteri olan 200 [ms] değerini PI+İleri besleme ve ST-KKK kontrol algoritmaları sağlamıştır. Diğer kontrol algoritmaları toleranslar içinde hareket kontrolü gösterememişlerdir.
- Maksimum aşma performans isteri olan %10 değerini ST-KKK haricindeki tüm kontrol algoritmaları sağlayabilmiştir.

Her kontrol algoritmasına ayrı ayrı 10 [deg/s] genlikli ve 1 [Hz] frekanslı bir sinüs dalgası komut sinyali olarak uygulanmış ve hedef takip performansı hata değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4'te her kontrol algoritması için komut ve geri besleme sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde yapılan değerlendirme:

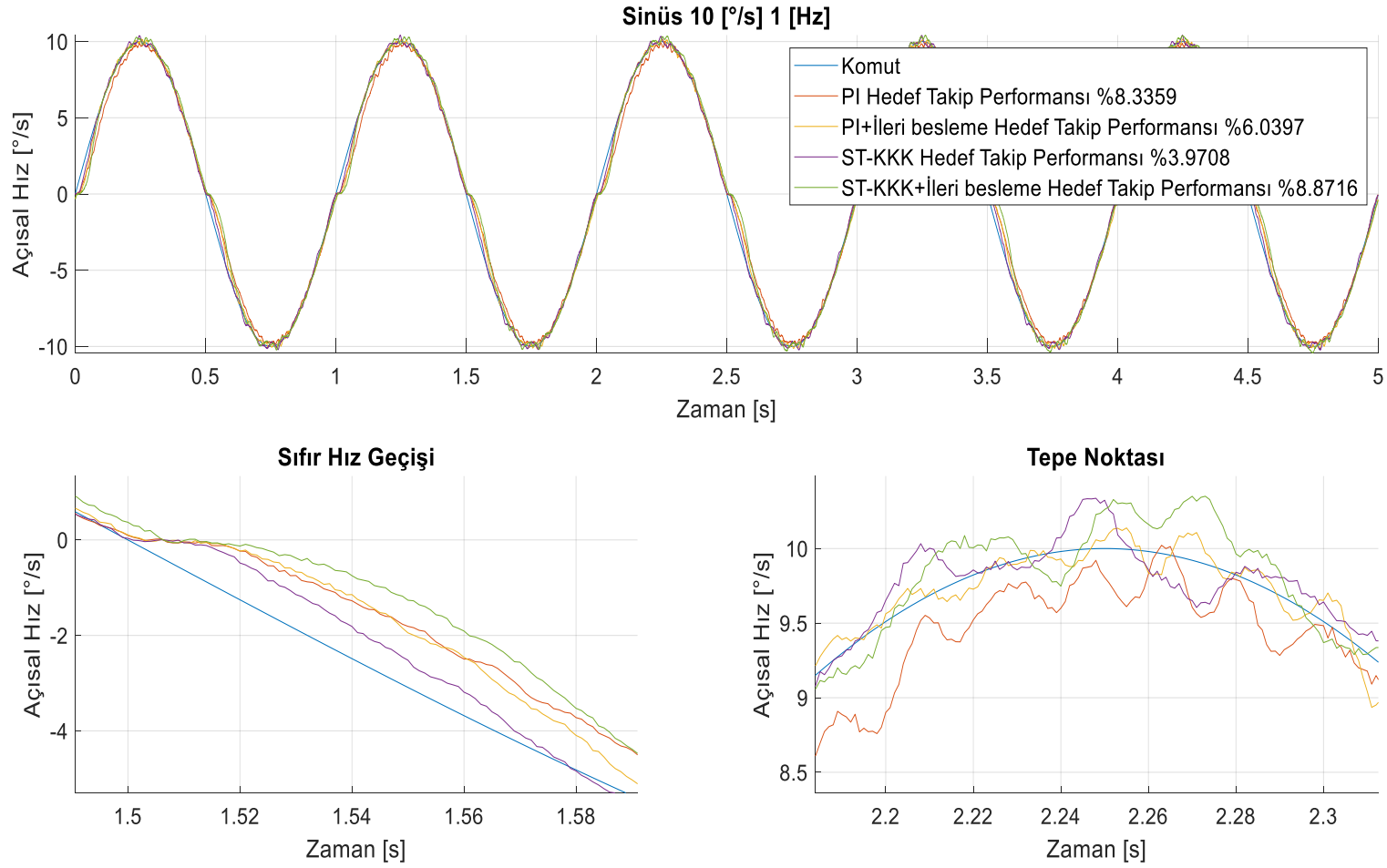
- ST-KKK kontrol algoritması kullanılarak uygulanan sinüs komutlarının sıfır geçişlerinde, tepe noktalarında ve hedef takip performanslarında diğer kontrol yöntemlerine göre üstünlük sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.3'te, farklı genliklere ve frekanslara sahip sinüs komut sinyalleri altında her bir kontrol algoritmasının hedef takip performansı sonuçları hem simülasyon ortamında hem de gerçek sistem üzerinde elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Nihai kontrolcü seçimi için, gerçek sistem üzerinde yapılan testler sonrasında yapılan değerlendirmeler:

- ST-KKK kontrol algoritmasının, adım komut sinyali karşısında gözlemlenen maksimum aşmasının %10'un üzerinde olması durumu, hedef takip performansı açısından tolere edilebilir bulunmuş ve bu durum kontrolcünün tercih edilmesini engellemiştir.



Şekil 4.3 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] adım girişine karşılık kontrolcülerin tepkisi.



Şekil 4.4 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık kontrol algoritmalarının performansları.

Çizelge 4.3 : Yükseliş ekseni simülasyon ve gerçek sistem hedef takip performansları.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Simülasyon Sonuçları				Gerçek Sistem Sonuçları			
			PI	PI+İleri besleme	ST-KKK	ST- KKK+İleri besleme	PI	PI+İleri besleme	ST-KKK	ST- KKK+İleri besleme
1	5	1	% 13.20	% 2.28	% 4.84	% 5.17	%15,95	%15,66	%6,85	%25,25
2	20	1	% 3.99	% 2.18	% 1.72	% 3.43	%4,41	%3,21	%2,28	%4,69
3	30	1	% 2.94	% 2.18	% 1.28	% 3.16	%3,00	%2,42	%1,56	%4,19
4	10	1	% 7.17	% 2.20	% 2.88	% 4.15	%8,34	%6,04	%3,97	%8,87
5	10	0.1	% 1.77	% 0.39	% 0.59	% 0.90	%2,69	%3,95	%2,13	%7,36
6	10	0.5	% 5.02	% 1.13	% 1.74	% 2.59	%6,03	%5,17	%3,09	%7,24
7	10	2	% 8.70	% 4.38	% 4.51	% 6.86	%10,52	%7,71	%5,00	%13,56
8	10	5	% 10.35	% 10.95	% 8.97	% 15.52	%12,13	%14,43	%10,00	%26,57

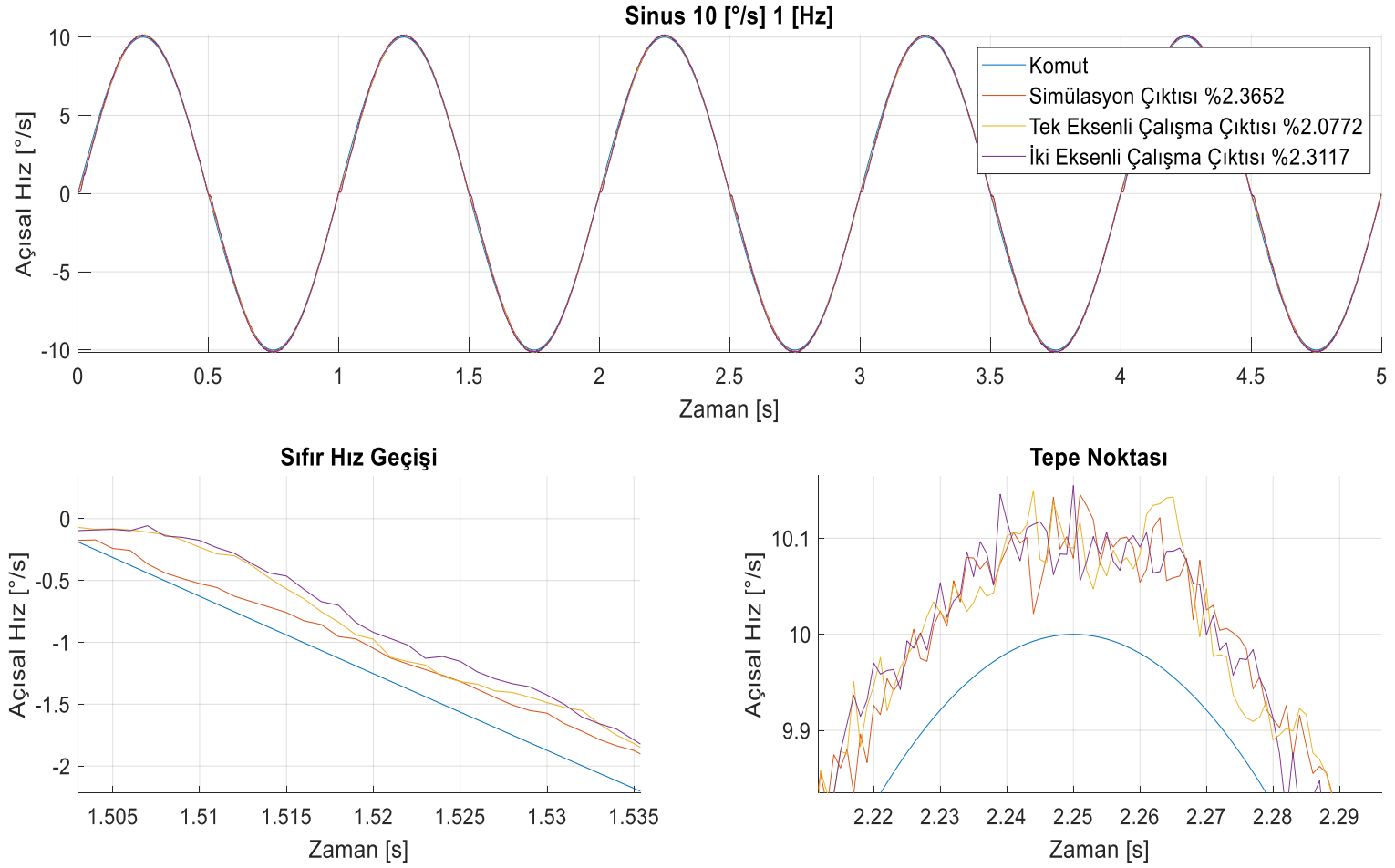
4.2 İki Eksenli Eş Zamanlı Çalışması Durumunda Performansı

Gimbal sistemlerindeki yanca ve yükseliş eksenleri teoride birbirinden bağımsız bir şekilde çalışacak gibi tasarlanmış olsa da, eşzamanlı olarak çalıştırıldıklarında eksenler arası dinamik bir etkileşim ortaya çıkmaktadır. Örneğin, yanca ekseninde gerçekleşen ani bir dönüş hareketi yükseliş eksenini kontrolcüsüne ilave yük bindirmekte ve kontrol performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, jiroskop sensörlerindeki açısal hız geri besleme sinyalleri de bu durumdan etkilenebilmektedir. Bu nedenlerle, gimbal sistemleri için geliştirilen kontrol algoritmalarının tasarımında çok eksenli dinamik etkileşimlerin dikkate alınması, stabilizasyon hassasiyeti ve hareket kontrol performansı açısından önemlidir. Simülasyon ve gerçek sistem üzerinde yapılacak karşılaştırmalı çalışmalarla kontrol algoritmalarının gürbüzlüğü değerlendirilebilmektedir.

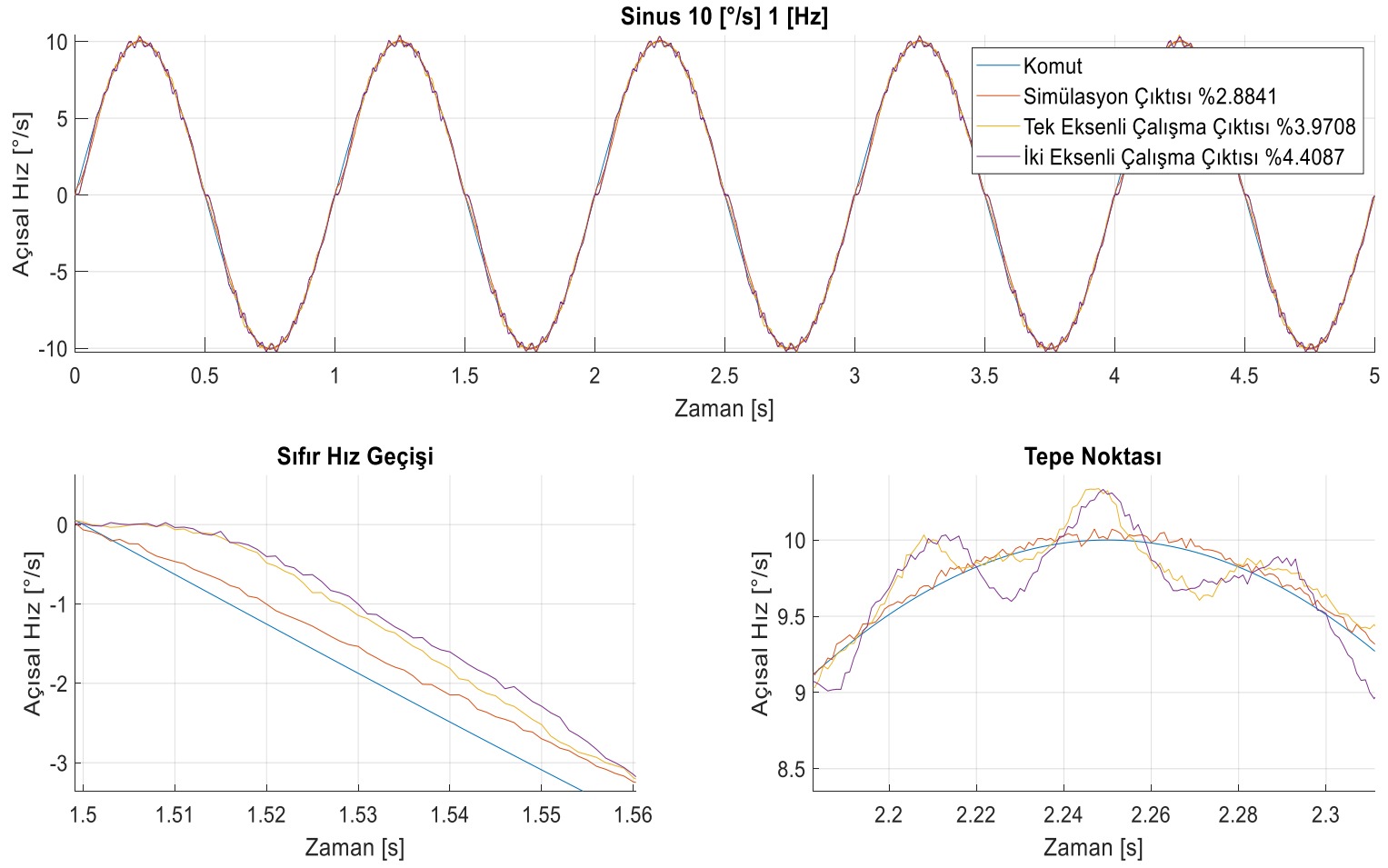
Gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerinin eş zamanlı olarak çalıştırılması durumunda, eksenler arasında oluşabilecek çapraz etkileşimler dikkate alınarak sistemin hareket kontrol performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar aracılığıyla her iki eksenin eşzamanlı hedef takibi altındaki dinamik davranışları analiz edilmiş ve eksenler arası etkileşimin kontrol algoritmalarının performansına etkisi ortaya konulmuştur. Yanca ve yükseliş eksenleri nihai kontrol algoritmaları, simülasyon modelinde ve gerçek sistem üzerinde tek eksenli ve iki eksenli çalışma durumları için karşılaştırılmıştır.

10 [deg/s] genlikli ve 1 [Hz] frekanslı bir sinüs dalgası hem yanca hem de yükseliş eksenine uygulanmıştır. Şekil 4.5'te yanca ve Şekil 4.6'da yükseliş eksenleri için gerçek sistemin tek ve iki eksenli çalışma durumlarındaki hedef takip performansları görülmektedir. Farklı genlik ve frekansa sahip sinüs komutları aynı test koşullarında yanca ve yükseliş eksenlerine uygulanmıştır. Çizelge 4.4'te tek ve iki eksenli çalışma durumu için hedef takip performansı değerleri bulunmaktadır. İki eksen aynı anda çalıştığında eksenler arasındaki etkileşimi olmakla birlikte, hedef takip performansında büyük bir fark yaratmadığı değerlendirilmiştir.

Gerçek sistem üzerinde yapılacak çalışmalar ile yanca ve yükseliş eksenlerinin eşzamanlı çalışması durumları ayrıca modellenerek simülasyon modeli ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar azaltılabilir. Ancak, bu ilave modelleme bu tez kapsamında uygulanmamıştır.



Şekil 4.5 : Yanca eksenli 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık tek ve iki eksenli çalışma performansı.



Şekil 4.6 : Yükseliş eksenini 10 [deg/s] genlik ve 1 [Hz] frekanslı sinüs girişine karşılık tek ve iki eksenli çalışma performansı.

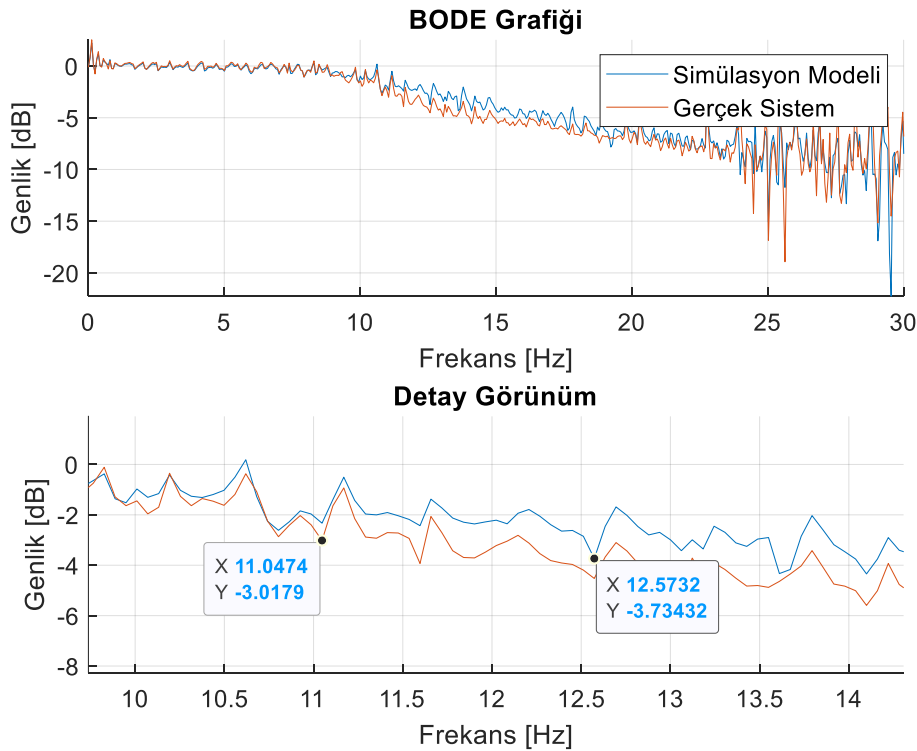
Çizelge 4.4 : Tek ve iki eksenli çalışma durumları için yanca ve yükseliş eksenleri cevapları.

Test No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Yanca Eksenli			Yükseliş Eksenli		
			Simülasyon Sonucu	Tek Eksenli Gerçek Sistem Sonuçları	İki Eksenli Gerçek Sistem Sonuçları	Simülasyon Sonucu	Tek Eksenli Gerçek Sistem Sonuçları	İki Eksenli Gerçek Sistem Sonuçları
1	5	1	% 4.05	% 4.03	% 4.52	% 4.84	% 6.85	% 7.23
2	20	1	% 1.60	% 1.29	% 1.42	% 1.72	% 2.28	% 2.17
3	30	1	% 1.39	% 1.08	% 1.19	% 1.28	% 1.56	% 1.61
4	10	1	% 2.37	% 2.08	% 2.31	% 2.88	% 3.97	% 4.40
5	10	0.1	% 0.56	% 0.62	% 0.66	% 0.59	% 2.13	% 2.77
6	10	0.5	% 1.51	% 1.43	% 1.60	% 1.74	% 3.09	% 3.27
7	10	2	% 4.43	% 3.58	% 4.11	% 4.51	% 4.99	% 5.39
8	10	5	% 10.31	% 8.10	% 11.10	% 8.97	% 10.00	% 10.05

4.3 Bant Genişliği Tespiti

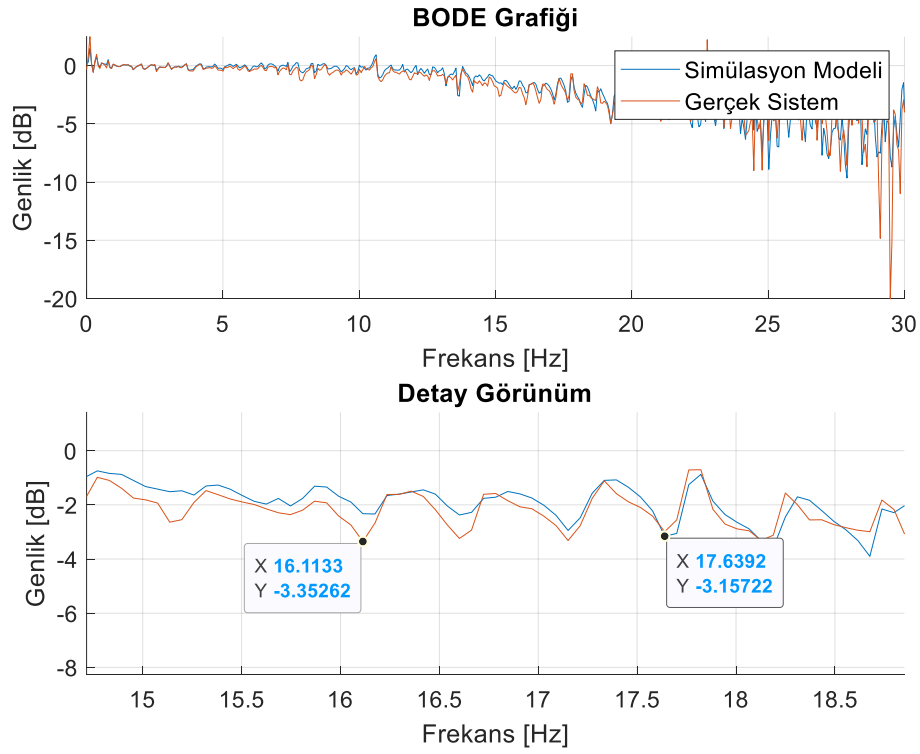
Bant genişliği, bir kontrol sisteminin giriş sinyalini önemli bir bozulma ya da kayıp yaşamadan belirli bir tolerans içinde işleyebildiği frekans aralığını ifade etmektedir. Bant genişliği yüksek olan sistemler genellikle daha hızlı tepki vermekte ve daha hassas kontrol sağlamaktadır. Giriş ve çıkış sinyalleri kullanılarak kontrol sisteminin bode grafikleri oluşturulur ve frekans-genlik grafiğindeki -3 [dB] genliğine karşılık gelen frekans değeri bant genişliği olarak kabul edilir. Gimbal sisteminin her bir eksenine 1 [Hz]'den 25 [Hz]'e kadar 0.25 [Hz] artışla oluşturulan Frekans Tarama sinyali uygulanmıştır. Sistem dinamiklerinin ortaya çıkarılması amacıyla her frekansın 4 defa tekrar etmesi sağlanmıştır. Kontrol algoritmalarının optimizasyonu sırasında kullanılan adım girişinin genliği olan 10 [deg/s] açısal hız Sine Sweep sinyalinin genliği olarak belirlenmiştir.

Gimbal sisteminin yanca eksenini için simülasyon modeli ve gerçek sistem kullanılarak bant genişliği tespit edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.7'de görüldüğü üzere simülasyon modelinin bant genişliği 12.57 [Hz] ve gerçek sistemin bant genişliği 11.04 [Hz]'dir. Simülasyon modelinin ve gerçek sistemi birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4.7 : Yanca eksenini bant genişliği simülasyon ve gerçek sistem cevapları.

Gimbal sisteminin yükseliş eksenini için simülasyon modeli ve gerçek sistem kullanılarak bant genişliği tespit edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.8’de görüldüğü üzere simülasyon modelinin bant genişliği 17.63 [Hz] ve gerçek sistemin bant genişliği 16.11 [Hz]’dir. Simülasyon modelinin ve gerçek sistemi birbirine yakın sonuçlar sergilediği görülmüştür.



Şekil 4.8 : Yükseliş eksenini bant genişliği simülasyon ve gerçek sistem cevapları.



5. STABİLİZASYON VE GÜRBÜZLÜK SİMÜLASYONLARI

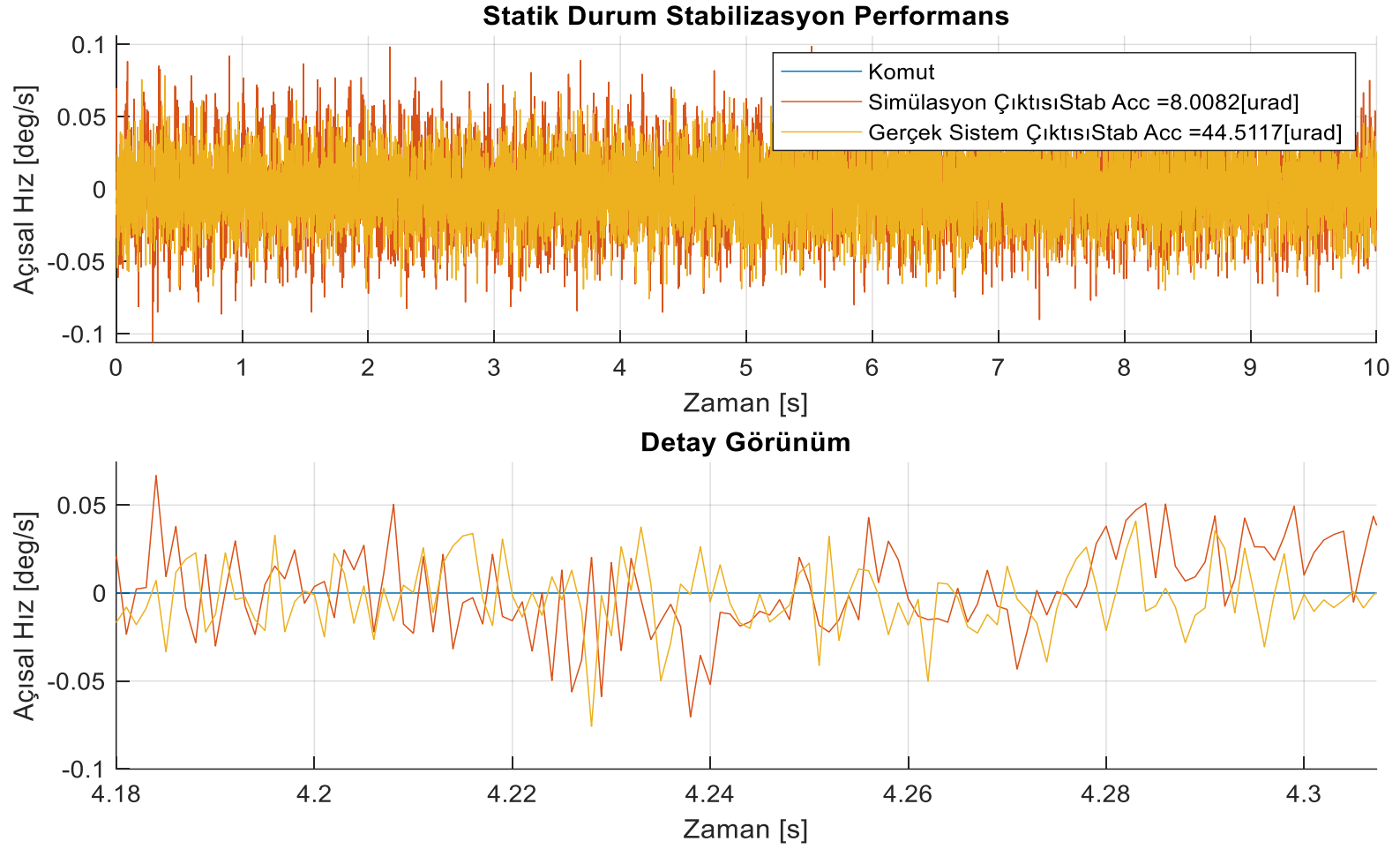
MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen yanca ve yükseliş eksenlerine ait dinamik modeller ile bu modellere entegre edilen kontrol algoritmalarını içeren simülasyon modeli yapısı kullanılarak, gimbal sisteminin stabilizasyon performansı ve gürbüzlük özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir.

5.1 Stabilizasyon Performansı Simülasyonları

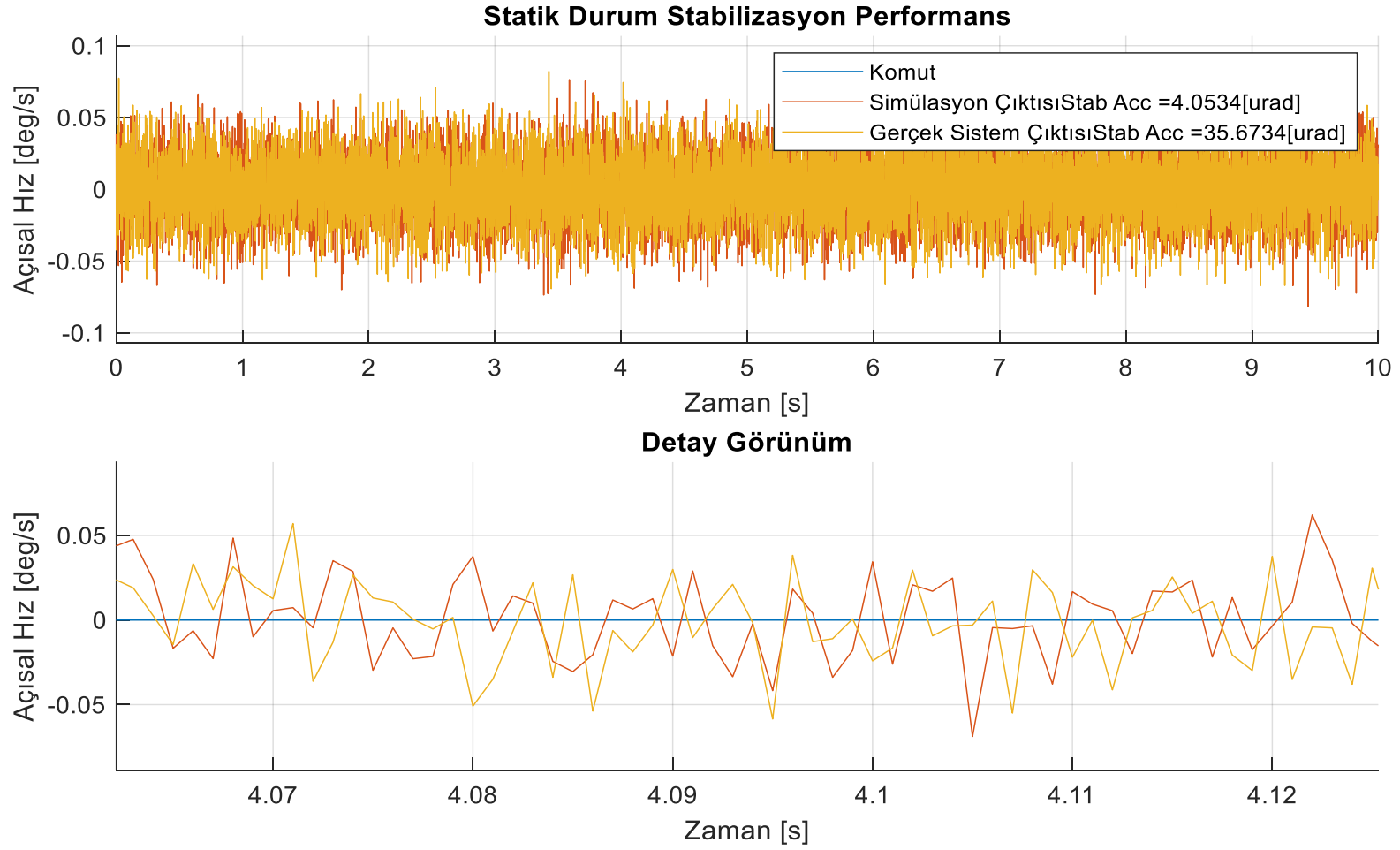
Gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenlerine ait stabilizasyon performanslarının hesaplanabilmesi amacıyla gimbal sistemi dinamik modelindeki açısal hız bozucu girişine farklı yol profilleri her eksen için ayrı ayrı uygulanmıştır. Gimbalin yanca ve yükseliş eksenlerine 0 [deg/s] açısal hız komutu verilerek bozucuların görüş hattı stabilizasyonu performansına etkisi hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan gimbal sistemi, hareketli bir platform veya test sistemi ile montajlanmadığı için sadece statik stabilizasyon performansı gerçek sistem üzerinde ölçülebilmektedir. APG ve Sinüs parkuru stabilizasyon testleri, simülasyon modeli kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

5.1.1 Statik durum stabilizasyon performansı

Gimbal sistemi, hareket etmeyen bir platformun üzerindeyken, statik durum senaryosu için stabilizasyon performansı hem gerçek sistem üzerinde hem de simülasyon modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Yanca ekseninin stabilizasyon performansı aşağıdaki Şekil 5.1’de gösterildiği gibi simülasyon modelinde 8 [μrad] ve gerçek sistem üzerinde 44 [μrad] olarak hesaplanmıştır. Yükseliş ekseninin stabilizasyon performansı aşağıdaki Şekil 5.2’de görülmek üzere simülasyon modelinde 4 [μrad] ve gerçek sistem üzerinde 35 [μrad] olarak hesaplanmıştır. Simülasyon modeli ve gerçek sistem üzerinde yapılan çalışmalarda stabilizasyon performansı değerlerinin aralarındaki farkın fiziksel karşılığı modelleme hataları, sistem toleransları, sensor hataları, kablo gerilimi ve çevresel etkiler olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1 : Yanca ekseni statik durum stabilizasyon performansı



Şekil 5.2 : Yükseliş eksenini statik durum stabilizasyon performansı.

5.1.2 APG parkuru stabilizasyon performansı

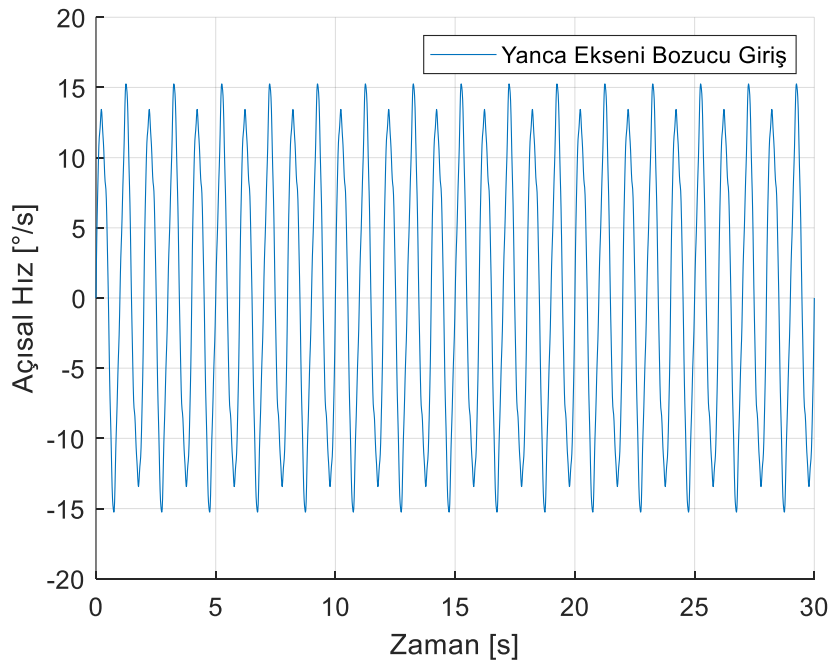
ITOP 3-2-836 standardında tanımlanan APG parkurunda araca ait gerçek yol profilleri mevcut olmadığı için bozucu etkileri temsil eden referans yol datası benzer bir çalışmada kullanılan veriler vasıtasıyla oluşturulmuştur.

APG parkurunun yanca eksenini üzerinde oluşturduğu bozucu etkilerin temsil edilebilmesi amacıyla, Çizelge 5.1’de verilen genlik ve frekans değerleri esas alınarak sinüs tabanlı bozucu sinyaller oluşturulmuş ve birleştirilmiştir.

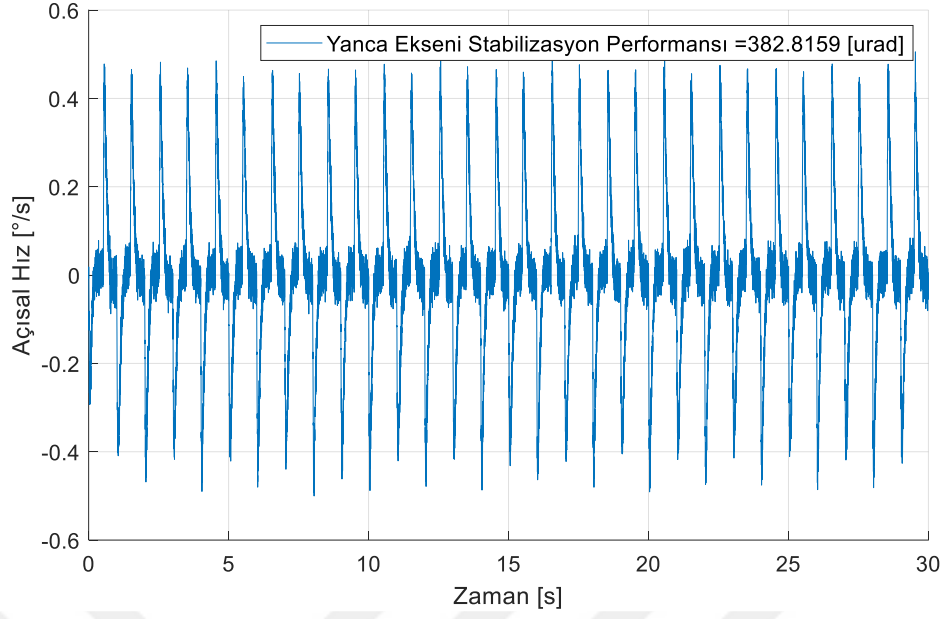
Çizelge 5.1 : APG parkuru yanca eksenine gelen bozucu sinyal temsili [52].

Veri No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]
1	13,64	1
2	1,60	2,5
3	0,48	5
4	0,24	10

Böylece, birleştirilen sinyal Şekil 5.3’te gösterilen sistem modeline açısal hız cinsinden uygulanan bozucu giriş olarak tanımlanmıştır. Bu bozucu giriş sinyalinin simülasyon ortamında uygulanması sonucunda, yanca eksenini için kullanılan kontrol algoritmasının sağladığı stabilizasyon performansı simülasyon ortamında Şekil 5.4’te görüldüğü üzere 382.8 [μrad] olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.3 : Temsili APG parkuru yanca eksenine gelen bozucu sinyal grafiği.



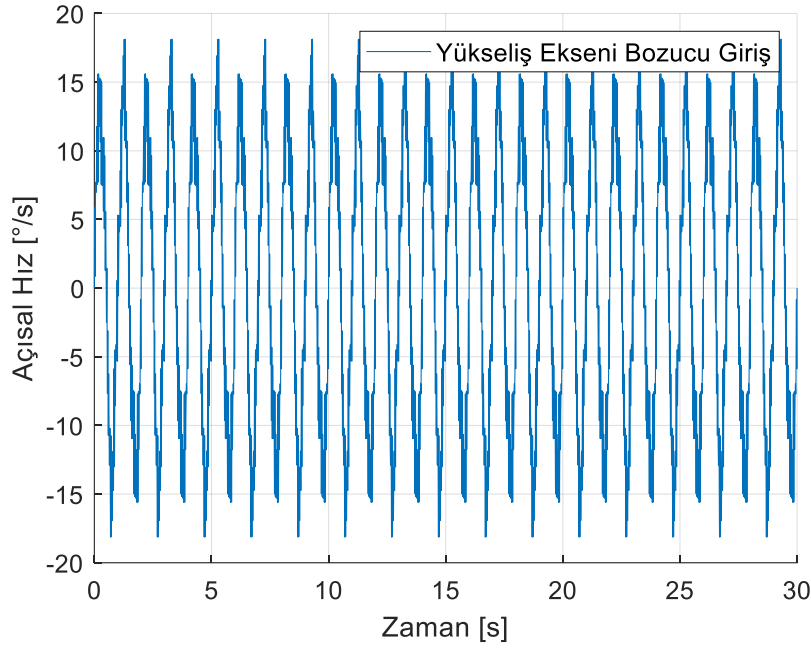
Şekil 5.4 : Temsili APG parkuru yanca eksen stabilizasyon performansı.

APG parkurunun yükseliş ekseninde oluşturduğu bozucu etkilerin temsil edilebilmesi amacıyla, Çizelge 5.2’de sunulan genlik ve frekans değerleri esas alınarak sinüs tabanlı bozucu sinyaller oluşturulmuş ve birleştirilmiştir.

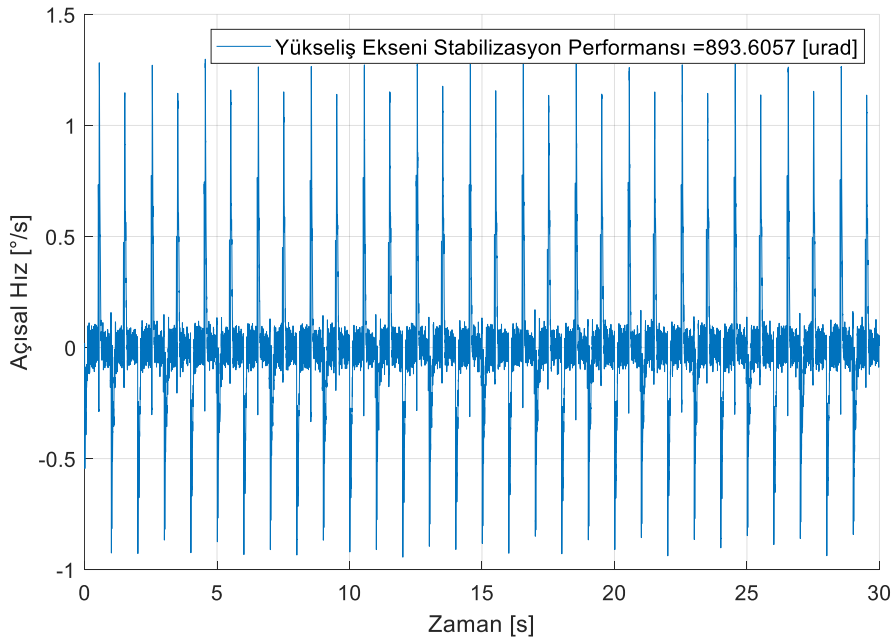
Çizelge 5.2 : APG parkuru yükseliş eksenine gelen bozucu sinyal temsili.

Veri No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]
1	13,64	1
2	1,60	2,5
3	0,48	5
4	0,24	10
5	0,70	17
6	2,58	23
7	1,20	30
8	0,16	40

Böylece, birleştirilen sinyal Şekil 5.5'te gösterilen sistem modeline açısal hız cinsinden uygulanan bozucu giriş olarak tanımlanmıştır. Bu bozucu giriş sinyalinin simülasyon ortamında uygulanması sonucunda, yükseliş eksenine için kullanılan kontrol algoritmasının sağladığı stabilizasyon performansı Şekil 5.6'da görüldüğü üzere 893.6 $[\mu\text{rad}]$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.5 : Temsili APG parkuru yükseliş eksenine gelen bozucu sinyal grafiği.



Şekil 5.6 : Temsili APG parkuru yükseliş eksenine stabilizasyon performansı.

5.1.3 Sinüs parkuru stabilizasyon performansı

ITOP 3-2-836 standartında tanımlanan Sinüs parkurunda araca ait gerçek yol profilleri mevcut olmadığı için bozucu etkileri temsil eden referans yol datası yerine farklı frekanslardaki sinüs dalgaları ayrı ayrı bozucu etki olarak uygulanmıştır. Çizelge 5.3'te bozucu giriş olarak uygulanan giriş sinyalleri ve her bir eksenin stabilizasyon performansı değerleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.3 : Bozucu olarak uygulanan farklı sinüs sinyalleri altında stabilizasyon performansı.

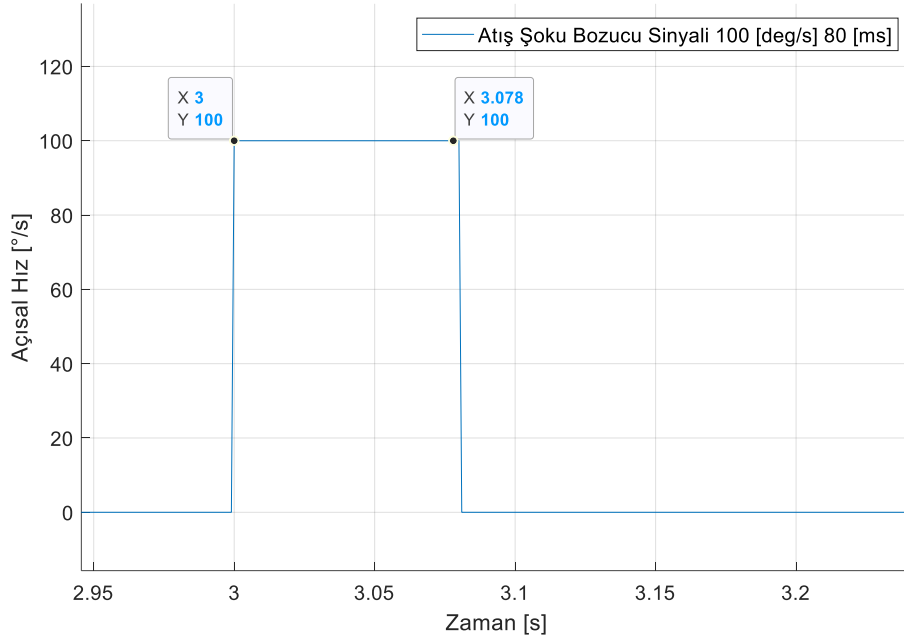
Veri No	Genlik [deg/s]	Frekans [Hz]	Yanca Stabilizasyon Doğruluğu [μrad]	Yükseliş Stabilizasyon Doğruluğu [μrad]
1	10	0,1	405	388
2	10	0,25	393	379
3	10	0,5	392	396
4	10	1	371	419
5	10	2	318	535

5.2 Atış Şoku Kontrol Performansı Simülasyonu

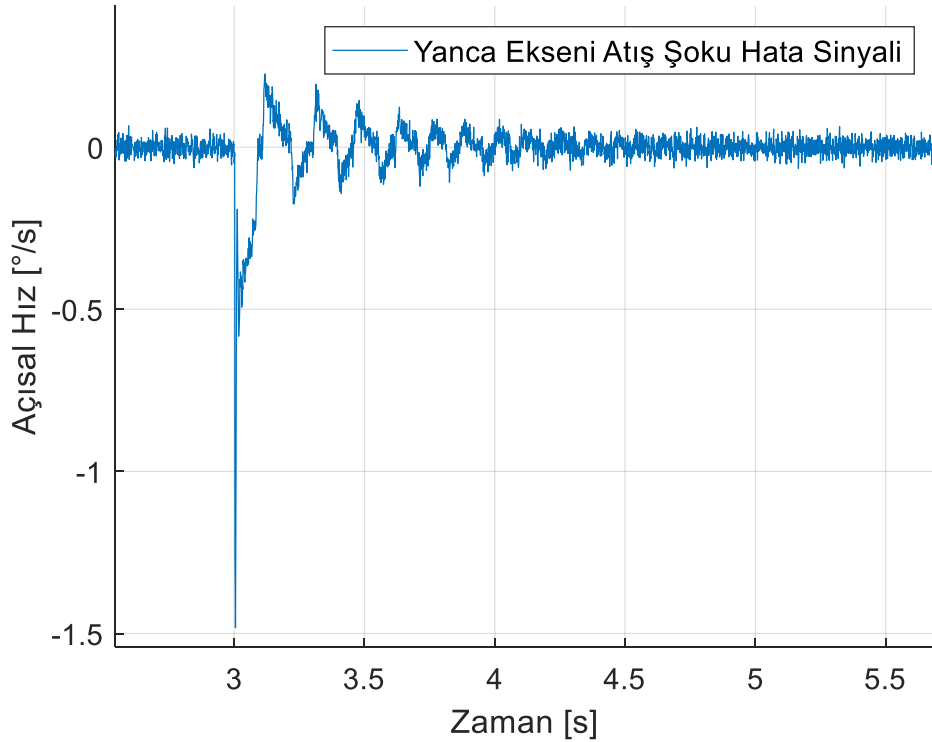
Gimbal sistemi, entegre edildiği askeri platformda gerçekleştirilen atışlar sonrasında, yanca ve yükseliş eksenlerinde ortaya çıkan bozucu etkileri hızlı bir şekilde bastırarak bir sonraki atış için gerekli olan stabilizasyon ve hareket kontrol performansını yeniden sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Gerçek sisteme ait atış şoku verisi mevcut olmadığından, bu çalışmada literatür araştırmaları sonucunda elde edilen atış şoku verileri esas alınmıştır. Bu kapsamda, Şekil 5.7'deki gimbal sisteminin her iki eksenine de atış sonrasında 80 [ms] süresince 100 [deg/s] büyüklüğünde açısal hız bozucu sinyali uygulandığı varsayılmıştır [9,10]. Simülasyon ortamında elde edilen açısal hız-zaman grafikleri incelendiğinde, atış şoku sonrasında gimbal eksenlerinde oluşan titreşimlerin etkili bir şekilde bastırıldığı zaman ile atış şokunun başladığı zaman arasındaki süre, sistemin atış şoku titreşimlerini bastırma süresi olarak tanımlanmıştır.

Yanca eksenine uygulanan atış şoku sonrasında kontrol algoritması Şekil 5.8'de görüldüğü üzere yaklaşık 2 [s] içinde titreşimleri bastırarak bir sonraki atışa hazır hale

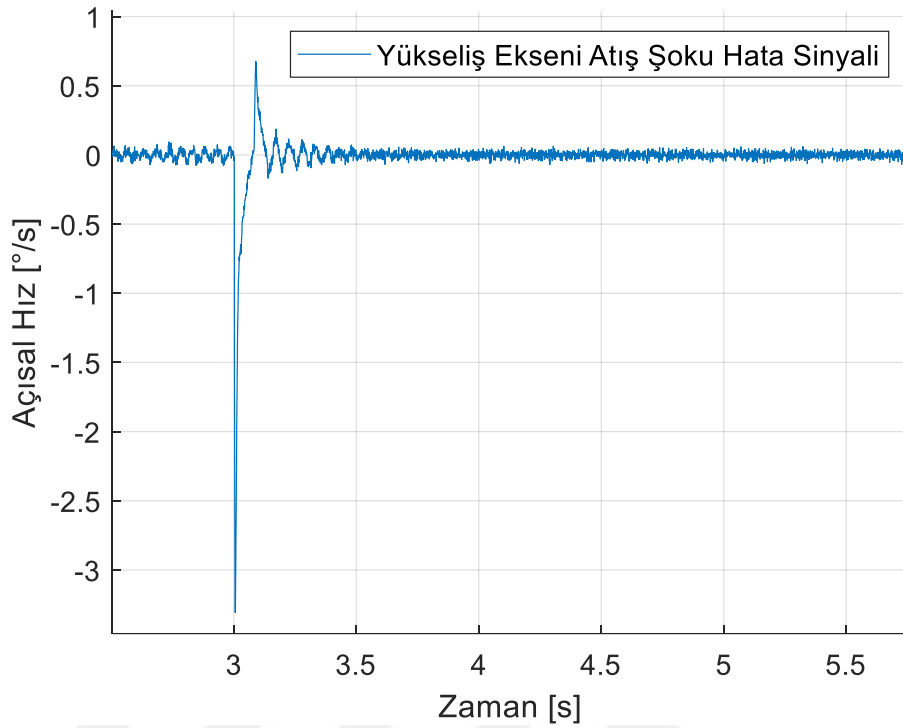
gelmiştir. Yükseliş eksenine uygulanan atış şoku sonrasında kontrol algoritması Şekil 5.9'da görüldüğü üzere yaklaşık 0.5 [s] içinde titreşimleri bastırarak bir sonraki atışa hazır hale gelmiştir.



Şekil 5.7 : Tanımlanan atış şoku açısai hız-zaman grafiğı.



Şekil 5.8 : Yanca eksenii atış şoku titreşim bastırma performansı.



Şekil 5.9 : Yükseliş eksenini atış şoku titreşim bastırma performansı.

5.3 Monte Carlo ile Kontrolcü Gürbüzlük Analizleri

Kontrol sistemlerinde gürbüzlük, sistem modelinin belirsizliklerine, modelleme hatalarına ve model parametrelerinde zaman içinde olabilecek değişimlere karşı kontrol algoritmasının belirli bir hata içinde performans göstermesi ve kararlılığını koruması yeteneğidir. Kontrolcü parametreleri, gürbüzlüğü garanti edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Gimbal sistemi mekanizması incelendiğinde, gürbüzlüğü etkileyebilecek en önemli faktörün sürtünme fenomeni olduğu değerlendirilmiştir. Çünkü, gimbal sistemi işletme ömrü boyunca kütle, atalet momenti, kütle dengesizliği ve sensör karakteristikleri sabit kalırken; sürtünme karakteristikleri, zamanla sıcaklık değişimleri, mekanik aşınma, yağlayıcıların özelliklerinin değişmesi ve imalat toleranslarından kaynaklanan varyasyonlar nedeniyle önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Bu durum, özellikle düşük hızlarda çalışan gimbal sistemlerinde, statik sürtünme ve stick-slip etkilerinin belirginleşmesine ve sistemin dinamik davranışında sapmalara neden olabilir. Bu nedenle, sürtünme parametrelerinin değişimine karşı dayanıklı bir kontrolcü tasarımı, gimbal sisteminin gürbüzlüğüne sağlamak açısından kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

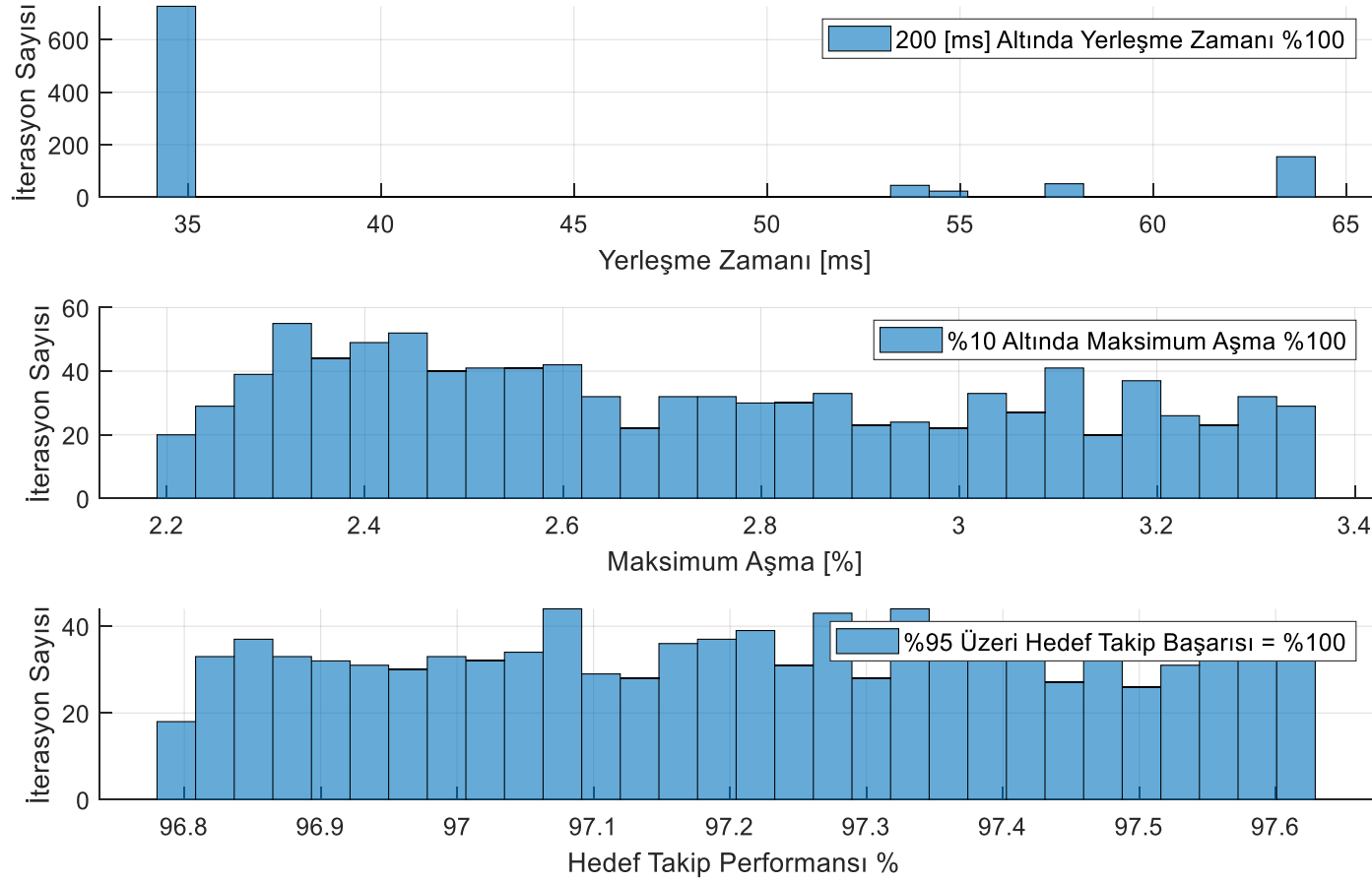
Bu çalışmada, gimbal sisteminin yanca ve yükseliş eksenleri için seçilen kazançlara sahip farklı kontrol yöntemlerinin sistem gürbüzlüğüne olan etkisi incelenmiştir. Eksenlerin sürtünme modellerine ait parametreleri, yanca eksenini için $\pm\%20$ ve yükseliş eksenini için $\pm\%10$ toleransla rastgele varyasyona uğratarak her bir kontrol algoritması için Monte Carlo benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler kapsamında, her bir varyasyon senaryosu için sistemin kararlılığı ve temel performans ölçütleri (yerleşme süresi, aşım miktarı, hedef takip performansı) değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kontrol algoritmalarının sürtünme parametresindeki belirsizliklere karşı gösterdiği dayanıklılığı nicel olarak ortaya koymuş ve karşılaştırmalı bir gürbüzlük değerlendirmesi yapılmasına olanak sağlamıştır.

Gürbüzlük analizi için giriş sinyali olarak 10 [deg/s] adım girişi ve 1 [Hz] frekanslı 10 [deg/s] genlikli bir sinüs dalgası uygulanmıştır. Kontrol algoritmaları; yerleşme zamanı, maksimum aşım ve hedef takip performansı bakımından karşılaştırılmıştır. Monte Carlo analizi her test için 1000 simülasyondan oluşmaktadır. Simülasyon sayısının 1000 olarak seçilmesinin nedeni, istatistiksel olarak elde edilen sonuçların anlamlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak ve hesaplama süresi maliyeti arasında denge kurmaktır.

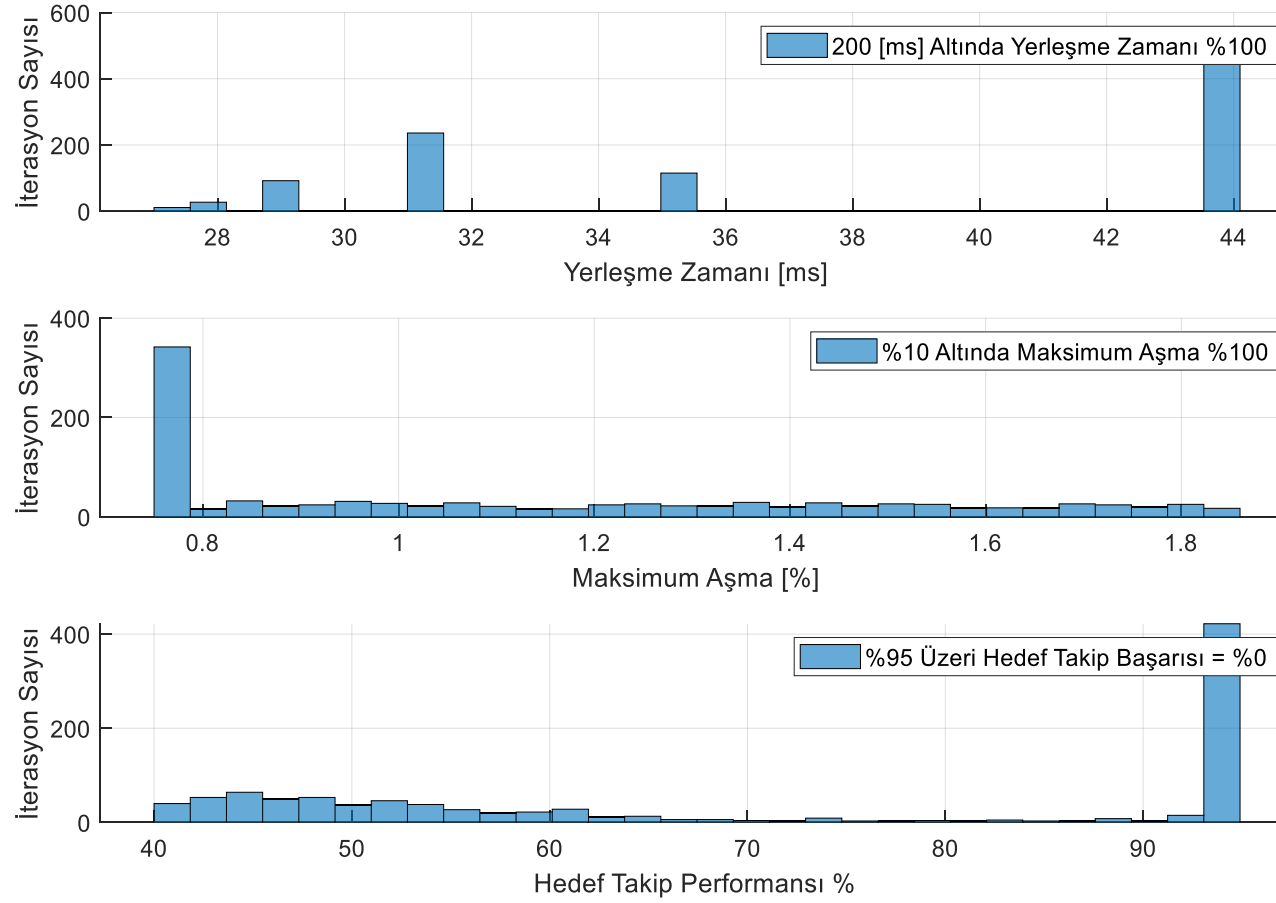
Şekil 5.10'da yanca eksenini için yapılan Monte Carlo simülasyonları sonuçları görülmektedir. Tasarlanan kontrol algoritması; tüm simülasyonlarda 200 [ms] yerleşme zamanı ve $\%10$ 'un altındaki maksimum aşım isterlerini karşılamaktadır. Hedef takip performansı ise tüm simülasyonlarda $\%90$ 'ın üzerindedir.

Şekil 5.11'de yükseliş eksenini için yapılan Monte Carlo simülasyonları sonuçları görülmektedir. Tasarlanan kontrol algoritması; tüm simülasyonlarda 200 [ms] yerleşme zamanı ve $\%10$ 'un altındaki maksimum aşım isterlerini karşılamaktadır. Hedef takip performansı ise simülasyonların büyük çoğunluğunda $\%90$ üzerindedir.

Yanca ve yükseliş eksenleri için tasarlanan kontrol algoritmalarının, Monte Carlo simülasyonlarına sonucunda değişen sürtünme koşullarına göre yeterli gürbüzlüğü sağladığı görülmektedir. Bu bulgular ve değerlendirmeler sonucunda, MATLAB/Simulink ortamında koşulan simülasyonlarla sonucunda önerilen kontrol algoritması yapısının ve kazançlarının, gimbal sistemindeki değişken parametre belirsizlikleri ve doğrusal olmayan etkiler altında bile kararlı ve güvenilir performans sergilediği görülmüştür.



Şekil 5.10 : Yanca eksenli Monte Carlo analizleri.



Şekil 5.11 : Yükseliş eksenli Monte Carlo analizleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, askeri bir kara aracına entegre edilmek üzere tasarlanan iki serbestlik dereceli bir gimbal sisteminin dinamik modelinin oluşturulması ve kontrol algoritmalarının tasarlanması gerçekleştirilmiştir.

Modelleme ve sistem tanılama kapsamında, öncelikle sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modelleri oluşturulmuştur. Gimbal sisteminin transfer fonksiyonu, tork sabiti, atalet ve viskoz sürtünme katsayısından oluşacak şekilde sadeleştirilerek tek giriş-tek çıkışlı bir yapı biçiminde modellenmiştir. Giriş olarak motora uygulanan akım komutu ve çıkış olarak jiroskoptan alınan açısal hız geri besleme verileri kullanılmıştır. Sistem tanılama yapılarak transfer fonksiyonundaki bilinmeyen parametreler hesaplanmıştır. Sistem tanılama için Süprüntü, PRBS ve Frekans tarama uyarıcı sinyalleri kullanılmış ve en başarılı sonuçlar Frekans Tarama sinyali uygulandığında alınmıştır. LuGre sürtünme, kütle dengesizliği ve jiroskop modelleri ile doğrusal modelin atalet değeri kullanılarak doğrusal olmayan dinamik model elde edilmiştir. Sistem tanılama sırasında gerçek sisteme uygulanan her test doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modele de simülasyon ortamında uygulanmıştır. Modellerin gerçek sistemle olan benzerliği için yapılan hesaplamalar sonucunda; doğrusal dinamik model tasarlandığı test koşullarında başarılı olurken, doğrusal olmayan dinamik model diğer test koşullarında da başarılı olarak sistemin nihai modeli olarak seçilmiştir.

Kontrolcü tasarımları kapsamında; PI, PI+İleri besleme, ST-KKK ve ST-KKK+İleri besleme kontrol algoritmaları kullanılmış ve kazançları IAE, ISE, ITAE ve ITSE amaç fonksiyonlarına göre Genetik Algoritma ile optimize edilmiştir. Her kontrol algoritmasının performansları farklı test koşullarında simülasyon ortamında hesaplanmış ve en başarılı olanlar seçilmiştir. Seçilen kazançlara sahip kontrol algoritmaları gerçek sistem üzerinde simülasyon ortamındaki test koşullarında denenmiştir. Yanca ve yükseliş eksenleri için en başarılı olan kontrol algoritması nihai olarak seçilmiştir.

Eksenler arası etkileşimin incelenmesi için, her eksen için seçilen kontrol algoritmaları gerçek sistem üzerinde hem tek hem de iki eksenli olacak şekilde farklı test koşullarında çalıştırılmıştır. İki eksenli hareketin hedef takip performansını büyük ölçüde değiştirmediği sonucuna ulaşılmıştır.

Bant genişliği için Frekans Tarama sinyali hem simülasyon hem de gerçek sistem üzerine her eksene ayrı ayrı uygulanmıştır. Simülasyon ve gerçek sistem bant genişliği cevaplarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Hedef bant genişliği isteri sağlanmıştır.

Gimbal sistemi, hareketsiz duran bir platformun üzerindeyken her iki eksenine de 0 [deg/s] açısal hız komutu uygulanmıştır. Statik durum stabilizasyon performansı yanca ekseni için simülasyon modelinde ~ 8 [μ rad] ve gerçek sistem üzerinde ~ 44 [μ rad]; yükseliş ekseni için simülasyon modelinde ~ 4 [μ rad] ve gerçek sistem üzerinde ~ 35 [μ rad] olarak hesaplanmıştır. Aradaki farkın fiziksel karşılığı, modelleme hataları, sistem toleransları, sensor hataları, kablo gerilimi ve çevresel etkiler olarak değerlendirilmiştir.

Monte Carlo simülasyonları ile sürtünme modeli parametrelerindeki belirsizliklerle yapılan analizler sonucunda tasarlanan kontrol algoritmalarının gürbüzlüklerinin yeterli performansta olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışmasında, gerçek dünya dinamikleri başarılı bir şekilde modellenerek gimbal sistemine ait simülasyon modeli geliştirilmiştir. Simülasyon ortamında Genetik Algoritma ile tasarlanan farklı kontrol algoritmaları gerçek sistem üzerinde denenerek performans isterlerini sağlayan nihai kontrol algoritması seçilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<https://www.bmc.com.tr/>>, erişim tarihi 25.05.2025.
- [2] **Url-2** <<https://www.leonardodrs.com/>>, erişim tarihi 25.05.2025.
- [3] **Url-3** <<https://www.safran-group.com/>>, erişim tarihi 25.05.2025.
- [4] **Hilkert, J. M.** (2008). Inertially stabilized platform technology concepts and principles. *IEEE control systems magazine*, 28(1), 26-46.
- [5] **Lee, D. H., Tran, D. Q., Kim, Y. B., & Chakir, S.** (2020). A robust double active control system design for disturbance suppression of a two-axis gimbal system. *Electronics*, 9(10), 1638.
- [6] **U.S. Army Test and Evaluation Command** (2000). *International test operations procedure 3-2-836.1.3.2.2: Combat vehicle fire control systems Gun/turret drive systems- Stabilization*. Aberdeen Proving Ground, MD.
- [7] **Bayram, H.** (2016). Altı serbestlik dereceli elektromekanik hareket simülöründe 6x9 matris yöntemine göre iterasyon. *Sakarya University Journal of Science (SAUJS)/Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2).
- [8] **Url-4** <<https://www.moog.co.uk/>>, erişim tarihi 25.05.2025.
- [9] **Tvarozek, J., & Gullerova, M.** (2012). Increasing firing accuracy of 2A46 tank cannon built-in T-72 MBT. *American International Journal of Contemporary Research*, 2(9), 140-156.
- [10] **Wiśniewski, A., Hryciów, Z., & Rybak, P.** (2019). Numerical investigation of dynamic loads of vehicle hull during firing. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2078, No. 1). AIP Publishing.
- [11] **Altan, A., & Hacıoğlu, R.** (2020). Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106548.
- [12] **Özçelik, M., Kürkçü, B., & Bayraktaroğlu, Z. Y.** (2022). Modelling and simulation of 2 dof gimbal system with experimental system identification. In *2022 10th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 508-515). IEEE.
- [13] **Özdoğan, G., & Leblebicioğlu, K.** (2016). Frequency response function measurement and parametric SISO system modelling of a gyro-stabilized infrared electro optic gimbal system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38(5), 512-528.
- [14] **Raju, N. S.** (2014). System identification and Robust control for a Stabilization system of a two-axis gimbale sensor. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(1), 922-927.

- [15] **Ashok Kumar, M., & Kanthalakshmi, S.** (2022). H_{∞} Control law for line of sight stabilization in two-axis gimbal system. *Journal of Vibration and Control*, 28(1-2), 182-191.
- [16] **Osamah, A. E., Hassrizal, H. B., & Othman, S. M.** (2023). Modeling a new Gimbal System using Nonlinear ARX (NARX) Model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2641, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- [17] **Sisu, S., Poyrazoğlu, E., & Kalkan, M.** (2023). LuGre sürtünme giderme yönteminin ataletsel stabilize elektro-optik sistemlerde kontrol performansına etkisi. *24. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK 2023*. Türkiye.
- [18] **Olsson, H., Åström, K. J., De Wit, C. C., Gäfvert, M., & Lischinsky, P.** (1998). Friction models and friction compensation. *Eur. J. Control*, 4(3), 176-195.
- [19] **Sincar, E., Balkan, T., & Platin, B. E.** (2015, July). Compensation of friction effects in gyro-stabilized motion platforms. In *2015 American Control Conference (ACC)* (pp. 3242-3248). IEEE.
- [20] **Yang, H., Zhao, Y., Li, M., & Zhou, Y. J.** (2016). Study on the friction torque test and identification algorithm for gimbal axis of an inertial stabilized platform. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 230(10), 1990-1999.
- [21] **Mashayekhi, A., Behbahani, S., Nahvi, A., Keshmiri, M., & Shakeri, M.** (2022). Analytical describing function of LuGre friction model. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 6(3), 437-448.
- [22] **Yang, H., Zhao, Y., Li, M., & Wu, F.** (2015). The static unbalance analysis and its measurement system for gimbals axes of an inertial stabilization platform. *Metrology and measurement systems*, 22(1), 51-68.
- [23] **Abdo, M., Vali, A. R., Toloei, A., & Arvan, M. R.** (2013). Research on the cross-coupling of a two axes gimbal system with dynamic unbalance. *International Journal of advanced robotic systems*, 10(10), 357.
- [24] **Baskin, M., & Leblebicioğlu, M. K.** (2017). Robust control for line-of-sight stabilization of a two-axis gimbal system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(5), 3839-3853.
- [25] **Jia, R., Nandikolla, V. K., Haggart, G., Volk, C., & Tazartes, D.** (2017). System performance of an inertially stabilized gimbal platform with friction, resonance, and vibration effects. *Journal of Nonlinear Dynamics*, 2017(1), 6594861.
- [26] **Ahmad, M. H., Osman, K., Zakeri, M. F. M., & Samsudin, S. I.** (2021, March). Mathematical modelling and PID controller design for two DOF gimbal system. In *2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)* (pp. 138-143). IEEE.

- [27] **Sharma, J., Hote, Y. V., & Prasad, R.** (2020). Robust PID control of single-axis gimbal actuator via stability boundary locus. *IFAC-PapersOnLine*, 53(1), 27-32.
- [28] **Singh, A., Chatterjee, S., & Thakur, R.** (2014). Design of tracking of moving target using PID controller. *Int. J. Eng. Trends Technol.*, 15, 403-406.
- [29] **Rajesh, R. J., & Kavitha, P.** (2015, September). Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms. In *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)* (pp. 1-6). IEEE.
- [30] **Utkin, V. I.** (1993). Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 40(1), 23.
- [31] **Furat, M., & Eker, İ.** (2012). Experimental evaluation of sliding-mode control techniques. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 23-37.
- [32] **Smith, B. J., Schrenk, W. J., Gass, W. B., & Shtessel, Y. B.** (1999, March). Sliding mode control in a two-axis gimbal system. In *1999 IEEE aerospace conference. Proceedings (Cat. No. 99TH8403)* (Vol. 5, pp. 457-470). IEEE.
- [33] **Espinosa, C., Mayen, K., Lizarraga, M., Romero, S. S. H., & Lozano, R.** (2015, November). Sliding mode line-of-sight stabilization of a two-axes gimbal system. In *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)* (pp. 431-438). IEEE.
- [34] **Utkin, V., & Lee, H.** (2006, June). Chattering problem in sliding mode control systems. In *International Workshop on Variable Structure Systems, 2006. VSS'06.* (pp. 346-350). IEEE.
- [35] **Rivera, J., Garcia, L., Mora, C., Raygoza, J. J., & Ortega, S.** (2011). Super-twisting sliding mode in motion control systems. *Sliding mode control*, 1, 237-254.
- [36] **Su, Y., Yang, Z., Sun, X., & Shen, Z.** (2024). Direct torque control of bearingless induction motor based on super-twisting sliding mode control. *Journal of Control and Decision*, 1-11.
- [37] **Büyüksarıkulak, M. S.** İki Eksen Gimbal Sistemleri için Farklı Bozucu Kaynaklarının Stabilizasyon Performansına Etkileri. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'2016*. Türkiye.
- [38] **Nawrocki, R.** (2021). Unified model of disturbances acting upon gimbal seeker in anti-tank guided missile. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 54-69.
- [39] **Guc, A. F., Yumrukcal, Z., & Ozcan, O.** (2020). Nonlinear identification and optimal feedforward friction compensation for a motion platform. *Mechatronics*, 71, 102408.
- [40] **Li, B., Xie, X., Yu, B., Liao, Y., & Fan, D.** (2024). High-precision velocity control of direct-drive systems based on friction compensation. *Mechanical Sciences*, 15(1), 385-394.

- [41] **Ucun, L., & Salásek, J.** (2014). HOSIDF-based feedforward friction compensation in low-velocity motion control systems. *Mechatronics*, 24(2), 118-127.
- [42] **Mirzal, A., Yoshii, S., & Furukawa, M.** (2012). PID parameters optimization by using genetic algorithm. *arXiv preprint arXiv:1204.0885*.
- [43] **Sergio, M., Carlos, J., Irma, M., & Ramón, J.** (2021, November). Pi controller tuning using genetic algorithm. In *2021 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)* (pp. 15-19). IEEE.
- [44] **Ortatepe, Z.** (2023). Genetic algorithm based PID tuning software design and implementation for a DC motor control system. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 10(3), 286-300.
- [45] **Ray, L. R., & Stengel, R. F.** (1993). A Monte Carlo approach to the analysis of control system robustness. *Automatica*, 29(1), 229-236.
- [46] **Jones, T.** (2003, July). Evaluation of the X-43A scramjet engine controller performance by Monte Carlo technique. In *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit* (p. 5192).
- [47] **Korkmaz, M. T.** (2020). *Stabilize kamera platformlarının dinamik modellenmesi, kontrol sistemi tasarımı ve optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (642270).
- [48] **Çetinyol, E.** (2023). *Performance of fractional order controllers for two axis gimbal system* (Master's thesis, Istanbul Technical University). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (895445).
- [49] **Eroğlu, H.** (2023). Comparative analysis of PI, LQR, and gain scheduled super twisting sliding mode controllers for gimbal system (Master's thesis, Istanbul Technical University). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (894549).
- [50] **Tezgelen, O.** (2020). İki Eksen Gimbal Sistemleri için Gürbüz Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Master's thesis, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (641187).
- [51] **Dai, S., Li, S., Ji, W., Wang, R., & Liu, S.** (2023). Adaptive friction compensation control of robotic pneumatic end-effector based on LuGre model. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 50(5), 848-860.
- [52] **Karaca, C.** (2010). *Modelling, controlling and real time system implementation of a hexapod platform* (Master's thesis, Istanbul Technical University). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (291962).
- [53] **Şeref, T.** (2018). *Dynamic Modelling And Control Of A Gimballed Airborne Antenna Platform With Mass Unbalance And Friction* (Master's thesis, Middle East Technical University). YÖK Ulusal Tez Merkezi, (527284).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Batuhan KALKAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 07/2020 – 03/2021, MVD Makine Sanayi A.Ş., Arge Mühendisi
- 03/2021 – 05/2022, Mert Teknik Fabrika Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş., Arge Mühendisi
- 05/2022 – 07/2024, BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Uzman Elektromekanik Kontrol Tasarım Mühendisi
- 08/2024 – Günümüz, BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kıdemli Silah Sistemleri Test Uzman Mühendisi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kalkan B.**, Kural A. 2025. Nonlinear System Identification of a 2-DOF Gimbal System, 4th *International Graduate Research Symposium*, May 12-14, 2025 Istanbul, Turkey