

**TESTING AND COMPARISON OF DIFFERENT CONTROL
METHODS ON A GIMBAL SYSTEM**

**FARKLI DENETİM YÖNTEMLERİNİN BİR GİMBAL
SİSTEMİ ÜZERİNDE SINANMASI VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

MUHARREM MANDACI

DR. ŞÖLEN KUMBAY YILDIZ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

Yüksek Lisans Tezi

olarak hazırlanmıştır.

Ekim 2023

ÖZET

FARKLI DENETİM YÖNTEMLERİNİN BİR GİMBAL SİSTEMİ ÜZERİNDE SINANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

Muharrem MANDACI

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Şölen KUMBAY YILDIZ

Eylül 2023, 86 sayfa

Gimbal sistemleri üzerlerindeki faydalı yükü taşıyan ve belirli bir konuma yönlendiren sistemlerdir. Gimbal sistemleri için tasarlanan denetleyicilerin, çevreden gelen bozuculara ve model parametre değişimlerine karşı dayanıklı olması istenmektedir. Bu amaçla gimbal sistemlerinde, denetim başarımını istenen düzeyde tutabilmek amacıyla bir çok farklı denetim yapısı kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında Oransal-Tümlevsel (OTüm) denetim, Özayarlamalı OTüm denetim, Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim (TE-DKD) ve Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim (GÇ-RKKD) yapıları kullanılmaktadır. Tezin ikinci bölümünde kullanılan denetim yapıları anlatılmaktadır. Bir sonraki bölümde bu denetim yapılarının benzetim ortamında farklı aktarım işlevlerine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Dördüncü bölümde gerçek bir gimbal sistemi üzerinde denetim yapılarının uygulanması ile elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uyarlamalı Denetim, Gürbüz Denetim, Oransal-Tümlevsel (OTüm) Denetim, Doğrusal Karesel Denetim (DKD), Kayan Kipli Denetim, Gimbal Denetim

ABSTRACT

TESTING AND COMPARISON OF DIFFERENT CONTROL METHODS ON A GIMBAL SYSTEM

Muharrem MANDACI

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şölen KUMBAY YILDIZ

September 2023, 86 pages

Gimbal systems are systems that carry the payload on them and direct them to a specific location. Controllers designed for gimbal systems are required to be robust for environmental disturbances and model parameter changes. For this purpose, many different control structures are used in gimbal systems in order to keep the control performance at the desired level.

In this thesis, Proportional-Integral (PI) control, Self-Tuning PI control, Integral Action Linear Quadratic Control (LQR) and Input-Output Model Based Relay Sliding Mode Control (IO-RSMC) are used. In the first part of the thesis, the control structures that used are explained. In the next section, the results obtained as a result of applying these control structures to different transfer functions in the simulation environment are examined. In the fourth chapter, the results obtained by applying the control structures on a real gimbal system are given.

Keywords: Adaptive Control, Robust Control, Propotional-Integral (PI) Control, Linear Quadratic Regulator (LQR) Control, Sliding Mode Control, Gimbal Control

TEŞEKKÜR

Bu zorlu tez alıőmamız boyunca bilgisini ve desteğini esirgemeyen, bana bu alıőmada yol gösteren tez danıőmanım Sayın Dr. şölen KUMBAY YILDIZ'a değerli katkıları ve ilgisinden dolayı teőekkürlerimi sunarım.

Őirket imkanlarını, gimbal sistemini ve test düzeneklerini kullanma konusunda verdiği destekten dolayı ASELSAN A.Ő.'ye teőekkürlerimi sunarım.

İlk günden bu yana yüksek lisans eğitimim ve tez çalıőmam boyunca sevgi ve desteği ile yanımda olan eőim Berna'ya ve varlığıyla hayatımı güzelleőtiren kızım Güneő'e yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	1
ABSTRACT	2
TEŞEKKÜR	3
İÇİNDEKİLER	4
TABLolar	6
ŞEKİLLER	7
KISALTMALAR	9
1. GİRİŞ	1
2. YÖNTEMLER	7
2.1. Model Uyumlama ile OTüm Denetleyici	7
2.2. Özayarlamalı OTüm Denetim Yapısı	9
2.2.1. Sürekli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi (SZÖEKK)	9
2.2.2. Özayarlamalı OTüm Denetleyici ile Model Uyumlama	11
2.3. Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim (TE-DKD)	12
2.4. Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim (GÇ-RKKD)	15
3. BENZETİM ÇALIŞMALARI	19
3.1. Birinci Derece Kararlı Sistem Modeli	19
3.1.1. OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları	20
3.1.2. Özayarlamalı OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları	21
3.1.3. TE-DKD Benzetim Sonuçları	22
3.1.4. GÇ-RKKD Benzetim Sonuçları	23
3.2. Birinci Derece Kararsız Sistem Modeli	28
3.2.1. OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları	29
3.2.2. Özayarlamalı OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları	29
3.2.3. TE-DKD Benzetim Sonuçları	30
3.2.4. GÇ-RKKD Benzetim Sonuçları	31
3.3. Pozisyon Denetimi Benzetim Sonuçları	37

3.3.1. İç Döngü: Özayarlamaalı OTüm Denetim	39
3.3.2. İç Döngü: GÇ-RKKD	40
4. UYGULAMA	46
4.1. Uygulamada Kullanılan Sistem	47
4.2. İki Eksen Gimbal Sisteminin Matematiksel Modeli	48
4.3. Hız Denetimi Uygulama Sonuçları	52
4.3.1. OTüm Denetleyici ile Elde Edilen Sonuçlar	54
4.3.2. Özayarlamaalı OTüm denetleyici ile Elde Edilen Sonuçlar	55
4.3.3. TE-DKD ile Elde Edilen Sonuçlar	56
4.3.4. GÇ-RKKD ile Elde Edilen Sonuçlar	56
4.4. Pozisyon Denetimi Uygulama Sonuçları	62
4.4.1. İç Döngü: Özayarlamaalı OTüm Denetim	63
4.4.2. İç Döngü: GÇ-RKKD	64
5. SONUÇ	69
KAYNAKLAR	71
EKLER	76

TABLULAR

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 $G_1(s)$ ile Yapılan Benzetimlerde Kullanılan Parametreler	20
Tablo 3.2 $G_1(s)$ için OTüm Denetleyici Parametreleri	20
Tablo 3.3 $G_1(s)$ için Özayarlamalı OTüm Denetleyici Parametreleri	21
Tablo 3.4 $G_2(s)$ için Kullanılan Parametreler	28
Tablo 3.5 $G_2(s)$ için OTüm Denetleyici Parametreleri	29
Tablo 3.6 $G_2(s)$ için Özayarlamalı OTüm Denetleyici Parametreleri	30
Tablo 3.7 Ardışık Denetim Hız Denetleyicileri için Kullanılan Başarım Kriterleri	37
Tablo 3.8 Ardışık Denetim için SZÖEKK Yöntemi Parametreleri	39
Tablo 4.1 Uygulama - Başarım Ölçütleri Tablosu	53
Tablo 4.2 Uygulama - OTüm Denetleyici Parametreleri	54
Tablo 4.3 Uygulama - SZÖEKK Yöntemi Parametreleri	55
Tablo 4.4 Uygulama Ardışık Denetim Hız Denetleyicileri için Kullanılan Başarım Kriterleri	62
Tablo 4.5 Uygulama - Ardışık Denetim için SZÖEKK Yöntemi Parametreleri ...	63

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	Tek Eksen Gimbal Yapısı 1
Şekil 2.1	OTüm denetleyici 7
Şekil 2.2	Özayarlama En Küçük Kareler Yöntemi ile Özayarlama Otüm Denetim Yapısı 11
Şekil 2.3	Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim Yapısı 15
Şekil 2.4	Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim Yapısı 16
Şekil 2.5	Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Genişletilmiş Denetim Yapısı 18
Şekil 3.1	$G_1(s)$ için OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları 24
Şekil 3.2	$G_1(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları ... 25
Şekil 3.3	$G_1(s)$ için TE-DKD ile Benzetim Sonuçları 26
Şekil 3.4	$G_1(s)$ için GÇ-RKKD ile Benzetim Sonuçları 27
Şekil 3.5	$G_2(s)$ için Bozucu Girişleri Öbek Çizeneği 28
Şekil 3.6	$G_2(s)$ için OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları 33
Şekil 3.7	$G_2(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları ... 34
Şekil 3.8	$G_2(s)$ için TE-DKD ile Benzetim Sonuçları 35
Şekil 3.9	$G_2(s)$ için GÇ-RKKD ile Benzetim Sonuçları 36
Şekil 3.10	Ardışık Denetim Öbek Çizeneği 38
Şekil 3.11	Pozisyon Denetimi (İç Döngü: Özayarlama OTüm) 42
Şekil 3.12	$G_3(s)$ için Özayarlama OTüm Hız Denetimi 43
Şekil 3.13	Pozisyon Denetimi (İç Döngü: GÇ-RKKD) 44
Şekil 3.14	$G_3(s)$ için GÇ-RKKD Hız Denetimi 45
Şekil 4.1	Örnek Gimbal Sistemi - CATS 48
Şekil 4.2	Kullanılan Temsili Düzenek 48
Şekil 4.3	Motor Akımı Denetleyici Yapısı 49
Şekil 4.4	Motor Akım Denetleyicisi İndirgenmiş Yapı 50

Şekil 4.5	Gimbal Matematiksel Model	51
Şekil 4.6	İki Farklı Sıcaklıkta OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması	58
Şekil 4.7	İki Farklı Sıcaklıkta Özayarlamalı OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması	59
Şekil 4.8	İki Farklı Sıcaklıkta TE-DKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması	60
Şekil 4.9	İki Farklı Sıcaklıkta GÇ-RKKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması	61
Şekil 4.10	Uygulama - Ardışık Denetim Öbek Çizeneği.....	62
Şekil 4.11	$G_s(s)$ için Pozisyon Denetimi (İç Döngü: Özayarlamalı OTüm).....	65
Şekil 4.12	$G_s(s)$ için Özayarlamalı OTüm Hız Denetimi.....	66
Şekil 4.13	$G_s(s)$ için Pozisyon Denetimi (İç Döngü: GÇ-RKKD).....	67
Şekil 4.14	$G_s(s)$ için GÇ-RKKD Hız Denetimi	68

SİMGELER, KISALTMALAR

Simgeler

y	:	sistem çıkışı
u	:	sistem girişi
y_d	:	dayanak model çıkışı
y_i	:	istenen sistem cevabı çıkışı
d	:	dayanak girişi
e	:	hata sinyali
r	:	röle genliği
v	:	genişletilmiş KKD yapısında röle çıkışı
E, F	:	genişletilmiş KKD yapısında kullanılan süzgeç çokterimlileri
a, b	:	sistem modeli parametreleri veya kestirilen sistem model parametreleri
K_p, K_i	:	OTüm denetleyici parametreleri
K_p, K_d	:	OTür denetleyici parametreleri
m	:	OTüm denetleyici ek serbestlik parametresi
ζ	:	sönüm oranı
ω_n	:	doğal frekans
β	:	unutma çarpanı

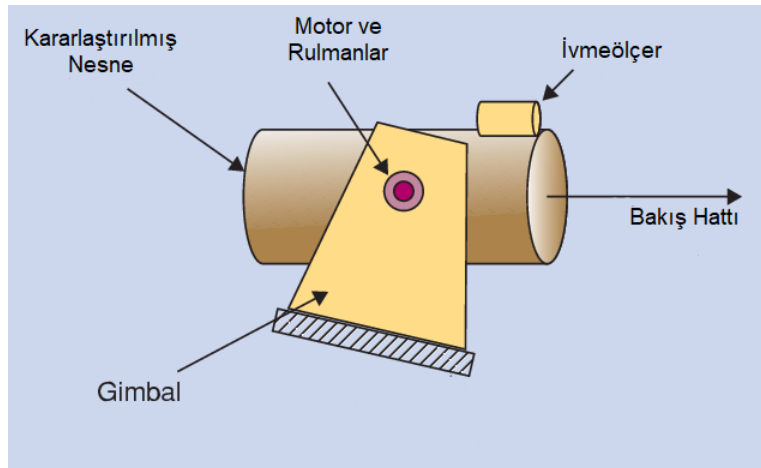
Kısaltmalar

OTT	: Oransal - Tümlevsel - Türevsel
OTüm	: Oransal - Tümlevsel
OTür	: Oransal - Türevsel
SZÖEKK	: Sürekli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler
TE-DKD	: Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim
GÇ-RKKD	: Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle İle Kayan Kipli Denetim

1. GİRİŞ

Ataletsel kararlılaştırılmış platformlar (Inertially Stabilized Platform - ISP), çeşitli görüntüleme algılayıcıları (kızılötesi kamera, radar, teleskop vb.), anten veya silah gibi faydalı yükleri yönlendirmek ve kararlılaştırmak için kullanılan sistemlerdir. Bu platformlar çeşitli kara, deniz, hava ve uzay araçları üzerine monte edilerek kullanılabilirdiği gibi, yere sabitlenmiş şekilde de kullanılmaktadır. Üzerlerinde taşıdıkları faydalı yükleri istenilen bakış hattına yönlendirerek gözetleme, hedef takibi, nişan alma, anten açısı ayarlama gibi birçok farklı görevi yerine getirmektedirler[1].

Ataletsel kararlılaştırılmış platformların (AKP) elektronik ve mekanik özellikleri tasarlandıkları amaçlara göre farklılıklar içerebilmektedir. Genellikle mekanik arayüzler, faydalı yük ve gimbal yapısı içermektedir. Gimbal üzerinde bulunan motor, açıölçer ve ivmeölçer gibi alt bileşenleri kullanarak yönlendirme ve kararlılaştırma işlevlerini yerine getiren sistemdir. Bu eyleyici ve algılayıcıları kullanan denetleyiciler yardımıyla gimbalin, takıldığı platform kaynaklı bozucu etkilere dayanıklı olması ve istenen başarımlı ölçütlerini sağlayacak şekilde eksenleri yönlendirmesi amaçlanır. Bir eksen bir gimbalin genel yapısı Şekil 1.1[1] ile gösterilmektedir. AKP'lerin sahip oldukları gimbal yapıları üç boyutlu uzayda bakış hattının istenilen noktaya yönlendirilebilmesi için en az 2 dik eksen olacak şekilde tasarlanmaktadır.



Şekil 1.1 Tek Eksen Gimbal Yapısı

Gimbal, üzerindeki faydalı yükü istenilen bakış hattına konumlandırabilmelidir. Ayrıca bakış hattını istenilen konuma götürdükten sonra, bakış hattını tüm dış bozucuların etkisi altında istenilen noktada yüksek hassasiyet ile tutabilmesi gerekmektedir. Bu iki görevi bir arada yerine getirebilmek amacıyla gimbal denetim yapısı, yüksek bant genişliğine sahip bir iç hız denetim döngüsüne ve iç döngüye görece daha düşük bant genişliğine sahip bir dış konum denetim döngüsüne sahip olacak şekilde yapılandırılmaktadır. Bu sayede iç döngü yüksek frekanslı bozucu etkileri ortadan kaldırırken, dış döngü bakış hattının istenen konuma yönlendirilmesini sağlamaktadır.

Gimbal üzerinde eksene etki eden açısal hızları ve ivmeleri ölçen bir ivmeölçer yer almaktadır. İdeal bir gimbal sistemi göz önüne alındığında, bu algılayıcının ölçtüğü hızı sınırlayacak tork kuvveti Eşitlik 1 ile hesaplanarak motorlar tarafından eksene uygulanır ve bakış hattı üzerindeki hareketin ve titreşimin belirli bir hassasiyet altında sınırlanması amaçlanır [2]. Bu eşitlikte yer alan τ torku, J dönme ekseninin eylemsizliğini ve α açısal ivmeyi ifade etmektedir.

$$\tau = J\alpha \quad (1)$$

Bu eşitlik simetrik, homojen kütleli ve tek eksen bir gimbal için geçerlidir. Ancak gerçek bir gimbal çoğu zaman birden fazla eksene sahiptir ve simetrik, homojen bir kütleyle sahip olmaz. Bu noktada eksen torkları üzerine diğer eksenlerdeki dönüşlerden kaynaklı kuvvetler ve kütle kaçıklıklarının etkisi eklenir.

Eşitlik 2 ile verilen eylemsizlik matrisi kullanılarak,

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

bir kütle üzerine üç eksenle etkiyen tork kuvvetleri Eşitlik 3, 4 ve 5 kullanılarak bulunabilir. Bu eşitliklerde yer alan ω terimleri kütle için ilgili eksenlerdeki açısal dönüş hızını, I terimleri ise eylemsizlik matrisinin ilgili akselere karşılık gelen kısımlarını ifade etmektedir.

$$\tau_x = \alpha_x I_{xx} + \omega_y \omega_z (I_{zz} - I_{yy}) - (\omega_y^2 - \omega_z^2) I_{yz} - (\omega_x \omega_y + \dot{\omega}_z) I_{xz} + (\omega_x \omega_z + \dot{\omega}_y) I_{xy} \quad (3)$$

$$\tau_y = \alpha_y I_{yy} + \omega_x \omega_z (I_{xx} - I_{zz}) - (\omega_z^2 - \omega_x^2) I_{xz} - (\omega_z \omega_y + \dot{\omega}_x) I_{xy} + (\omega_x \omega_y + \dot{\omega}_z) I_{yz} \quad (4)$$

$$\tau_z = \alpha_z I_{zz} + \omega_x \omega_y (I_{xx} - I_{yy}) - (\omega_x^2 - \omega_y^2) I_{xy} - (\omega_x \omega_z + \dot{\omega}_y) I_{yz} + (\omega_x \omega_z + \dot{\omega}_x) I_{xz} \quad (5)$$

Tüm fiziksel sistemlerde olduğu gibi gimbale sistemlerinde de modelleme hataları ve belirsizlikleri mevcuttur. Ayrıca gimbale sisteminin çalışma esnasında içinde bulunduğu çevrenin özellikleri, gimbale sisteminin model parametrelerini değiştirmektedir. Örneğin ortam sıcaklığındaki değişim özellikle sürtünme miktarını değiştirerek sistem modelini değiştirmektedir. Klasik denetim yöntemleri bu model belirsizlikleri ve model parametre değişimleri karşısında başarımları sıkıntıları yaşayabilmektedir. Bu problemi çözmek için literatürde uyarlamalı denetim ve gürbüz denetim yapıları kullanılmaktadır.

Uyarlamalı denetim, parametreleri ayarlanabilen bir denetleyici ve bu parametrelerin ayarlanmasında kullanılan bir mekanizmadan oluşmaktadır [3]. Uyarlamalı denetim yöntemleri 1950'li yıllardan itibaren kullanılmaktadır ancak yeterli donanım ve hesap gücüne mevcut teknolojinin sahip olmamasından dolayı ancak 1970'li yıllardan sonra çalışmalar hızlanabilmektedir. 1970'li yıllardan sonra çok sayıda uyarlamalı denetim yöntemi geliştirilmiştir [4–6]. Uyarlamalı denetim yöntemlerinin en önemlilerinden biri de özayarlamalı (self-tuning) denetimdir [7, 8]. Bu denetim yapısında sistem modeli parametreleri yinelemeli olarak kestirilmektedir. Kestirilen bu parametreler kullanılarak istenilen başarımları ölçütlerini sağlayacak bir denetleyicinin parametreleri hesaplanmaktadır. Bu sayede model parametrelerine göre denetleyicinin kendisini güncellenmesi sağlanarak, denetleyici başarımları korunmaktadır. Hem parametre kestirimi hem de denetleyici için kullanılan birçok farklı yöntem mevcuttur. İstenilen başarımları ölçütlerini bir dayanak aktarım işlevi yardımıyla sağlayan yöntemlere Özayarlamalı Model Dayanaklı Denetim (MDD) adı verilmektedir [9].

Sistem parametrelerindeki değişimlerden dolayı denetim başarımlarında meydana gelen kötüleşmeyi en az indirmek için kullanılan bir diğer denetim yapısı gürbüz denetimdir. Bu yöntemlere kayan kipli denetim (KKD), doğrusal karesel denetim (DKD) , H_∞ denetim örnek olarak verilebilir. KKD sistem durumlarının belirlenen bir yüzey üzerinde tutulmaya çalışıldığı denetim yapısıdır [10]. Bu denetleyici türü parametre belirsizlikleri ve değişimlerine karşı gürbüzdür. Kayan kipli denetim, model dayanaklı sistemlerde ve/veya Röleli sistemlerde de kullanılabilir. Röle tarafından üretilen denetim sinyali ile sistem durumları kayma yüzeyi üzerinde tutulabilmektedir ve sistem dinamiği kayma yüzeyi

ile belirlenmektedir. Doğrusal Karesel Denetim bir eniyi denetim yöntemidir. Sistem durumlarından ve denetim sinyalinden oluşan bir maliyet işlevini enküçülten K kazanç matrisinin bulunması amaçlanmaktadır [11, 12].

Gimbal sistemleri üzerinde literatürde birçok farklı denetim yapısı uygulanmaktadır ve bu denetim yapıları ile ilgili akademik çalışmalar yapılmaktadır. Klasik Oransal-Tümlevsel-Türevsel (OTT) denetleyicinin kullanıldığı [13, 14] çalışmaların yanı sıra, OTT parametrelerinin hesaplanması için genetik/evrimsel algoritma yöntemlerinin [15, 16] ve bulanık mantık yöntemlerinin [17] kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bulanık mantık sadece OTT katsayılarını ayarlamak için değil, OTT denetleyicinin yanında başarıyı artırıcı olarak da bazı çalışmalarda [18–20] kullanılmaktadır.

Gimbal sistemlerinde, bozucu ve model parametre değişimlerine karşı klasik OTT denetleyicilerden daha başarılı olan gürbüz ve uyarlamalı denetim yöntemleri de kullanılmaktadır. Bir gimbal sistemi üzerinde Doğrusal karesel denetim ile OTT denetleyicinin karşılaştırıldığı bir araştırmada [21] DKD yönteminin daha başarılı olduğu görülmektedir. H_∞ denetleyicinin kullanıldığı bir başka çalışmada [22], yüksek dereceli bozuculara karşı bu denetleyicinin başarılı sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Kayan Kipli Denetim (KKD) yapısının bozucu ve kötü modellenmiş gimbal sistemleri üzerinde çok iyi takip performansı sağladığını gösteren bir çalışmanın [23] yanı sıra, KKD'nin gimbal sistemlerinde çok iyi bozucu bastırma başarıyı sergilediğini gösteren bir çalışma da [24] mevcuttur. KKD gimbal sistemleri üzerinde tek başına başarılı sonuçlar versede yapılan çalışmalarda başarıyı arttırmak için farklı yapılar ile birlikte de kullanılmaktadır. KKD'nin Tip 2 Bulanık Denetim yapısı ile birlikte bir gimbal sistemine uygulandığı bir çalışmada [25], bu denetleyicinin model parametre değişimi altında OTT denetim yapısından daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmektedir. KKD'ye OTüm (Oransal-Tümlevsel) tipi bir gözleyici tasarlandığı bir başka çalışmada [26] ise, KKD'nin başarımının bu gözleyici ile arttırılabildiği gösterilmektedir.

Gürbüz denetim yöntemlerinin yanı sıra uyarlamalı denetim yöntemleri de gimbal sistemleri için kullanılmaktadır. Mekanik dengesizlik ve parametre belirsizliklerinin dikkate alındığı

bir gimbal sisteminde uyarlamalı denetimin başarılı sonuçlar verdiğini gösteren bir çalışma [27] mevcuttur. Bir başka çalışmada [28] ise en küçük kareler (EKK) yöntemi kullanılarak kestirilen sistem modelinin tersi kullanılarak denetim yapısının bozucu bastırma başarımının arttığı görülmektedir. EKK model parametrelerini kestirmek için kullanılabilirdiği gibi, denetleyici parametrelerini kestirmek için de kullanılabilir.

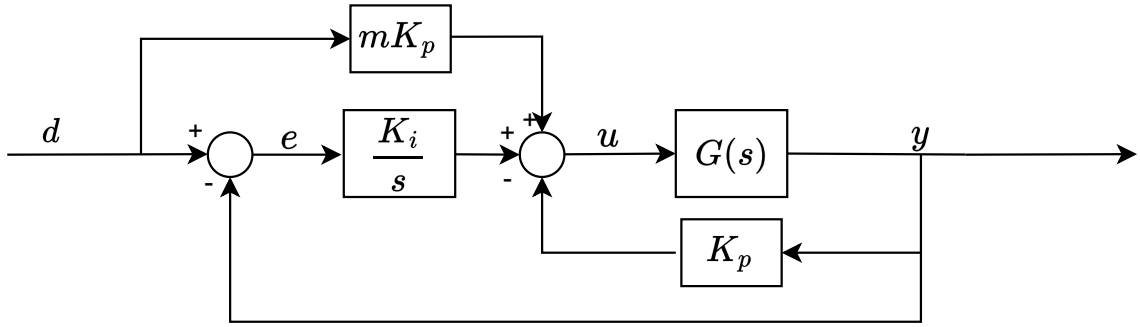
Bu tez kapsamında farklı tipte denetim yöntemleri benzetim ortamında ve gerçek ortamda bir gimbal sistemi üzerine uygulanmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Hız denetiminde kullanılan denetleyiciler OTüm denetim, Özayarlamalı OTüm denetim, Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle Kayan Kipli Denetim (GÇ-RKKD) ve Doğrusal Karesel Denetim (DKD) yapılarıdır. Bölüm 2’de bu denetleyiciler anlatılmaktadır. Ardından Bölüm 3.1 ve 3.2’de bu denetleyiciler benzetim ortamında farklı sistemler üzerine uygulanmaktadır ve sonuçları incelenmektedir. Bölüm 3.3’te seçilen 2 hız denetimi üzerine bir konum denetim yapısı eklenerek ardarda denetim yapısı uygulanmaktadır ve sonuçları yorumlanmaktadır. Bölüm 4’te ise gerçek bir gimbal sistemi üzerine uygulanan hız denetim yapılarının sonuçları farklı çalışma koşulları altında incelenmektedir. Bölüm 4’ün sonunda seçilen iki hız döngüsü üzerine konum döngüsü eklenerek ardarda denetim yapısı oluşturulmakta ve sonuçları incelenmektedir. Son olarak Bölüm 5’te tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen çıkarımlar aktarılmaktadır.

2. YÖNTEMLER

Bu çalışma kapsamında 4 farklı denetim yöntemi hem benzetim ortamındaki sistemlere hem de gerçek bir gimbal sistemine uygulanmaktadır. Bu bölümde, bu çalışmada kullanılacak denetleyiciler anlatılmaktadır.

2.1. Model Uyumlama ile OTüm Denetleyici

Bir sistemin OTüm denetleyici [29] kullanılarak denetlendiği yapının öbek çizeneği Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Bu şekilde K_p , K_i ve m denetleyici parametreleridir ve $G(s)$ model aktarım işlevidir. Ayrıca d dayanak girişini, u denetim sinyalini, y sistem çıkışını ve son olarak e dayanak girişi ile sistem çıkışı arasındaki hata işaretini ifade etmektedir.



Şekil 2.1 OTüm denetleyici

Eşitlik 6 ile bu OTüm denetleyici için denetim yasası verilmektedir. Eşitlik 6 ile gösterildiği gibi, bu bölümde anlatılan OTüm denetleyicide oransal denetim hataya değil $(md - y)$ 'ye etki etmektedir. Dayanak ağırlıklandırma adı verilen bu yaklaşım, denetleyiciye bir serbestlik derecesi daha eklemektedir [30].

$$u = K_p(md - y) + K_i \frac{1}{s}(d - y) \quad (6)$$

$G(s)$, Eşitlik 7 ile gösterilen birinci derece bir aktarım işlevi olarak seçildiği zaman yukarıda verilen öbek çizeneğinin kapalı döngü aktarım işlevi, Eşitlik 8'de gösterildiği gibi 2. derece

bir aktarım işlevi ($T(s)$) olarak bulunmaktadır. Sistem modeli parametreleri sabit olduğu için K_p , K_i ve m parametrelerinin seçimi ile kapalı döngü aktarım işlevi, dolayısıyla kapalı döngü sistem cevabı belirlenebilmektedir.

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (7)$$

$$T(s) = \frac{K_p b m s + K_i b}{s^2 + (K_p b + a)s + K_i b} \quad (8)$$

K_p ve K_i ile kutupların yeri [31] ayarlandıktan sonra, m parametresi yardımı ile kapalı döngü sıfırının yeri de ayarlanabilmektedir. Bu sayede OTüm denetleyicisinin parametreleri model uyumlama yöntemi ile belirlenebilmektedir. İlk olarak başarımlı ölçütlerini sağlayan ve genel yapısı, ζ sönüm oranı ve ω_n doğal sıklık olmak üzere, Eşitlik 9 ile verilen $T_d(s)$ kapalı döngü aktarım işlevi belirlenir. Ardından bu iki kapalı döngü aktarım işlevini birbirine eşitleyecek K_p , K_i ve m parametreleri hesaplanır.

$$T_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

Eşitlik 9'da verilen kapalı döngü aktarım işlevinin payı incelendiğinde bir sabitten oluştuğu, dolayısıyla aktarım işlevinin bir sıfıra sahip olmadığı görülmektedir. OTüm denetleyicisinde m parametresi 0 (sıfır) olarak seçildiğinde kapalı döngü aktarım işlevinin sahip olduğu sıfır ortadan kalkmaktadır ve aktarım işlevlerinin pay kısımları eşitlenebilmektedir.

OTüm denetleyicisinde model uyumlama Eşitlik 10'da gösterildiği gibi yapılmaktadır [32].

$$\frac{K_i b}{s^2 + (K_p b + a)s + K_i b} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

Eşitlik 10 kullanılarak denetleyici parametreleri K_p ve K_i , sistem aktarım işlevi parametreleri a , b cinsinden ve istenen sistem cevabını veren aktarım işlevi parametreleri ζ ve ω_n cinsinden Eşitlik 11’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n - a}{b} \qquad K_i = \frac{\omega_n^2}{b} \qquad (11)$$

Eşitlik 10 ve Eşitlik 11’de verilen denklemler kullanılarak herhangi bir birinci derece sistem için, kapalı döngü aktarım işlevini, başka bir kapalı döngü aktarım işlevine eşitleyecek denetleyici parametreleri bulunabilmektedir.

2.2. Özayarlama OTüm Denetim Yapısı

Sistem parametrelerindeki değişiklikleri bir kestirim algoritması yardımı ile algılayan ve bu değişime göre kendi parametrelerini güncelleyen denetim yapılarına özayarlama denetim yapıları denilmektedir [31]. Yaygın olarak kullanılan parametre kestirim algoritmalarından biri özyinelemeli en küçük kareler yöntemidir (Recursive Least Squares, RLS). Bu bölümde sürekli zaman en küçük kareler yöntemi anlatılmaktadır.

2.2.1. Sürekli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi (SZÖEKK)

Bu bölümde SZÖEKK yöntemi kullanılarak sürekli zamanda bir aktarım işlevinin parametrelerinin nasıl kestirildiği [33] anlatılmaktadır.

Sistem modeli Eşitlik 12 ile gösterildiği gibidir. Bu modelde $Y(s)$ sistem çıkışı, $U(s)$ sistem girişini ifade etmektedir. Ayrıca $E(s)$ sistemi etkileyen gürültü, bozucu, modelleme hatası gibi belirsizleri ifade eden bir terimdir. Eşitlikte yer alan $A(s)$ ve $B(s)$ çokterimlileri Eşitlik 13 ve 14 ile gösterilmektedir.

$$A(s)Y(s) = B(s)U(s) + E(s) \qquad (12)$$

$$A(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 \quad (13)$$

$$B(s) = b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0 \quad (14)$$

Eşitlik 12 ile verilen sistem modeli, giriş ve çıkışın bir $C(s)$ çokterimlisi ile süzgeçlenmesiyle Eşitlik 15 ile gösterildiği gibi ifade edilir. Tasarımcı tarafından seçilen monik $C(s)$ çokterimlisinin derecesi $A(s)$ 'ni derecesine eşittir.

$$Y(s) = B(s)\frac{U(s)}{C(s)} + [C(s) - A(s)]\frac{Y(s)}{C(s)} + \frac{E(s)}{C(s)} \quad (15)$$

Eşitlik 15, parametreler bakımından doğrusal biçimde düzenlendiğinde Eşitlik 16 elde edilmektedir.

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + \varepsilon(t) \quad (16)$$

θ parametre vektörü Eşitlik 17 ile gösterilmektedir.

$$\theta = [b_m \ b_{m-1} \ \dots \ b_0 \ c_{n-1} - a_{n-1} \ \dots \ c_0 - a_0]^T \quad (17)$$

Eşitlikte 15'te yer alan $\varphi^T(t)$ veri vektörünü ve $\varepsilon(t)$ hata terimini ifade etmektedir. $\varphi^T(t)$ vektörünün Laplace dönüşümü Eşitlik 18 ile gösterilmektedir.

$$\varphi^T(s) = \frac{1}{C(s)} \left[[s^m \ s^{m-1} \ \dots \ 1] U(s) \ [s^{n-1} \ s^{n-2} \ \dots \ 1] Y(s) \right] \quad (18)$$

Parametre vektörünü kestirmek için kullanılan kestirici Eşitlik 19 ve 20 ile verilmektedir [34]. Eşitliklerde yer alan $S(t)$ bilgi matrisiyken, β sayıl unutma çarpanıdır.

$$\hat{\theta}(t+T) = \hat{\theta}(t) + \mathbf{S}^{-1}(t+T) \int_t^{t+T} e^{-\beta(t+T-\tau)} \boldsymbol{\varphi}(\tau) [y(\tau) - \boldsymbol{\varphi}(\tau) \hat{\theta}(\tau)] d\tau \quad (19)$$

$$\mathbf{S}(t+T) = e^{-\beta T} \mathbf{S}(t) + \int_t^{t+T} e^{-\beta(t+T-\tau)} \boldsymbol{\varphi}(\tau) \boldsymbol{\varphi}^T(\tau) d\tau \quad (20)$$

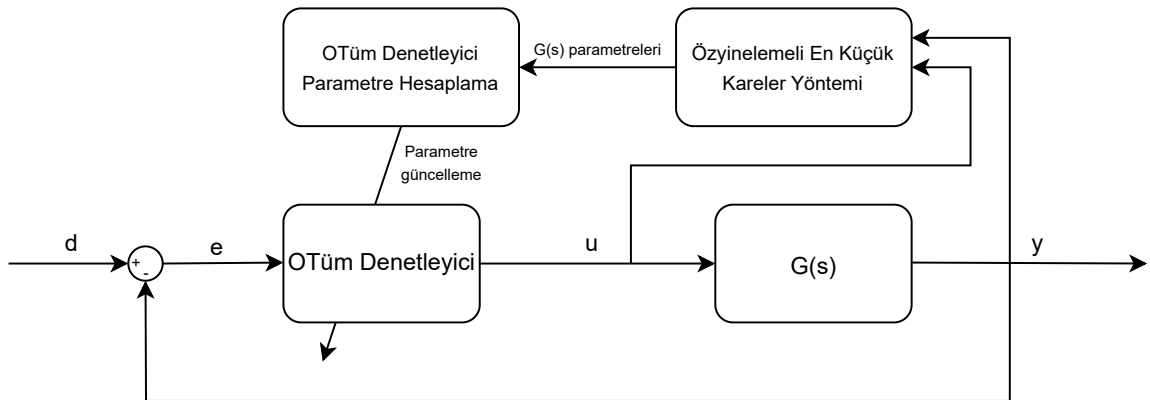
Bilgi matrisinin ilk değeri

$$\mathbf{S}_0 = \alpha \mathbf{I} \quad (21)$$

şeklinde seçilmektedir. α değeri sıfıra yakın küçük bir sayıdır. \mathbf{I} ise uygun boyutlu birim matristir.

2.2.2. Özayarlama OTüm Denetleyici ile Model Uyumlama

Şekil 2.2 ile öz-yinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılarak denetleyici parametrelerinin kestirildiği ve sistemin denetlendiği yapının öbek çizeneği gösterilmiştir. Bu şekilde yer alan u denetim sinyali, y sistem çıkışıdır. Ayrıca d dayanak girişini ve e hata sinyalini ifade etmektedir.



Şekil 2.2 Özayarlama En Küçük Kareler Yöntemi ile Özayarlama Otüm Denetim Yapısı

Önceki bölümde sürekli zamanlı özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılarak bir aktarım işlevinin parametrelerinin nasıl kestirildiği anlatılmaktadır. Şekil 2.2 ile gösterilen yapıda, özyinelemeli en küçük kareler yöntemi çevrimiçi olarak $G(s)$ aktarım işlevinin parametre kestirimi için modelin giriş (u) ve çıkış (y) sinyallerini kullanmaktadır. Ardından kestirilen model parametreleri ve daha önceden belirlenen dayanak aktarım işlevi parametreleri kullanılarak, OTüm denetim parametreleri her örnekleme zamanında yeniden hesaplanmaktadır. Bu parametreleri hesaplarken Eşitlik 11 ile verilen denklemler kullanılmaktadır. Hesaplanan yeni denetim parametreleri ile OTüm denetleyici yapısı her örnekleme anında güncellenmektedir [35]. Bu yapı sayesinde model parametrelerindeki değişiklikler uyarlamalı olarak tespit edilerek denetim başarımının sabit tutulması amaçlanmaktadır.

2.3. Tümlev Etkili Doğrusal Karesel Denetim (TE-DKD)

Doğrusal Karesel Denetim [11] (DKD), eniyi denetim yöntemlerinden biridir. Başarım ölçütleri sistem durumlarının ve denetim sinyallerinin karesel bir işlevidir ve maliyet işlevi olarak adlandırılır. DKD’de denetim girişi sistem durumlarının bir K kazanç matrisi ile çarpılması sonucunda elde edilmektedir. Bu yöntemde amaç maliyet işlevini en küçük yapan K kazanç matrisinin bulunmasıdır. DKD, kullanıldığı sisteme bağlı olarak kalıcı durum hatasını her zaman ortadan kaldıramamaktadır. Bu gibi durumlarda kalıcı durum hatasını giderebilmek amacıyla tümlev ekili doğrusal karesel denetim [12] yapısı kullanılmaktadır. Bu bölümde bu denetim yöntemi anlatılmaktadır.

Tek girişli tek çıkışlı açık döngü bir sistemin durum uzayı gösterimi A durum uzayı matrisi, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve D ileri besleme matrisi olmak üzere Eşitlik 22 ve 23 ile gösterilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (22)$$

$$y = Cx + Du \quad (23)$$

Bu eşitliklerde x dinamik sistem durum değişkenlerini, y çıkış sinyalini ve u denetim sinyalini ifade etmektedir. Denetim yasası, K kazanç matrisi olmak üzere Eşitlik 24 ile gösterilen yapıda seçildiği zaman,

$$u = -Kx \quad (24)$$

dinamik sistemin kapalı döngü durum uzayı modeli Eşitlik 25 ile gösterilen biçime gelmektedir.

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (25)$$

Bu eşitlik incelendiğinde K matrisinin sistem dinamiklerini doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu nedenle doğru K matrisinin seçimi ile sistemin dinamikleri, dolayısıyla sistem kapalı döngü cevabı, belirlenen bir başarımlı ölçütünü sağlayacak şekilde belirlenebilir. Eşitlik 26, DKD için kullanılan maliyet işlevidir.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (26)$$

Bu eşitlikte yer alan bakışimli pozitif yarı tanımlı Q matrisi ve bakışimli pozitif tanımlı R matrisi başarımlı ağırlık matrisleridir. Q ağırlık matrisi sistem durumlarının değişimini ayarlarken, R ağırlık matrisi denetim sinyalinin büyüklüğünü ayarlamaktadır. Yani kötü dayanak takibi başarımlı Q matrisi ile cezalandırılırken; yüksek denetim sinyali R matrisi ile cezalandırılmaktadır. Maliyet işlevini en küçük yapan K kazanç matrisi Eşitlik 27 ile gösterilmektedir [36].

$$K = R^{-1} B^T P \quad (27)$$

P matrisi Eşitlik 28 ile verilen cebirsel matris Riccati denklemi çözülerek bulunmaktadır.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (28)$$

DKD kullanıldığında oluşan kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak için tümlev etkisi eklenmektedir. Eklenen tümlev terimi sonrası oluşan yeni durum uzayı modeli Eşitlik 29 ve 30 ile gösterildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ fe \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} d \quad (29)$$

$$y = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ fe \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (30)$$

Yukarıda verilen genişletilmiş sistem modeli göz önüne alınarak genişletilmiş maliyet işlevi matrisleri \tilde{Q} ve \tilde{R} , Eşitlik 31 ve 32 ile gösterildiği gibi seçilmektedir. Eşitlikte yer alan Q_I değeri hatanın tümlevine verilen ağırlık çarpanını ifade etmektedir.

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & Q_I \end{bmatrix} \quad (31)$$

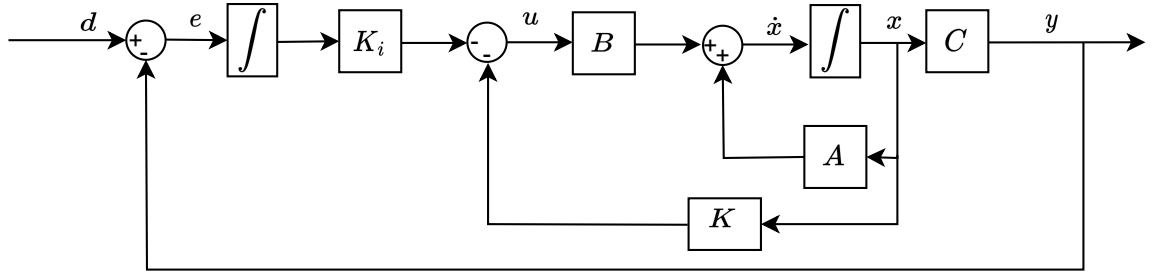
$$\tilde{R} = R \quad (32)$$

Genişletilmiş durum uzayı modeli parametreleri ve genişletilmiş ağırlık matrisleri 27 ve 28'de yerine konularak \tilde{K} matrisi hesaplanmaktadır. \tilde{K} matrisi Eşitlik 33 ile, \tilde{K} matrisi kullanılarak elde edilen denetim yasası \tilde{u} 'nun denklemi Eşitlik 34 ile verilmektedir.

$$\tilde{K} = [K \quad K_i] \quad (33)$$

$$u(t) = -\mathbf{K} \mathbf{x}(t) - K_i \int_0^t (d - y(t)) dt \quad (34)$$

TE-DKD ile elde edilen denetim sisteminin genel yapısı Şekil 2.3 ile gösterilmektedir.

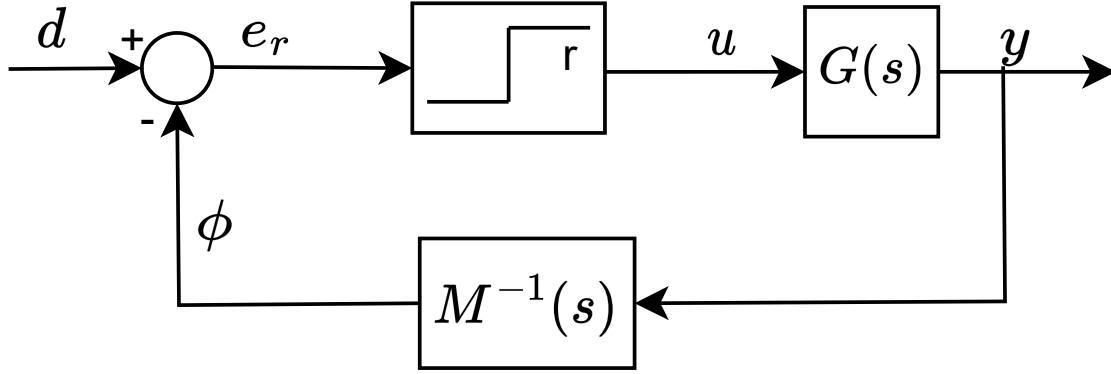


Şekil 2.3 Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetim Yapısı

2.4. Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim (GÇ-RKKD)

Belirsizlikler, parametre değişiklikleri ve bozucu etkiler, denetim uygulamalarındaki yaygın sorunlardır. Kayan kipli denetim (KKD), denetim başarımlı ölçütünü bu etkiler altında sağlamak için geliştirilmiş gürbüz bir denetim yöntemidir. KKD yöntemi genel olarak durum uzayı modeli ile kullanılmaktadır, ancak röle denetimli sistemler için giriş çıkış modelini kullanacak şekilde de tanımlanabilir. GÇ-RKKD yöntemi, sistem durumlarını bilmeye gerek duymadan, giriş çıkış modelinin görelî derecesi dikkate alınarak gürbüz denetim gerçekleştirilebilmesini sağlar. Bu bölümde tek giriş tek çıkışlı bir sistemde giriş çıkış modeli temel alınarak tanımlanan röle ile kayan kipli denetim yöntemi anlatılmaktadır [37]. GÇ-RKKD yapısının genel yapısı Şekil 2.4 ile gösterilmektedir.

Şekil 2.4 ile gösterilen yapıda $G(s)$ sistem aktarım işlevini ve $M(s)$ dayanak modelin aktarım işlevini ifade etmektedir. Ayrıca d dayanak girişini, e_r röle girişini, u denetim sinyalini, y çıkış sinyalini ve son olarak ϕ model aktarım işlevinin tersi ile süzgeçlenmiş çıkış sinyalini göstermektedir.



Şekil 2.4 Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim Yapısı

Denetim sinyali, r röle genliği olmak üzere Eşitlik 35 ile gösterilmektedir.

$$u = r \text{sign}(e_r) = \begin{cases} r & , \quad e_r \geq 0 \\ -r & , \quad e_r < 0 \end{cases} \quad (35)$$

Bu sistemde kayan kipin oluşması için gerek koşul Eşitlik 36 ile verilmiştir.

$$e_r(t) \dot{e}_r(t) < 0 \quad (36)$$

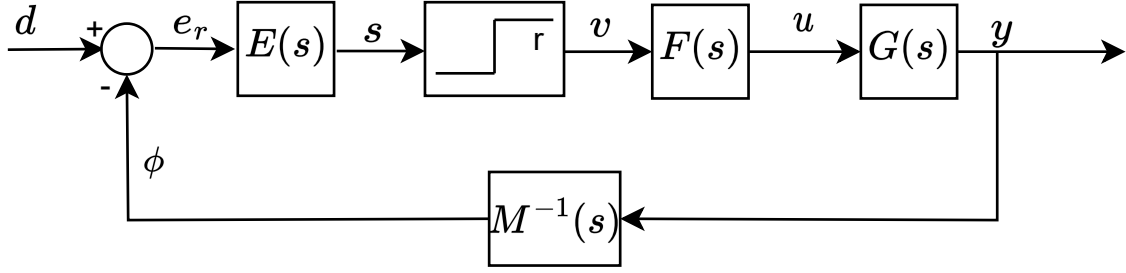
Sistemde hata pozitifken hatanın değişimi negatif, hata negatif iken hatanın değişimi pozitif ise kayan kipin oluştuğu söylenebilir. Böylece hata sinyali eşik değeri olarak belirlenen 0 (sıfır) değerini her geçtiğinde, tekrardan bu değere dönebilmektedir (Eşitlik 36). Bu koşul sağlandığı durumda sistem kayma yüzeyi olarak tanımlanan $e_r(t) = 0$ noktasına döner ve sistem kayma evresine geçer. Eşitlik 37, sistemin kayma evresindeyken kapalı döngü çıkışını göstermektedir.

$$\begin{aligned}
e_r &= 0 \\
d - \phi &= 0 \\
d - M^{-1}y &= 0 \\
y &= Md
\end{aligned} \tag{37}$$

Eşitlik 37, sistem kayan kipte çalışırken kapalı döngü sistem cevabının, yalnızca dayanak model aktarım işlevi $M(s)$ tarafından belirlendiğini göstermektedir. Dayanak model aktarım işlevinin durgun durum kazancının 1 olması durumunda kalıcı durum hatası oluşmamaktadır. Bu nedenle $M(0) = 1$ olacak şekilde bir aktarım işlevi seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca Eşitlik 36 ile verilen eşitsizliğin sağlanması için, yani kayan kipin oluşabilmesi için Eşitlik 38 ile verilen koşulun sağlanması, yani döngü aktarım işlevinin görelî derecesinin 1 olması gerekmektedir [38]. ρ görelî dereceyi, yani bir aktarım işlevinin kutup sayısı ile sıfır sayısı arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$\rho(M^{-1}(s)G(s)) = 1 \tag{38}$$

Eşitlik 35 incelendiğinde röle çıkışının eşik değerine bağlı olarak anlık değişimler yaptığı görülmektedir. Özellikle hata sıfır etrafındayken bu değişimlerin sık meydana gelmesi, sisteme uygulanan denetim sinyalinin sık değişmesine neden olmaktadır. Bu da fiziksel olarak sisteme zarar verebilecek ve çatırdama olarak adlandırılan bir etki ortaya çıkarabilmektedir. Ayrıca sistem modeli ve seçilen dayanak aktarım işlevi Eşitlik 38 ile verilen koşulu sağlamayabilir. Bu iki duruma karşı röle elemanının önüne ve arkasına süzgeçler yerleştirilerek hem görelî derece koşulunun sağlanması hem de röle çıkışının yumuşatılması sağlanabilmektedir. Şekil 2.5, $E(s)$ ve $F(s)$ süzgeçlerinin eklendiği genişletilmiş yapının öbek çizeneğidir.



Şekil 2.5 Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Genişletilmiş Denetim Yapısı

Genişletilmiş yapıda kayan kipin oluşması için gerekli görelî derece koşulu Eşitlik 39 ile verilmektedir.

$$\rho(E(s)M^{-1}(s)G(s)F(s)) = 1 \quad (39)$$

Ayrıca bu süzgeçler sayesinde röle genliği sistemin kullanabildiği en büyük denetim sinyalinden yüksek olabilmektedir. Kapalı döngü sistem çıkışının sabit bir dayanak sinyalini takip etmesi istendiğinde, röle genliğinin büyüklüğü Eşitlik 40 ile verilen şartı sağlayacak şekilde seçilmedilir, aksi takdirde $e_r(t)$ sıfıra ulaşamaz ve kayan kip elde edilemez.

$$|r| > \frac{|d|}{|G(0)|} \quad (40)$$

3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde Bölüm 2’de verilen denetleyiciler farklı sistemler üzerinde benzetim ortamında uygulanmaktadır. İlk bölümde denetleyiciler birinci derece kararlı bir sistem modeline uygulanmaktadır ve benzetim sırasında model parametreleri değiştirilerek denetleyicilerin başarımı incelenmektedir. İkinci bölümde ise birinci derece kararsız bir sistem modeli üzerinde uygulanmaktadır ve benzetim sırasında sistem girişine ve çıkışına basamak tipi bozucular verilerek denetleyicilerin bozucu bastırma başarımları incelenmektedir. Son olarak üçüncü bölümde bu hız denetleyicileri üzerine bir konum döngüsü eklenerek ardışık denetim yapısı oluşturulmakta ve benzetim ortamında test edilmektedir. Her bölümde elde edilen sonuçların grafikleri verilmekte ve yorumlanmaktadır.

Benzetim aşamasında sistem çıkışı üzerine, benzetimin daha gerçeğe yakın olabilmesi açısından beyaz gürültü eklenmektedir. Eklenen beyaz gürültünün ortalaması 0 ve standart sapması 0.022’dir.

3.1. Birinci Derece Kararlı Sistem Modeli

Bu bölümde Bölüm 2’de anlatılan denetleyiciler, birinci derece kararlı sistem modeli üzerine benzetim ortamında uygulanmaktadır. Benzetimin süresi 2.5 saniye ve örnekleme zamanı 500 mikrosaniyedir. Benzetimin t=1 saniyesinde model parametreleri değiştirilerek, denetleyicilerin model parametre değişimine karşı başarımı incelenmektedir.

Bu bölümde kullanılacak sistem modeli Eşitlik 41 ile gösterilmektedir. Benzetimin t = 1s anında a parametresi 2.85’ten 4.85’e yükselirken, b parametresi 33’ten 13.2 değerine düşmektedir.

$$G_1(s) = \frac{b}{s + a} = \frac{33}{s + 2.85} \quad (41)$$

Tablo 3.1 ile bu bölümde kullanılan parametreler verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımları ölçütü değerleri ile birlikte bu başarımları ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir. Son olarak $G_1(s)$ sistem modeli parametreleri a ve b tabloda yer almaktadır.

Tablo 3.1 $G_1(s)$ ile Yapılan Benzetimlerde Kullanılan Parametreler

ω_n	ζ	b	a	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	1	33	2.85	0.15 s	%0

Bu bölümde yer alan şekillerde birinci grafik dayanak girişini (d), istenen sistem çıkışını (y_i) ve sistem çıkışını (y) göstermektedir. İkinci grafik denetim sinyalini (u) ve üçüncü grafik hatayı (e_y) göstermektedir.

3.1.1. OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları

Şekil 3.1 ile OTüm denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Benzetim için kullanılan ve Eşitlik 11 ile hesaplanan denetleyici parametreleri Tablo 3.2 ile verilmektedir. OTüm denetleyicisinin $G_1(s)$ modeli için ürettiği cevap aşmasızdır ve durulma süresi 150 milisaniyedir. Model parametre değişimi sonrasında ürettiği cevapta aşma miktarının %5 olduğu ve durulma süresinin 170 milisaniyeye çıktığı görülmektedir. Model parametrelerinin değişiminden sonra hem durulma süresi hem de aşma miktarı istenilenleri sağlanamamaktadır. Şekil 3.1-a'da sistem çıkışı ile istenen çıkış arasında oluşan fark ve Şekil 3.1-c'de parametre değişimi sonrasında hatanın 0 değerine ulaşma süresinin artması da bu sonucu göstermektedir. Başarımların korunamama nedeni, denetleyici parametrelerinin yeni sistem modeli parametrelerine göre hesaplanmamış olmasıdır. Şekil 3.1-b incelendiğinde, parametre değişiminden sonra denetleyici daha büyük denetim sinyali üretmesine rağmen cevabın yavaş kaldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3.2 $G_1(s)$ için OTüm Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m
2.34	48.48	0

3.1.2. Özayarlama OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları

Şekil 3.2 ile SZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özayarlama OTüm denetleyici sonuçları gösterilmektedir. Önceki grafiklere ek olarak şekilde yer alan dördüncü (d) ve beşinci (e) grafikte kestirilen sistem modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır. Denetleyici parametreleri, Tablo 3.1 ile verilen ζ , ω_n değerleri ve SZÖEKK yöntemi ile kestirilen model parametreleri \hat{a} ve \hat{b} kullanılarak, Eşitlik 11 ile hesaplanmaktadır. Tablo 3.3 ile denetleyici için kullanılan diğer parametreler verilmektedir. Bu bölümde tabloda yer alan iki farklı unutmaya çarpanı (β_1 ve β_2) kullanılarak benzetimler yapılmaktadır. Bu sayede unutmaya çarpanının etkisi de incelenmektedir.

Tablo 3.3 $G_1(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici Parametreleri

m	α	β_1	β_2	$\hat{\theta}_0$	C(s)
0	10^{-7}	0	7	[0 0]	$s + 10$

Benzetim sonucunda elde edilen cevap incelendiğinde, aşma miktarının sistem parametre değişiminin öncesinde ve sonrasında %0 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde durulma süreleri de 150 milisaniye olarak ölçülmektedir. $t=1s$ anında parametre değişimi meydana geldikten sonraki ilk dayanak girişi değişiminde denetleyici daha yavaş bir cevap üretmektedir. β_2 değerini kullanan SZÖEKK parametre kestirimi $t=1.3s$ anında sistem parametrelerine yakınsadıktan sonra, sistem cevabının istenen çıkışa yakınsadığı görülmektedir. Özayarlama OTüm denetleyicinin başarımlı ölçütlerini sağladığı görülmektedir.

Şekil 3.2-d ve Şekil 3.2-e incelendiğinde β_1 değeri ile yapılan kestirimin ilk dayanak girişi değişiminde β_2 ile yapılan kestirim ile benzer sonuç verdiği görülmektedir. $\beta_1 = 0$ olduğu için eski değerler hiçbir zaman unutulmamaktadır. Bu da zaman ilerledikçe parametre kestiriminin eski değerlerin etkisinde kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle $t=1s$ zamanından sonraki dayanak girişi değişimlerinde β_2 değerini kullanan kestirim gerçek değerlere daha hızlı yakınsamaktadır. SZÖEKK yönteminde unutmaya çarpanının değişiminin doğrudan parametre yakınsama hızını etkilediği görülmektedir.

Şekil 3.2-a ve 3.2-b incelendiğinde sistem cevabı çıkışının parametre değişimi sonrasında zamanla istenen çıkışa yakınsadığı ve denetim sinyalinin de zamanla büyüdüğü görülmektedir. Şekil 3.2-d ve 3.2-e’de görüldüğü üzere kestirim algoritması zamanla değişen sistem modeli parametrelerine yakınsamaktadır.

3.1.3. TE-DKD Benzetim Sonuçları

Şekil 3.3 ile benzetim ortamında TE-DKD yapısının uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Tablo 3.1 ile gösterilen başarımlar ölçütleri dikkate alınarak TE-DKD yönteminin parametreleri hesaplanmaktadır. TE-DKD yöntemi parametrelerini belirleyecek \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri Eşitlik 42 ve 43 ile gösterilmektedir.

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1500 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\tilde{R} = 0.01 \quad (43)$$

Eşitlik 44, Eşitlik 27 ve 28 kullanılarak elde edilen kazanç matrisidir.

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 11.02 & -387.3 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Şekil 3.3-a incelendiğinde model parametre değişimi meydana geldiğinde TE-DKD yönteminin cevabının parametre değişiminden önceki cevaba benzer olduğu görülmektedir. Parametre değişimi öncesi ve sonrasında aşma miktarı %0 ve durulma süresi 140 milisaniyedir. Şekil 3.3-b’de görüldüğü üzere denetim sinyali büyüklüğü artmaktadır. Tablo 3.1’de yer alan başarımlar ölçütlerini parametre değişimi öncesi ve sonrasında da benzer cevaplar üreterek sağlamaktadır. Bu benzetim sonucunda TE-DKD yönetiminin benzetim çalışmalarında parametre değişimi karşısında oldukça yüksek başarımlar sergilediği söylenebilir.

3.1.4. GÇ-RKKD Benzetim Sonuçları

Benzetim ortamında GÇ-RKKD yönteminin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 3.4 ile gösterilmektedir. Şekilde yer alan dördüncü grafik dayanak sinyali ve sistem çıkışı arasındaki hata grafiğini gösterirken, beşinci grafik röle girişindeki hata sinyalini göstermektedir. GÇ-RKKD için birinci ve ikinci derece dayanak aktarım işlevleri kullanılmaktadır. $M_1(s)$ Eşitlik 45 ile verilirken, $M_2(s)$ Eşitlik 46 ile verilmektedir. $M_1(s)$ ve $M_2(s)$, Tablo 3.1 ile verilen başarımlar ölçütleri göz önüne alınarak seçilen aktarım işlevleridir.

$$M_1(s) = \frac{1600}{s^2 + 80s + 1600} \quad (45)$$

$$M_2(s) = \frac{40}{s + 40} \quad (46)$$

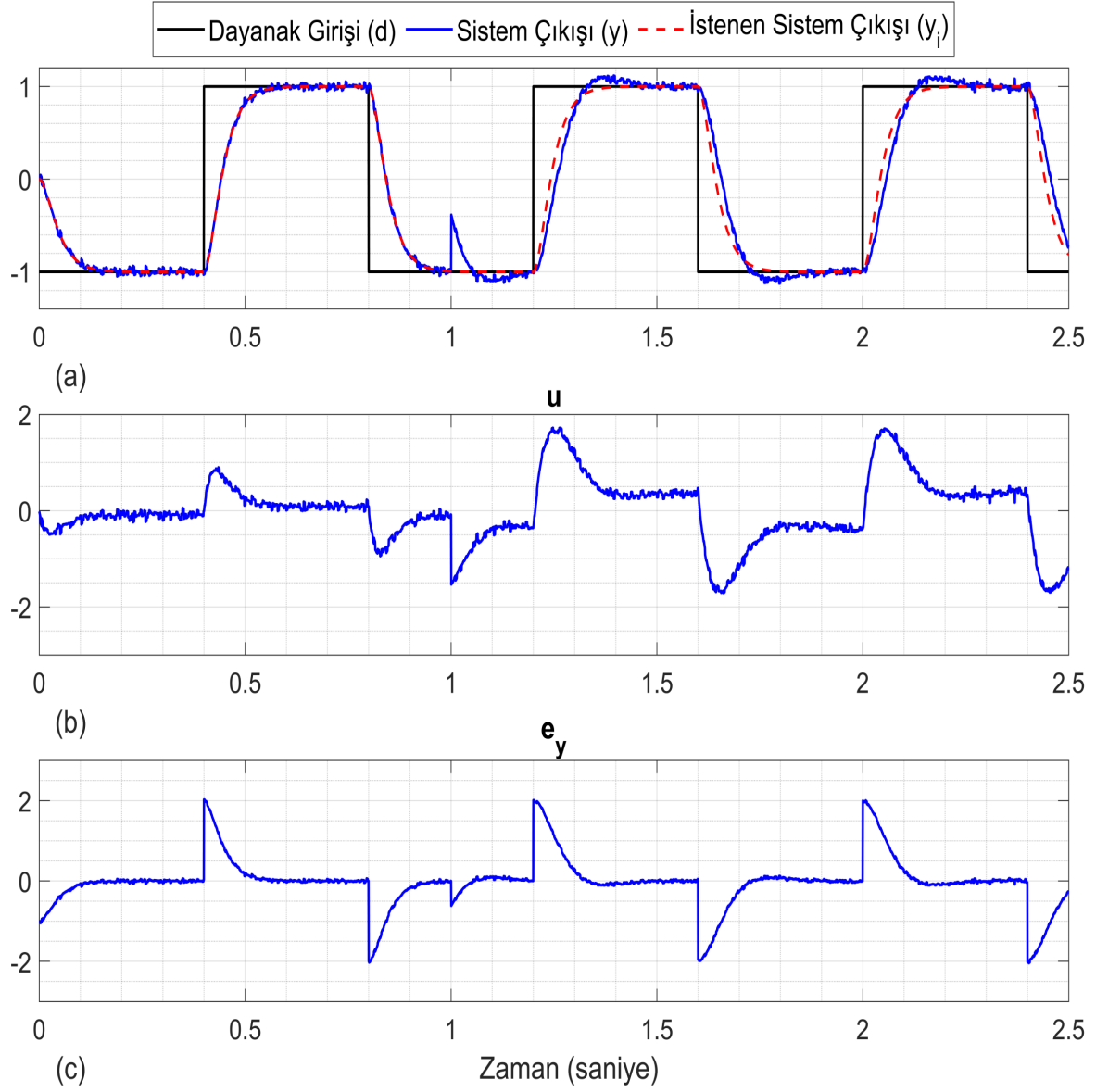
GÇ-RKKD yönteminde kullanılan rölenin genliği 30 birimdir. Göreli derece şartını sağlamak ve röle çıkışını yumuşatmak amacıyla röle çıkışı sonrasına süzgeç eklenmektedir. $M_1(s)$ için seçilen süzgeç $F_1(s)$, Eşitlik 47 ile gösterilmektedir. $M_2(s)$ için seçilen süzgeç $F_2(s)$, Eşitlik 48 ile verilmektedir.

$$F_1(s) = \frac{(25)^2}{(s + 25)^2} \quad (47)$$

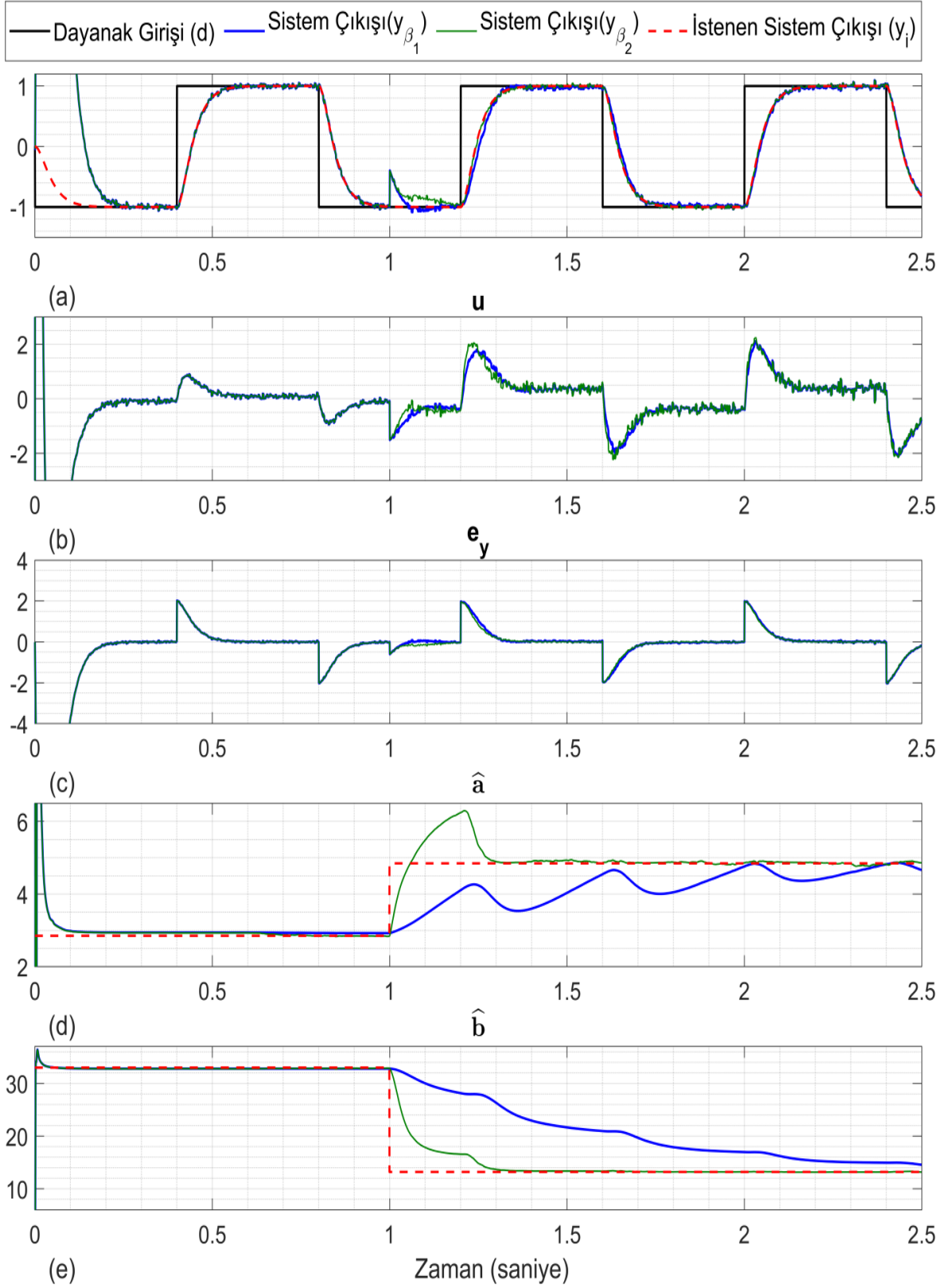
$$F_2(s) = \frac{25}{s + 25} \quad (48)$$

Şekil 3.4-a incelendiğinde GÇ-RKKD yönteminin aşmasız bir cevap verdiği görülmektedir. Model parametre değişiminden sonra da sistem cevabı aşmasızdır ve durulma süresi $M_1(s)$ için 150 milisaniye olarak ölçülürken, $M_2(s)$ için 140 milisaniye olarak ölçülmektedir. Durulma süresi ve aşma başarımlar ölçütünü sağladığı görülmektedir. Şekil 3.4-b incelendiğinde parametre değişimi sonrası denetim sinyali büyüklüğü artmaktadır. $M_2(s)$

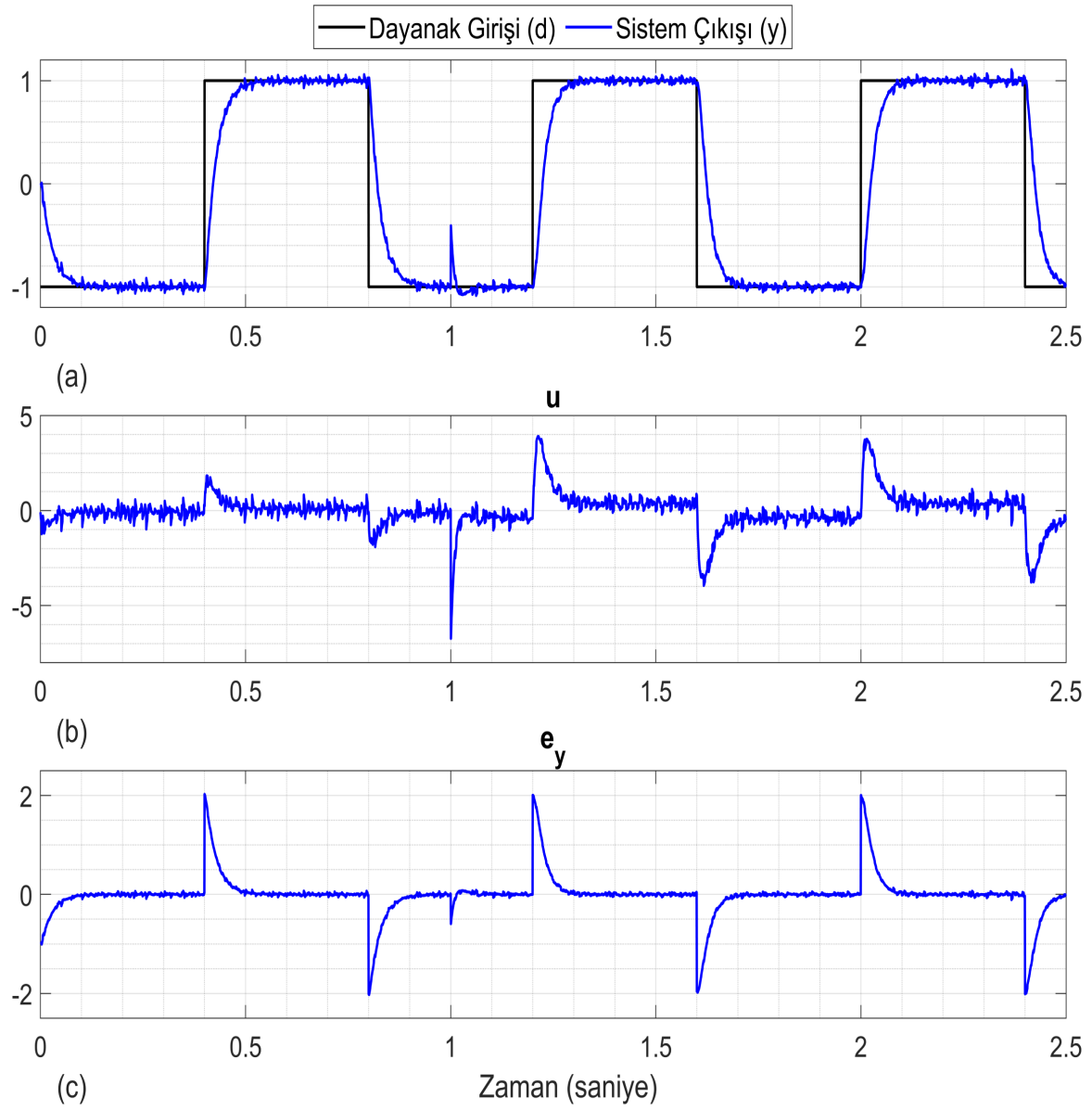
dayanak aktarım işlevinin seçildiği benzetim çalışmasında Şekil 3.4-e ile verilen röle girişi sinyalinin çok daha düşük olduğu görülmektedir.



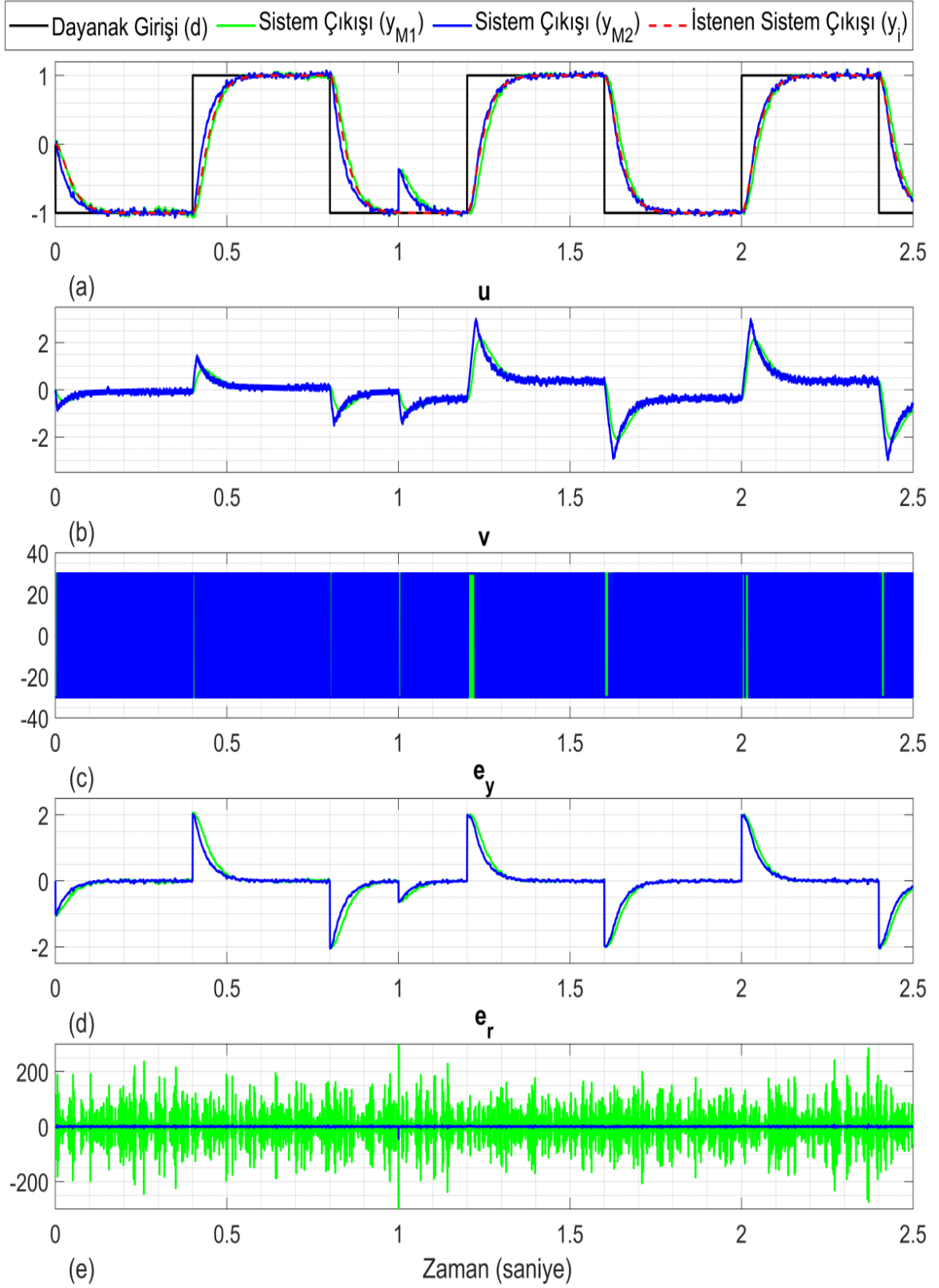
Şekil 3.1 $G_1(s)$ için OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları



Şekil 3.2 $G_1(s)$ için Özyarlamalı OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları



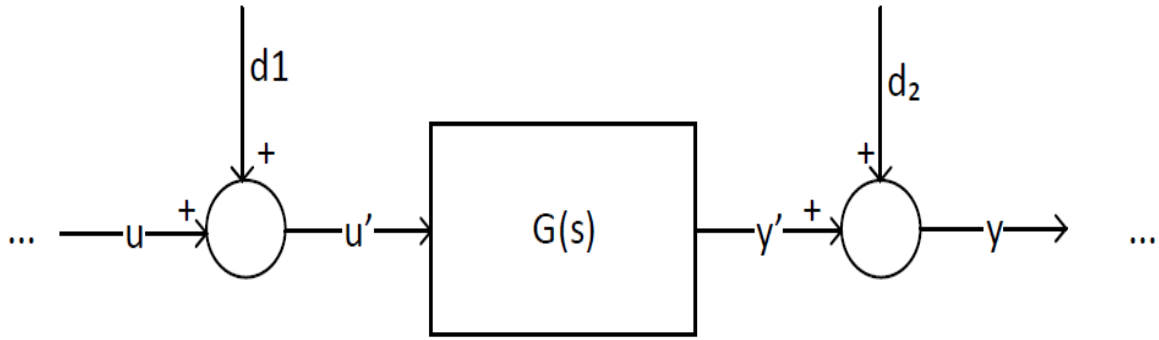
Şekil 3.3 $G_1(s)$ için TE-DKD ile Benzetim Sonuçları



Şekil 3.4 $G_1(s)$ için GÇ-RKKD ile Benzetim Sonuçları

3.2. Birinci Derece Kararsız Sistem Modeli

Bu bölümde Bölüm 2’de anlatılan denetleyiciler, Eşitlik 49 ile gösterilen birinci derece kararsız sistem modeline benzetim ortamında uygulanacaktır. Benzetim süresi 2.25 saniye ve örnekleme zamanı 500 mikrosaniyedir. Benzetim sırasında $t=0.85s$ anında sistem girişine 1 birimlik basamak tipi bozucu (d_1) uygulanmakta ve $t=1.25s$ anında uygulanan bozucu kaldırılmaktadır. Ardından $t=1.6s$ zamanında sistem çıkışına 0.3 birimlik basamak tipi bozucu (d_2) uygulanmaktadır. Bozucuların (d_1 ve d_2) sisteme uygulandığı noktalar Şekil 3.5 ile gösterilmektedir. Bu sayede denetleyicilerin başarımlarını sağlayıp sağlayamadıklarına ek olarak bozucu bastırma başarımları da incelenmektedir.



Şekil 3.5 $G_2(s)$ için Bozucu Girişleri Öbek Çizeneği

$$G_2(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{33}{s-15} \quad (49)$$

Tablo 3.4 ile bu bölümde kullanılan parametreler verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımlarını sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir. Son olarak $G_2(s)$ sistem modeli parametreleri tabloda yer almaktadır.

Tablo 3.4 $G_2(s)$ için Kullanılan Parametreler

ω_n	ζ	b	a	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	1	33	-15	0.15 s	%0

Bu bölümdeki şekillerde birinci grafik dayanak girişini (d), istenen sistem çıkışını (y_i) ve sistem çıkışını (y) içermektedir. İkinci grafik denetim sinyalini (u) ve üçüncü grafik hatayı (e_y) göstermektedir.

3.2.1. OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları

Benzetim için kullanılan denetleyici parametreleri Tablo 3.5 ile verilmektedir. Şekil 3.6 ile verilen sonuçlar incelendiğinde OTüm denetleyicisinin aşmasız bir şekilde istenen dayanak noktasına 150 milisaniyede ulaştığı görülmektedir. Sistem girişine bozucu uygulandığında OTüm denetleyicinin bozucuyu bastırma süresi 100 milisaniyedir. Sistem çıkışına bozucu uygulandığında 60 milisaniyede bastırılmaktadır. Şekil 3.6-a incelendiğinde sistem çıkışına etkileyen anlık bozucu kaynaklı sistem cevabının yavaşladığı görülmektedir.

Bozucu bastırma anında üretilen denetim girdisinin büyüklüğünün değişimi Şekil 3.6-b'de görülmektedir. Şekil 3.6-c ile hata grafiği verilmektedir. Grafikler incelendiğinde çıkışa uygulanan bozucunun girişe uygulanan bozucuya göre daha çabuk bastırıldığı görülmektedir.

Tablo 3.5 $G_2(s)$ için OTüm Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m
2.87	48.48	0

3.2.2. Özayarlama OTüm Denetleyici Benzetim Sonuçları

Şekil 3.7 ile SZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özayarlama OTüm denetleyici sonuçları gösterilmektedir. Önceki grafiklere ek olarak şekilde yer alan dördüncü (d) ve beşinci (e) grafiklerde kestirilen sistem modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır. Tablo 3.6 ile SZÖEKK yönteminin kullandığı parametreler verilmektedir. İki farklı unutma çarpanı için benzetim tekrarlanarak grafiklerde gösterilmektedir.

Benzetim sonucunda Özayarlama OTüm denetleyici 150 milisaniye durulma süresine sahip %0 aşmalı cevap üretmektedir. Sistem çıkışına uygulanan bozucuyu 40 milisaniyede bastırmaktadır. Girişe uygulanan bozucu incelendiğinde bastırma süresi 90 milisaniyedir.

Tablo 3.6 $G_2(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici Parametreleri

m	α	β_1	β_2	$\hat{\theta}_0$	C(s)
0	10^{-7}	4	20	[0 0]	$s + 10$

Bozucu bastırma anında üretilen denetim girdisinin büyüklüğünün değişimi Şekil 3.7-b'de görülmektedir. Şekil 3.7-c ile hata grafiği verilmektedir. Şekil 3.7-d ve 3.7-e'de çıkış sinyaline eklenen bozucu sonrasında model parametrelerini değiştirdiği ve kestirim yönteminin yeni parametrelere yakınsadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3.7-d ve Şekil 3.7-e incelendiğinde ilk saniyelerde dayanak sinyali değişiminde SZÖEKK yönteminin başlangıç parametreleri aynı olduğu için β_1 ve β_2 için benzer parametre yakınsaması gösterdiği görülmektedir. Ancak daha sonraki dayanak sinyali değişimlerinde β_2 için yapılan benzetimde parametre kestiriminin, β_1 ile yapılan benzetime göre daha hızlı olduğu görülmektedir. β_1 unutmaya çarpanı daha büyük bir değer olduğu için geçmiş değerlere daha çok önem vermektedir, bu nedenle kestirim yöntemine yeni gelen verilerin etkisi daha az olmaktadır. Şekil incelendiğinde hem dayanak sinyali değişimlerinde hem de sistem çıkışına uygulanan bozucu sonrası kestirimin yakınsama hızının β_1 için daha düşük olduğu görülmektedir.

3.2.3. TE-DKD Benzetim Sonuçları

Sistem modeline benzetim ortamında TE-DKD yönteminin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 3.8 ile gösterilmiştir. Tablo 3.4 ile gösterilen başarımlar ölçütleri dikkate alınarak TE-DKD parametreleri hesaplanmaktadır. TE-DKD parametrelerini belirleyecek \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri Eşitlik 50 ve 51 ile gösterilmektedir.

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 900 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\tilde{R} = 0.01 \quad (51)$$

Eşitlik 52, Eşitlik 27 ve 28 kullanılarak elde edilen \tilde{K} kazanç matrisidir.

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 11.33 & -300.0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

Şekil 3.8 incelendiğinde TE-DKD yönteminin aşmasız bir cevap verdiği görülmektedir. Durulma süresi 135 milisaniyedir. Benzetim sırasında girişe basamak tipi bozucu uygulandığında bozucunu bastırma süresi 45 milisaniye iken, sistem çıkışın uygulanan bozucunun bastırılma süresi 10 milisaniyedir.

Şekil 3.8-b incelediğinde denetleyicinin çıkışa uygulanan bozucu için anlık yüksek denetim sinyali ürettiği görülmektedir.

3.2.4. GÇ-RKKD Benzetim Sonuçları

Şekil 3.9 ile verilen grafikte GÇ-RKKD yönteminin birinci derece kararsız bir sistem modeli üzerinde uygulanması ile elde edilen sonuçlar ve bozucu bastırma başarımı gösterilmektedir. Şekilde yer alana dördüncü grafik dayanak girişi ve sistem çıkışı arasındaki hata grafiğini gösterirken, beşinci grafik röle girişindeki hata sinyalini göstermektedir. GÇ-RKKD yönteminde dayanak aktarım işlevi, Eşitlik 53 ile gösterilen ikinci derece bir aktarım işlevidir.

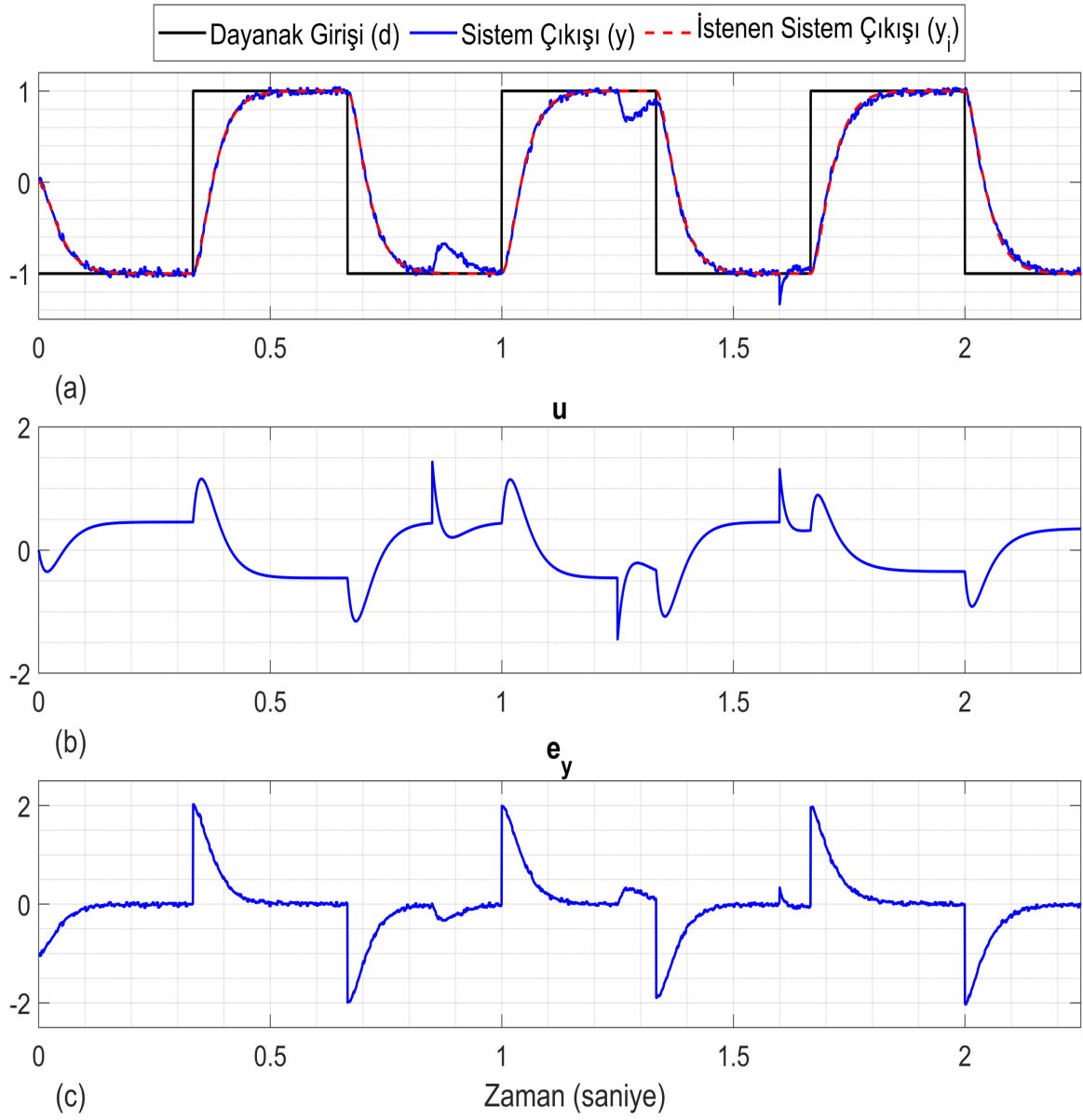
$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 80s + 1600} \quad (53)$$

GÇ-RKKD yönteminde kullanılan rölenin genliği 30 birim olarak seçilmektedir. Röle sonrasına konulan süzgeç $F(s)$ ise Eşitlik 54 ile gösterilmiştir.

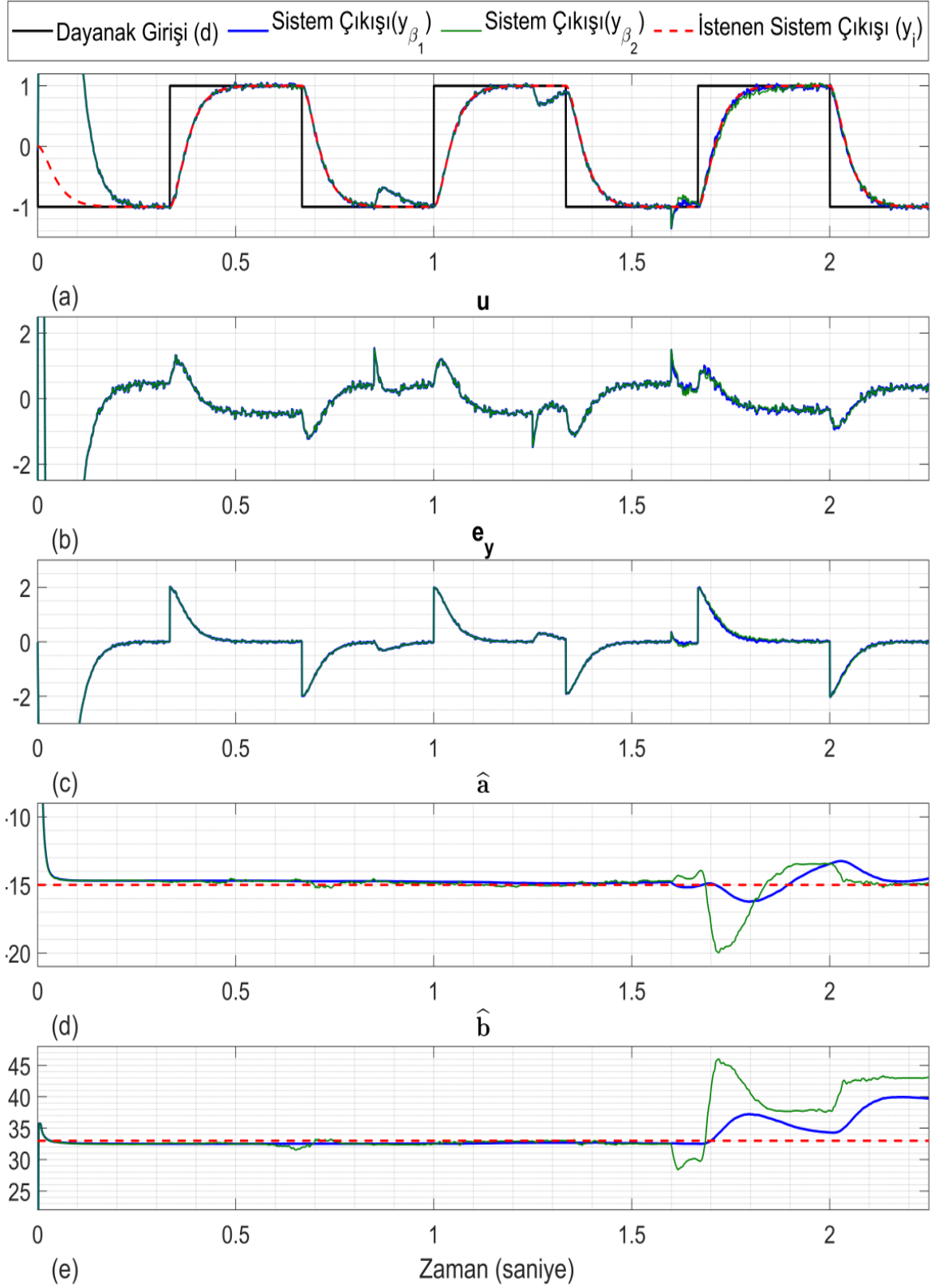
$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s + 25)^2} \quad (54)$$

Şekil 3.9-a incelendiğinde GÇ-RKKD yönteminin durulma süresi 150 milisaniye olan aşmasız bir cevap verdiği görülmektedir. Giriş ve çıkışa basamak tipi bozucu geldiği zaman, denetleyici her ikisi için de benzer bir cevap vermektedir. Bozucu bastırma süresi 80 milisaniye olarak ölçülmektedir.

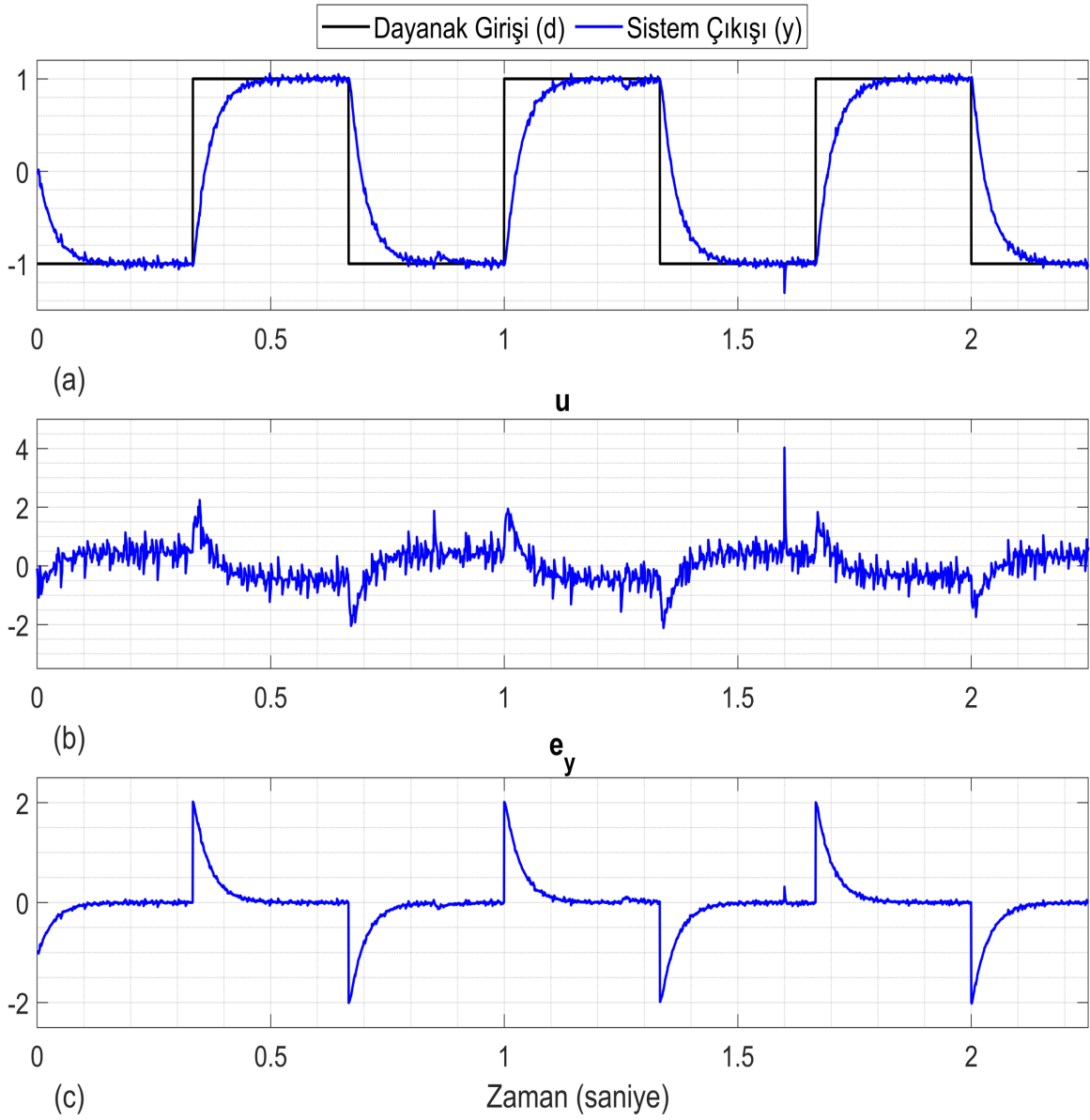
Benzetim çalışmalarında kullanılan hız denetleyicileri incelendiğinde, OTüm denetleyicinin parametre değişimi ve bozucu etkiler altında başarımının düşük olduğu görülmektedir. Özayarlama OTüm denetleyici parametre değişimi sonrasında istenen başarımları sağlayabilmektedir ancak öncelikle değişen sistem parametrelerine yakınsaması gerekmektedir. Sistemin değişen parametrelerine yakınsadıkça sistem cevabı iyileşmektedir. Bu nedenle OTüm denetleyiciden daha iyi bir denetim metodu olduğu söylenebilmektedir. TE-DKD yapısı benzetim ortamında bozucu bastırma başarımı en yüksek olan denetleyicidir. Ayrıca parametre değişimlerine karşı gürbüz bir davranış göstermektedir. GÇ-RKKD yapısının parametre değişimi sonrasında istenen başarımlar ölçütlerini sağladığı görülmektedir. TE-DKD yapısı bozucu bastırma performansı olarak daha iyi sonuç vermektedir. Ancak GÇ-RKKD yapısı sistem modelinin bilinmesine gerek kalmadan, sadece görece derecede bilgisine bağlı olarak kullanılabilir.



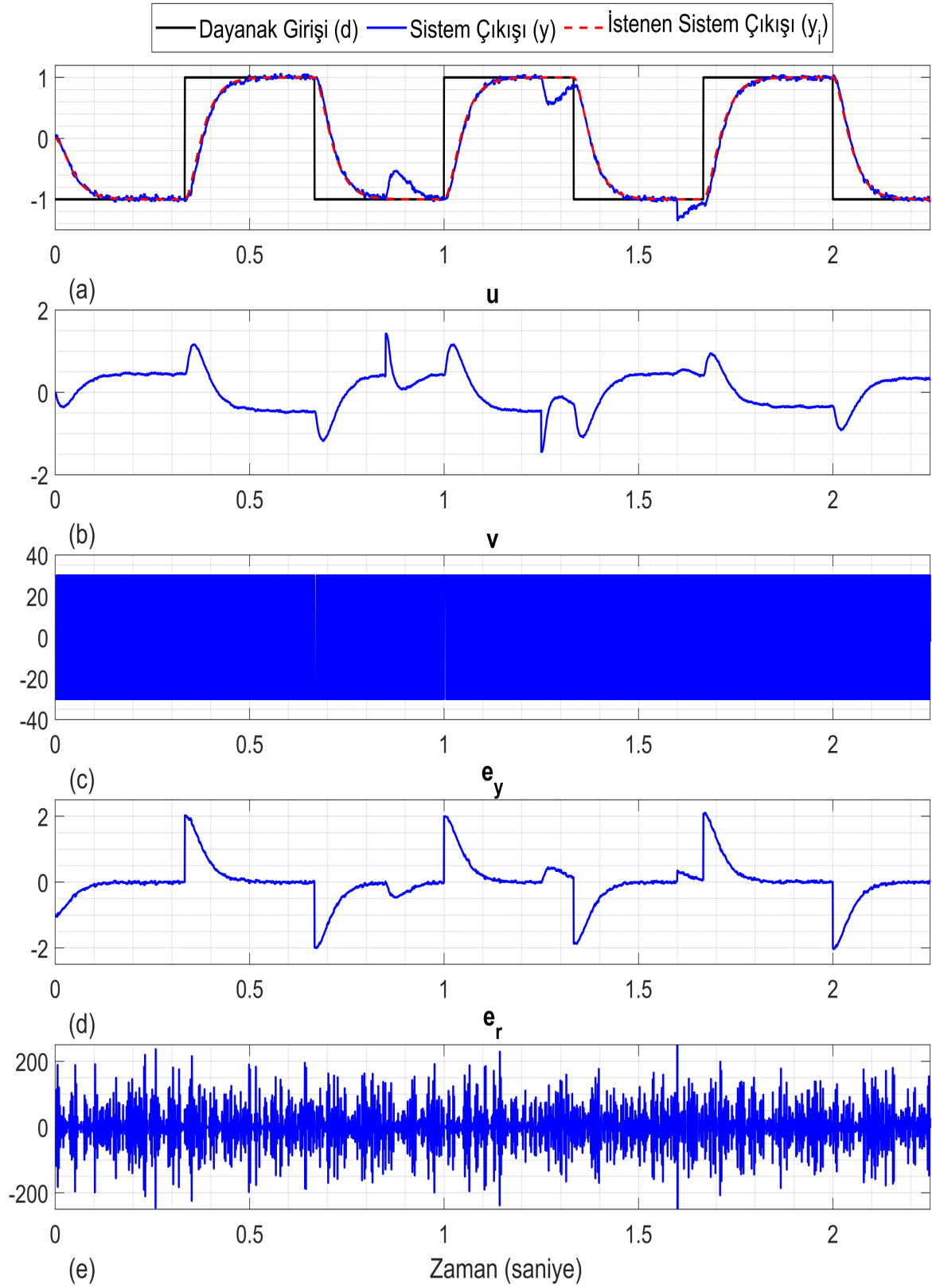
Şekil 3.6 $G_2(s)$ için OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları



Şekil 3.7 $G_2(s)$ için Özayarlama OTüm Denetleyici ile Benzetim Sonuçları



Şekil 3.8 $G_2(s)$ için TE-DKD ile Benzetim Sonuçları



Şekil 3.9 $G_2(s)$ için GÇ-RKKD ile Benzetim Sonuçları

3.3. Pozisyon Denetimi Benzetim Sonuçları

Bu bölümde sistem modeli Eşitlik 55 ile verilen birinci derece bir aktarım işlevinin konum denetimi, benzetim ortamında ardışık denetim ile gerçekleştirilecektir. Dış döngüde konum denetleyicisi olarak OTür (Oransal-Türevsel) denetim kullanılmaktadır. İç döngüde ise Bölüm 2’de anlatılan denetleyicilerden seçilen Özyarlamalı OTüm Denetleyici ve GÇ-RKKD yapısı kullanılmaktadır. RKKD yapısının seçilmesinin nedeni denetim yönteminin bilindiği kadarıyla daha önce bir gimbal sistemi üzerinde denendiği bir akademik çalışmanın bulunmamasıdır. Bir gürbüz bir uyarlamalı denetim yöntemi denenmesi amacıyla RKKD yapısı ile birlikte tercih edilen bir diğer denetleyici Özyarlamalı OTüm denetleyicidir. Benzetim 2.5s sürmektedir ve örnekleme zamanı 500 mikrosaniyedir. $t=1.25s$ anında a parametresi 2.85’ten 5.7’ye yükselirken, b parametresi 33’ten 16.5 değerine düşmektedir.

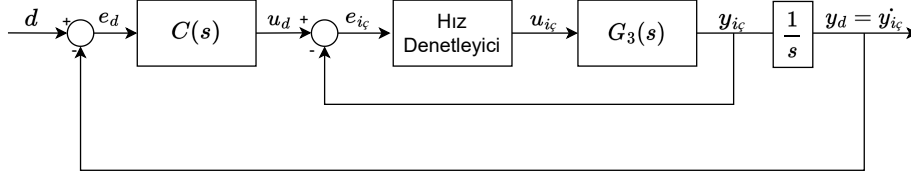
$$G_3(s) = \frac{b}{s+a} = \frac{33}{s+2.85} \quad (55)$$

İç döngüde yer alan hız denetleyicilerinin tasarımı için kullanılan başarımlar ölçütleri Tablo 3.7 ile verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımlar ölçütü değerleri ile birlikte bu başarımlar ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir.

Tablo 3.7 Ardışık Denetim Hız Denetleyicileri için Kullanılan Başarımlar Kriterleri

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	1	0.15 s	%0

Şekil 3.10 ile bu bölümde kullanılan ardışık denetim yapısını gösteren öbek çizeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Ardışık Denetim Öbek Çizeneği

Bu hız denetleyicileri tasarlanırken tabloda verilen başarımların sağlanmasını sağlayan ikinci derece bir aktarım işlevi istenen sistem cevabı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle iç döngünün kapalı döngü aktarım işlevi ikinci derece bir aktarım işlevi olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.10 ile verilen çizim incelendiğinde konum döngüsünün çıkışında bir tümlev terimi olduğu görülmektedir. Bu nedenle konum döngüsünde denetlenecek sistemin aktarım işlevi Eşitlik 56 ile gösterildiği gibi kabul edilmektedir. Bu aktarım işlevi, hız döngüsünün kapalı döngü aktarım işlevinin tümlev terimi ile çarpılmasıyla elde edilmektedir.

$$G_p(s) = \frac{t}{s^3 + ks^2 + ts} = \frac{1600}{s^3 + 80s^2 + 1600s} \quad (56)$$

Pozisyon denetimi için seçilen denetleyici OTür denetimdir ve Eşitlik 57 ile gösterilmektedir.

$$C(s) = K_p + K_d s \quad (57)$$

Eşitlik 56 ve 57 ile oluşturulan denetim yapısının kapalı döngü aktarım işlevi Eşitlik 58 ile gösterilmektedir.

$$T_p(s) = \frac{K_d t s + K_p t}{s^3 + ks^2 + (K_d t + t)s + K_p t} \quad (58)$$

Denetleyici parametrelerinin seçimi için istenen sistem cevabını veren bir 3. derece karakteristik denklem seçilmektedir ve seçilen denklem Eşitlik 59 ile verilmektedir.

$$\Delta_i(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + \gamma\omega_n) \quad (59)$$

Kapalı döngü aktarım işlevinin kutuplarını istenen cevabı veren karakteristik denkleme eşitleyerek denetleyici parametreleri bulunabilmektedir. Parametrelere bağlı olarak denetleyici parametrelerinin nasıl hesaplanabileceği Eşitlik 60 ile gösterilmektedir.

$$\gamma = \frac{k}{w_n} \quad K_d = \frac{(2\zeta\gamma + 1)\omega_n^2 - t}{t} \quad K_p = \frac{\gamma\omega_n^3}{t} \quad (60)$$

Eşitlik 58 ile verilen aktarım işlevinin parametreleri $\omega_n = 14$ ve $\zeta = 0.9$ olarak seçilmektedir. Eşitlik 60 ile verilen eşitlikler kullanılarak konum denetleyici parametreleri $K_p = 7.45$ ve $K_d = 0.035$ olarak hesaplanmaktadır.

Bu bölümde verilen şekillerde yer alan birinci grafikte dayanak girişi (d) ve sistem çıkışı (y) yer almaktadır. İkinci grafikte denetim sinyali (u_d) ve üçüncü grafikte dayanak girişi ve sistem çıkışı arasındaki hata (e_d) gösterilmektedir.

3.3.1. İç Döngü: Özayarlama OTüm Denetim

Bu bölümde iç döngüde Özayarlama OTüm Denetleyicinin kullanıldığı konum denetiminin sonuçları incelenmektedir. Tablo 3.8 içerisinde parametre kestirimi için kullanılan SZÖEKK yönteminin parametreleri yer almaktadır.

Tablo 3.8 Ardışık Denetim için SZÖEKK Yöntemi Parametreleri

α	β	$\hat{\theta}_0$	C(s)
10^{-7}	7	[0 0]	$s + 10$

Şekil 3.11 ile konum döngüsü sonuçları verilmektedir. Şekil 3.12 ile Özayarlama OTüm hız denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde dördüncü ve beşinci grafikte SZÖEKK yönteminin kestirdiği model parametrelerinin (\hat{a} ve \hat{b}) zamana bağlı grafiği yer almaktadır.

Şekil 3.11 incelendiğinde birinci dayanak sinyali değişiminde konuma aşmalı oturduğu, daha sonraki dayanak sinyali değişiminde bu aşmanın ortadan kalktığı görülmektedir. Şekil 3.12-d ve 3.12-e incelendiğinde SZÖEKK yönteminin parametre kestiriminin ancak ikinci dayanak sinyali değişimi ile birlikte yakınsadığı anlaşılmaktadır. Parametrelerin gerçek değerlere yeterince yakınsaması ile birlikte konum denetiminin başarımı da iyileşmektedir.

$t=1.25s$ anında model parametrelerinin değişiminin etkisi Şekil 3.11'de görülmektedir. Model parametrelerinde meydana gelen değişimin konum denetiminin başarımı üzerinde az bir etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 3.12 incelendiği parametre değişimi sonrası 2.2 saniyede yeni model parametrelerine SZÖEKK yöntemi yakınsamaktadır.

3.3.2. İç Döngü: GÇ-RKKD

Bu bölümde iç döngüde GÇ-RKKD yönteminin kullanıldığı konum denetiminin sonuçları verilmektedir. Şekil 3.13 ile konum döngüsü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.14 ile GÇ-RKKD denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde yer alan üçüncü grafikte röle girişi gösterilmektedir. Dördüncü grafik dayanak sinyali ve sistem çıkışı arasındaki hatanın grafiğidir. Son olarak beşinci grafikte röle girişi yer almaktadır.

Eşitlik 61 ile dayanak aktarım işlevi $M(s)$ gösterilmektedir.

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 80s + 1600} \quad (61)$$

Eşitlik 39 ile verilen görelî derece şartını sağlamak için röle çıkışına Eşitlik 62 ile gösterilen ikinci derece süzgeç eklenmektedir.

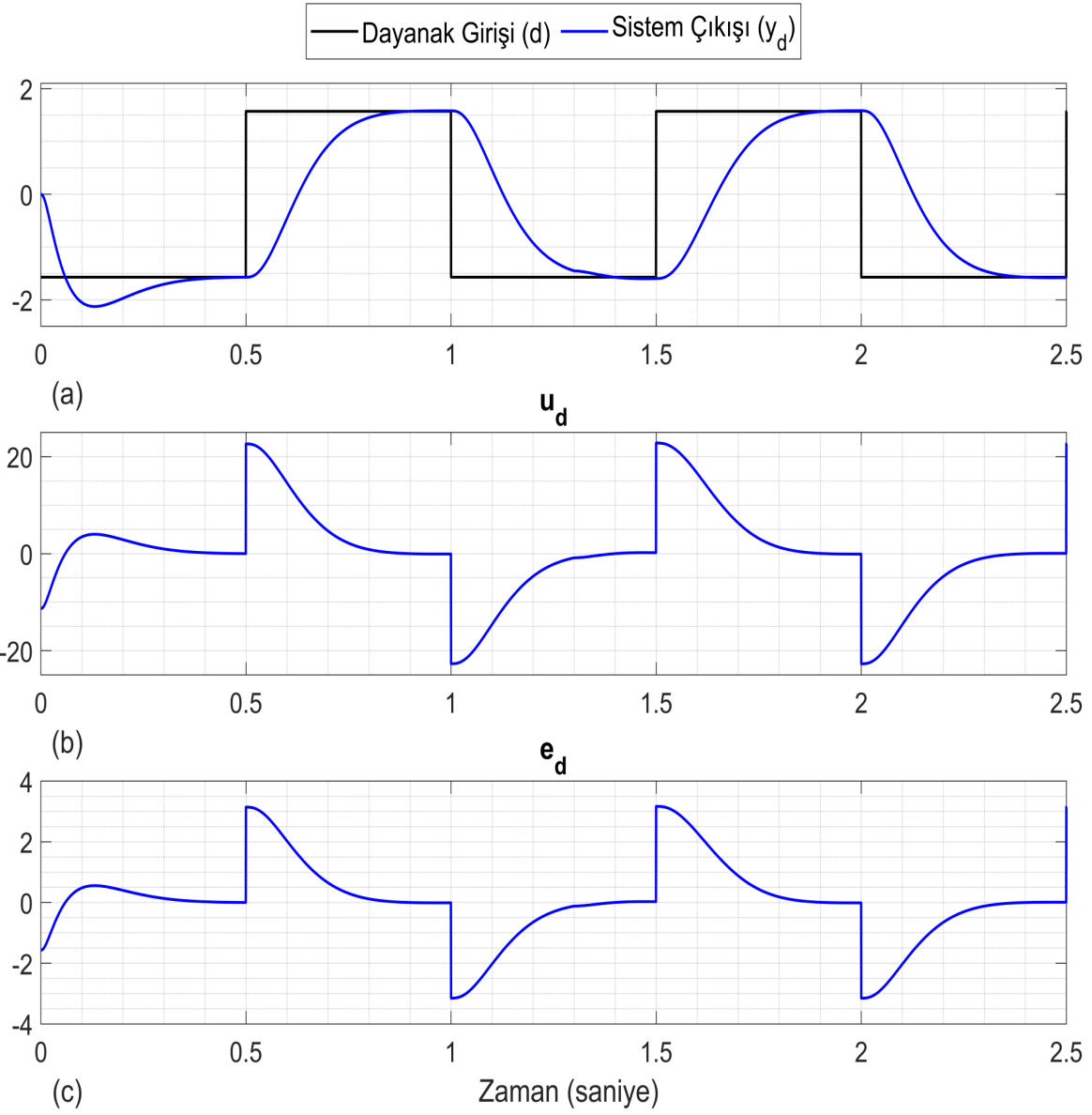
$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s + 25)^2} \quad (62)$$

Şekil 3.13 incelendiğinde, Özayarlmalı OTüm denetleyiciden farklı olarak ilk dayanak noktası değişiminde de konum denetiminin aşmasız cevap verdiği görülmektedir. $t=1.25$

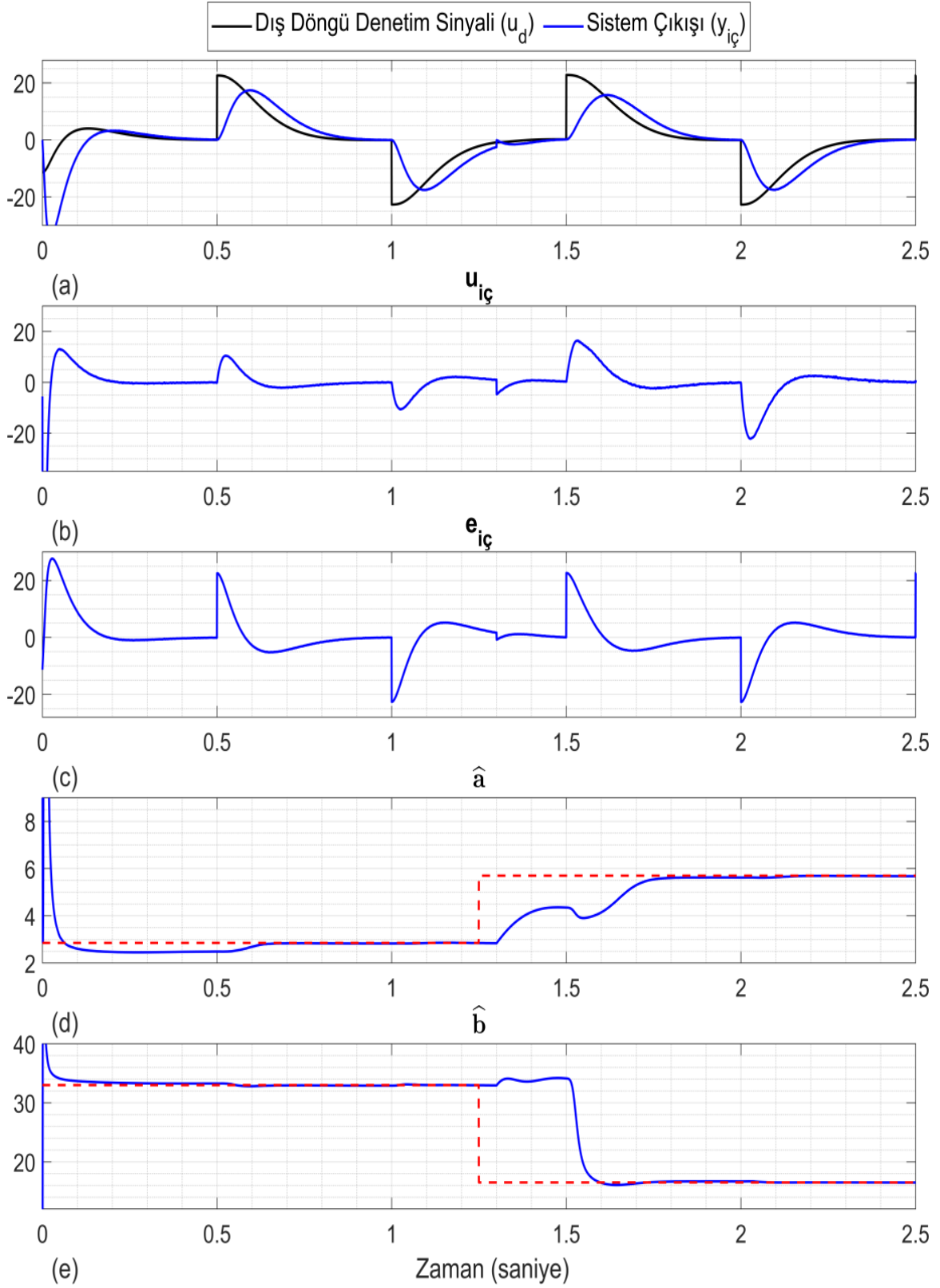
saniye anından meydana gelen model parametre değişimi sonrası sistem cevabında anlık bir değişimi meydana gelse de, devam eden zamanda konum denetiminin başarımı korunmaktadır.

şekil 3.13-a incelendiğinde hız denetim başarımının parametre değişimi öncesi ve sonrasında benzer olduğu, şekil 3.13-b ile görüleceği üzere parametre değişimi sonrası denetim sinyali büyüklüğünün arttığı görülmektedir.

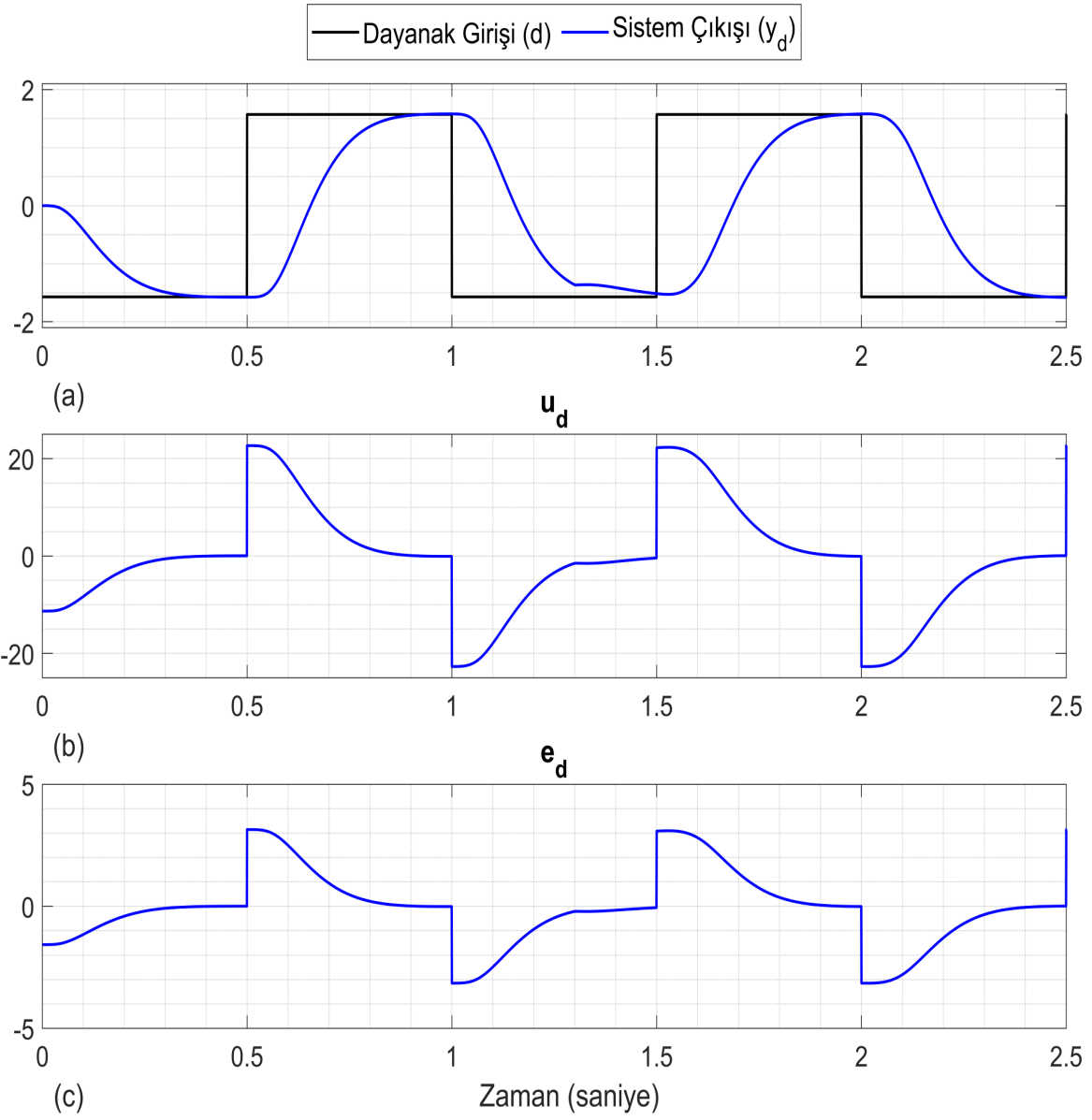
Her iki hız denetleyicisinin de kullanıldığı konum döngülerinde elde edilen sistem cevabı benzerdir. Parametre değişimi öncesinde ve sonrasında konum döngüsünün başarımı korunmaktadır. İ döngüde yer alan hız denetleyicileri incelendiğinde, G-RKKD yapısının Uyarlamalı OTüm denetleyicisinden daha düşük denetim sinyali komutu ürettiği görülmektedir. Ancak parametre değişimi esnasında sistem çıkışında meydana gelen anlık bozulma daha fazla olmaktadır. Ayrıca G-RKKD yapısı herhangi bir parametre yakınsamasını beklemeden yeni model parametrelerine uygun cevap üretebilmektedir. Uyarlamalı OTüm denetleyicisinin grafiği incelendiğinde, kestirim yönteminin değişen parametrelere yakınsamasının 0.6 saniye sürdüğü görülmektedir. Uyarlamalı OTüm denetleyicisinin başarımı parametreler yakınsadıkça iyileşmektedir.



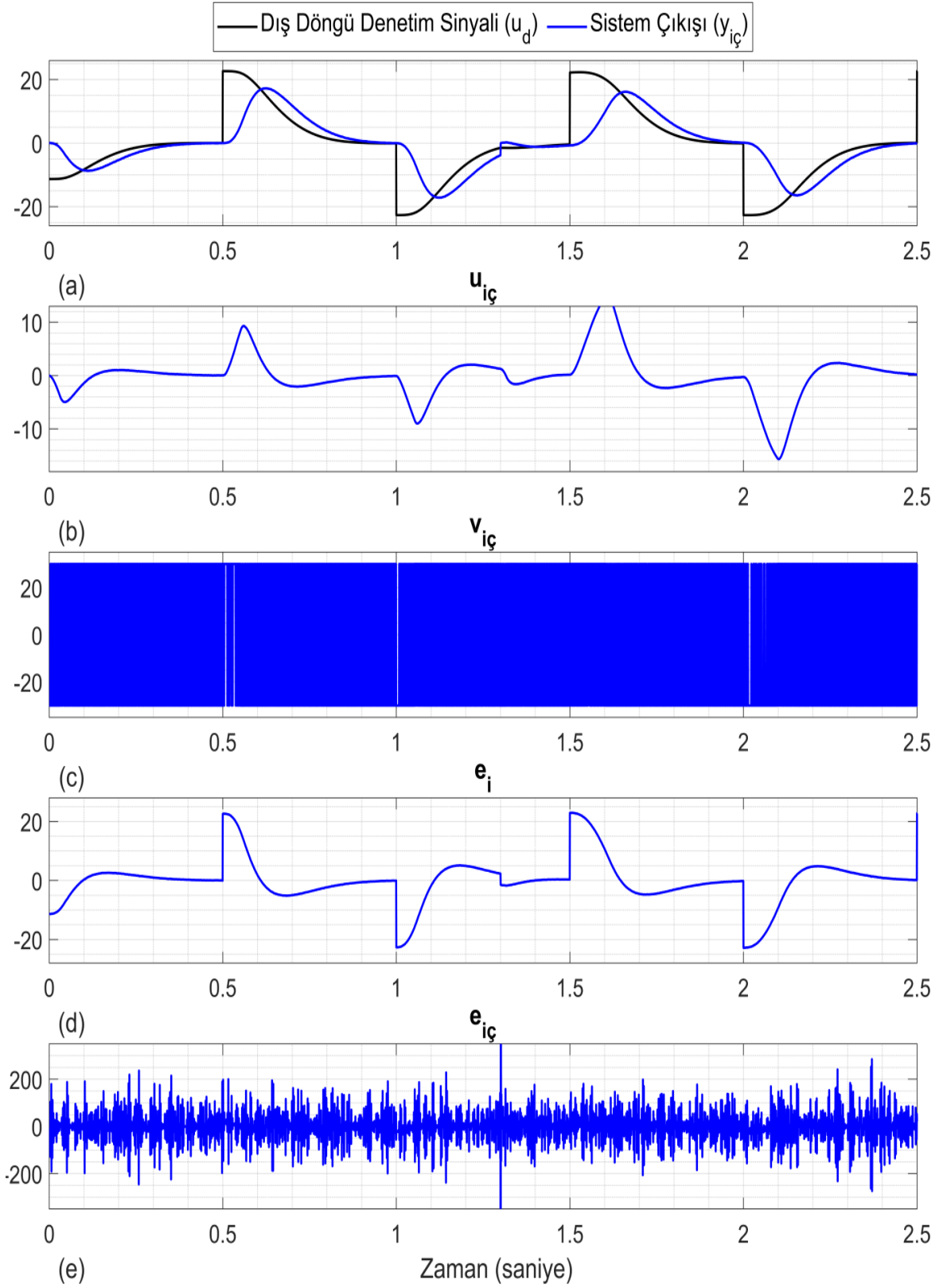
Şekil 3.11 Pozisyon Denetimi (İç Döngü: Özyarlamalı OTüm)



Şekil 3.12 $G_3(s)$ için Özyarlamalı OTüm Hız Denetimi



Şekil 3.13 Pozisyon Denetimi (İç Döngü: GÇ-RKKD)



Şekil 3.14 $G_3(s)$ için GÇ-RKKD Hız Denetimi

4. UYGULAMA

Bu bölümde Bölüm 2 ve Bölüm 3'te anlatılan yöntemlerin iki eksen bir gimbal sisteminin bir eksenine uygulanması ile elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Bu bölüm kapsamında ilk olarak denetleyiciler gimbal ekseninin hız denetimi için kullanılmaktadır. Ardından ardışık denetim ile konum denetimi yapılmaktadır. Ardışık denetimin iç döngüsünde Bölüm 2'de anlatılan denetleyiciler arasından seçilen iki adet denetleyici kullanılmaktadır.

Kullanılan sistem askeri amaçla üretilen bir gimbal sistemidir. Bu nedenle kütle dengeleme ve mekanik üretimi çok hassas cihazlar yardımı ile yapılmaktadır. Hassas ayarlamalar yardımıyla iki eksen arasındaki etki minimum seviyeye inmektedir. Bu bilgiler göz önüne alındığında iki eksen birbirinden bağımsız olarak düşünülebilir. Bu nedenle iki eksen bir gimbalin bir eksenini için tasarlanan denetleyicinin diğer eksen için de, diğer eksenin kendi modeli kullanılarak, çalışacağı varsayımı yapıldığı için bu çalışmada gimbal sisteminin tek eksenini üzerinde denetleyici uygulamaları yapılmıştır.

Askeri platformların üzerine takılan sistemlerin olası tüm hava koşullarında ve sıcaklıklarda çalışması istenmektedir. Özellikle hava platformlarının, hava sıcaklığının $-40^{\circ}C$ seviyelerine kadar düştüğü yüksek irtifalarda bulunduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu tip askeri platformların üzerinde yer alan sistemlerin bu düşük sıcaklık koşulları altında çalışabilmesi istenmektedir.

Bu çalışmada yöntemler sisteme uygulanırken sistem ilk önce oda sıcaklığında, ardından $-40^{\circ}C$ sıcaklığında olan bir ortamda bulundurulmuştur. Böylece sistem modelindeki değişimlere yöntemlerin nasıl tepki verdikleri incelenmiştir.

Bu bölümde ilk olarak uygulamada kullanılan sistem tanıtılmaktadır ve doğrusal matematiksel modeli elde edilmektedir. Ardından uygulama sonuçlarına yer verilmektedir.

4.1. Uygulamada Kullanılan Sistem

Gimbal sistemleri askeri platformlar üzerine takılan, bir kullanıcı yardımıyla veya otonom şekilde üzerinde taşıdığı faydalı yükü istenilen hedeflere belirli bir hassasiyet ile yönlendirebilen sistemlerdir. Bu faydalı yük kamera, teleskop, radar, lazer veya ateşli bir silah olabilir [39]. Üzerinde kamera yer alan ve gözetleme, hedef takip ve hedef işaretleme gibi işlevleri yerine getiren gimbal sistemlerine elektro-optik gimbal sistemleri denilmektedir. Elektro-optik gimbal sistemlerinin denetleyicilerinden beklenen temel görev platformdan ve çevreden gelen bozucu etkilerden en az etkilenerek görüntü üzerindeki bozulmaları enküçültmek ve gimbalin hedefe bakma, hedefi takip etme işlevini aksatmadan yerine getirebilmesini sağlamaktır [40].

Elektro-optik gimbal sistemleri [1] genellikle 2 eksenli oluşmaktadır. Üzerinde bulunduğu platform hareket ettiğinde kameranın bakış hattı üzerinde oluşan dönme hareketinin tersi bir hareketi yaparak platform hareketinin görüntü üzerindeki etkisinin minimuma indirilmesi amaçlanır. Bunu sağlamak için gimbal üzerine genellikle bir adet dönüölçer algılayıcı yerleştirilir. Bu algılayıcının tespit ettiği hareketin tersi yönde bir hareket yapılır ve görüntü üzerindeki hareketin ve titreşimin belirli bir hassasiyet altında sıfırlanması sağlanır [2].

Savunma sanayisinde kullanılan gimbal sistemlerinin askeri operasyonlar esnasında en zorlu hava şartlarında dahi çalışması beklenmektedir. Bu açıdan bakıldığında yukarıda anlatılan dönüölçer takibi konusunda sistemleri en çok zorlayan durumların başında sıcaklık değişimi gelmektedir. Gimbal sistemi sıfırın altı sıcaklık şartlarında iken sistemin sürtünmesi ciddi miktarda artmaktadır ve bu nedenle sistem modeli değişmektedir. Bu nedenle bu sistemlerde kullanılan denetleyici yapılarının model değişimlerine karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu bölümde hem farklı denetim yapılarının denetim performansı hem de model parametrelerindeki değişime karşı başarımları incelenecektir.

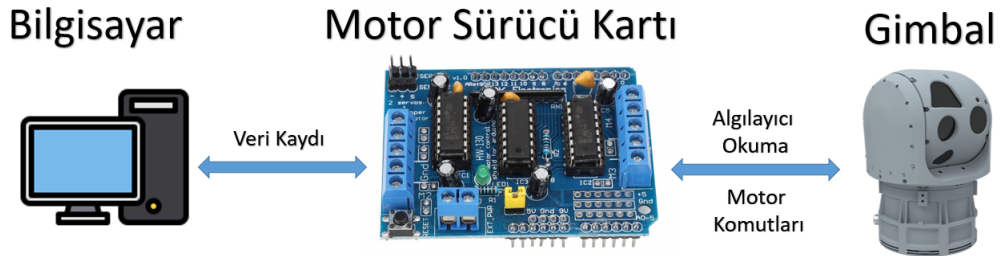
Kullanılan gimbal sistemi iki eksen, her eksenin hareketini sağlayan birer motor, her eksenin konumunu ölçen birer açıölçer algılayıcı, eksenlerin açısal dönüş hızlarını algılayan bir dönüölçer algılayıcı ve işlevini yerine getirmesinin sağlayan faydalı yükten oluşmaktadır.

Bu uygulamada kullanılan iki eksen gimbal sistemine benzeyen örnek bir sistemin görseli [41] Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Örnek Gimbal Sistemi - CATS

Kullanılan düzeneğin temsili gösterimi Şekil 4.2 ile gösterilmektedir. Bir motor sürücü kartı ile gimbal sistemine komutlar gönderilmekte ve algılayıcılar okunmaktadır. Motor sürücü kartı bir PC ile haberleşerek veriler kaydedilmektedir.



Şekil 4.2 Kullanılan Temsili Düzenek

4.2. İki Eksen Gimbal Sisteminin Matematiksel Modeli

İki eksen gimbal sistemlerinde her iki eksen bir adet motor ve motorun döndürdüğü bir kütleden meydana gelmektedir. Motora uygulanan akım tork üretmektedir ve bu tork,

motorun bağılı olduğu kütleyi hareket ettirmektedir.

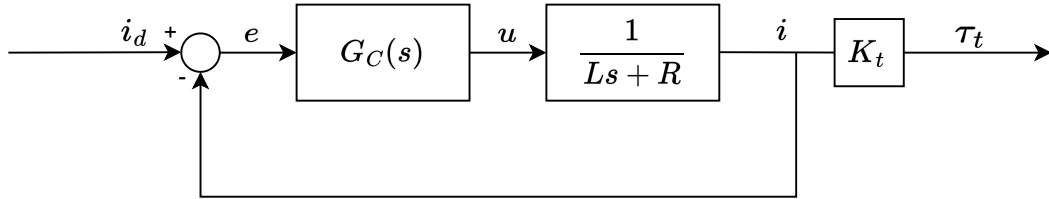
Motora uygulanan akım, V_g değeri ile belirlenmektedir. Motor gerilimi ve akımı arasındaki aktarım işlevi Eşitlik 63 ile gösterilmektedir.

$$\frac{i(s)}{V_g(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (63)$$

Motor akımı ile motorun ürettiği tork değeri arasındaki ilişkiyi belirleyen katsayıya motor tork katsayısı denir. Motor tork katsayısı K_t ile gösterilmektedir ve bu parametre kullanılarak motor torku hesabı Eşitlik 64'de gösterildiği gibi yapılmaktadır.

$$\tau_t = K_t i \quad (64)$$

Bu eşitlikte τ_t motorun ürettiği torku, i motora uygulanan akım değerini ve K_t motor tork katsayısını ifade etmektedir. K_t parametresi bir motor için sabit olduğundan motor akımı denetlenerek motorun istene tork değerini üretmesi sağlanabilir. Motor akım denetleyici yapısının öbek çizeneği Şekil 4.3 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Motor Akımı Denetleyici Yapısı

Şekil 4.3 ile gösterilen öbek çizeneğinde, i_d dayanak akım değerini, $G_C(s)$ akım denetleyicisini ifade etmektedir.

Motor akım denetleyicisi $G_C(s)$ sıfır kutup götürmesi yöntemini [31] temel alacak şekilde seçilmektedir ve Eşitlik 65 ile gösterilmektedir. Bu eşitlikte yer alan ω_c , motora akım denetleyicisi uygulandıktan sonra kapalı döngü aktarım işlevinin bant genişliğini ifade

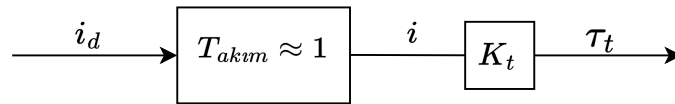
etmektedir. Eşitlik 66, bu öbek çizeneğinin açık döngü aktarım işlevidir. Eşitlik 67 ile motor akım döngüsünün kapalı döngü aktarım işlevi verilmektedir.

$$G_c(s) = \omega_c \frac{Ls + R}{s} \quad (65)$$

$$Z(s) = \omega_c \frac{Ls + R}{s} \frac{1}{Ls + R} = \frac{\omega_c}{s} \quad (66)$$

$$T_{akım}(s) = \frac{Z(s)}{1 + Z(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (67)$$

Hem mekanik tasarım sonucu ortaya çıkan mekanik rezonans frekansı hem de kullanılan algılayıcıların gürültü seviyeleri nedeniyle gimbal sistemlerinin hız döngüsü bant genişliği genellikle 100 Hz'den daha fazla olamamaktadır. Bu sınır göz önüne alındığında akım döngüsü bant genişliğini ifade eden ω_c değeri 1 kHz olacak şekilde seçilmiştir. $T_{akım}(s)$ eşitliği incelendiğinde, ω_c değerinin hız döngüsü bant genişliğine görece yüksek seçildiği durumda, s 'li terimin düşük frekanslarda etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. Bu nedenle $T_{akım}(s) \approx 1$ olarak kabul edilmiştir. Bu sayede motor modeli basitleştirilerek, Şekil 4.4 ile gösterilen yapıya indirgenmiştir.



Şekil 4.4 Motor Akım Denetleyicisi İndirgenmiş Yapı

Şekil 4.4 ile verilen öbek çizeneği, motor akım döngüsünün bant genişliğinin çok yüksek seçilmesinden dolayı akım denetleyicisinin yaklaşık 1 olarak kabul edildiğini ve i_d ile i arasındaki dinamiklerin ihmal edilebileceğini göstermektedir.

Motorun ürettiği tork, bağlı olduğu kütleyi ataletiyle ilişkili olarak döndürmektedir. Motor torku ile atalet değeri J arasındaki ilişki, Eşitlik 68'da gösterilmiştir.

$$\frac{\tau_t}{J} = \alpha = \dot{\omega} \quad (68)$$

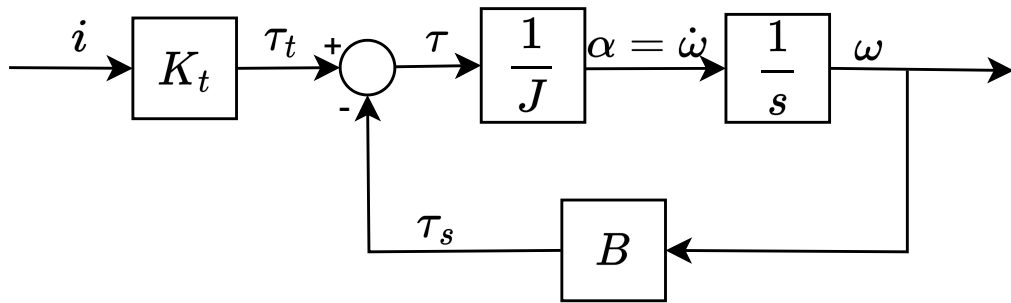
Bu eşitlikte τ_t motorun ürettiği torku, J motora bağlı kütle için atalet değerini, α kütle için açısal ivmesini ve ω değeri kütle için açısal hızını ifade etmektedir.

Gimbal sisteminin mekanik kısmı modellenirken dikkate alınması gereken bir diğer etki ise sürtünme kuvvetidir. Sürtünmenin, sistemin dönüşüne etkisi hız ile ters yönde olmaktadır. Statik sürtünme sistemin durağan halden harekete başlayabilmesi için yenmesi gereken sürtünme değeridir. Dinamik sürtünme değeri ise gimbalin açısal hızına bağlı olarak (rulman ve yağ sürtünmesi gibi) sisteme ters yönde etki eden sürtünme değeridir. Bu çalışma kapsamında sürtünme modeli, statik sürtünmenin etkisi ihmal edilebilir olduğundan dinamik sürtünme olarak ele alınmıştır. Dinamik sürtünmenin matematiksel modeli Eşitlik 69 ile gösterilmiştir [42].

$$\tau_s = B\omega \quad (69)$$

Bu eşitlikte B hıza bağlı sürtünme katsayısını, ω eksenin açısal dönüş hızını ve T_s açısal hıza bağlı olarak oluşan sürtünme kuvvetini ifade etmektedir.

Bu noktaya kadar anlatılan tüm matematiksel modeller ve varsayımlar bir araya getirildiğinde gimbal sisteminin bir ekseninin basitleştirilmiş matematiksel modeli Şekil 4.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Gimbal Matematiksel Model

Şekil 4.5 ile verilen öbek çizeneğinde yer alan α açısız ivmeyi ifade ederken, τ_s sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Bu öbek çizeneği ile ifade edilen sistemin kapalı döngü aktarım işlevi, Eşitlik 70 ile verilmiştir.

$$\frac{W(s)}{I(s)} = \frac{K_t}{Js + B} \quad (70)$$

Eşitlik 70 incelendiğinde gimbal modelinin, birinci derece aktarım işlevi ile ifade edilebildiği görülmektedir. Bu modelde yer alan K_t parametresi kullanılan motorun teknik dokümanında yer alan motor tork sabitini, J ve B parametreleri ise sistemin mekanik tasarımı sonucunda ortaya çıkan atalet ve sürtünme katsayılarını ifade etmektedir. Bölüm 2’de anlatılan denetleyicilerin hesaplamalarının daha kolay yapılabilmesi amacıyla aktarım işlevi, Eşitlik 71 ve 72 ile ifade edilen parametreler kullanılarak Eşitlik 73 ile gösterilen biçimde ifade edilecektir.

$$b = \frac{K_t}{J} \quad (71)$$

$$a = \frac{B}{J} \quad (72)$$

$$G_s(s) = \frac{b}{s + a} \quad (73)$$

4.3. Hız Denetimi Uygulama Sonuçları

Bu kısımda Bölüm 2’de anlatılan denetleyicilerin, bir gimbal eksenini üzerinde hız denetiminde uygulanması ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. İlk olarak gimbal sistemi oda sıcaklığında iken tüm denetim yapıları uygulanmaktadır ve sonuçları incelenmektedir. Ardından gimbal sistemi özellikle hava platformlarının maruz kaldığı en düşük sıcaklıklardan biri olarak kabul edilen $-40^\circ C$ ’lik bir ortama konulmaktadır

ve aynı denetleyiciler, bu koşul altında da uygulanarak sonuçları incelenmektedir. Gimbal soğuk ortama girdiğinde sistemin sürtünmesi artacağı için model parametreleri değişmektedir. Bu sayede uygulanan denetim yapılarının parametre değişimine karşı başarımı da incelenmektedir.

Gimbal sistemi üzerinde yapılan bu çalışmada örnekleme aralığı dönüölçer algılayıcısının frekansı göz önüne alınarak 0.0005 saniye (2 kHz) olarak belirlenmiştir. Tabloda 4.1 ile verilen doğal frekans ω_n ve sönüm oranı ζ değerleri istenen cevabın kapalı döngü aktarım işlevinin parametreleri ve uygulamada kullanılan sistem modelinin b ve a parametrelerini göstermektedir. Ayrıca denetleyicilerin üretebileceği en büyük akım değeri limiti de tabloda yer almaktadır. Denetleyiciler belirlenen üst limitten daha yüksek akım komutu ürettikleri zaman, yazılım içerisinde akım değeri limitlenmektedir.

Tablo 4.1 Uygulama - Başarım Ölçütleri Tablosu

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma	b	a	Akım Limiti
40 rad/s	0.9	0.12 s	$\ll \%1$	36	5.7	8 A

Bir gimbal sistemi için sistem bazında belirli sistem isterleri belirlenir ve ortaya çıkan sistemin bu isterleri yerine getirmesi beklenir. Belirlenen bu isterler temel alınarak, bu isterleri sağlayacak denetleyici başarım ölçütleri tasarımcılar tarafından belirlenir. Uygulamada kullanılan sistem için de benzer bir yöntem izlenmiştir. Bu uygulamada kullanılan gimbal sisteminin bu başarım ölçütlerini sağlaması gerekmektedir. Hız denetleyicileri için en önemli başarım ölçütlerinden biri durulma zamanıdır. Sistemde aşma olmaması istenmektedir. Durulma zamanı ve aşma miktarı göz önüne alındığında durulma zamanı başarım ölçütü daha önemli bir ölçüttür.

Bu bölümde yer alan şekillerde birinci grafik dayanak sinyali (d), istenen sistem cevabını (y_i) ve farklı çalışma sıcaklıklarındaki sistem cevaplarını (y_1 ve y_2) içermektedir. İkinci grafik denetim sinyallerini (u_1 ve u_2) ve üçüncü grafik hataları (e_{y1} ve e_{y2}) göstermektedir.

4.3.1. OTüm Denetleyici ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde OTüm denetleyicisinin uygulama sonuçları verilmektedir. Denetleyici parametreleri Tablo 4.1 verilen başarımlar ölçütleri göz önüne alınarak Bölüm 2.2’de anlatılan yöntem ile hesaplanmaktadır. Denetleyici parametreleri Tablo 4.2 ile verilmektedir. OTüm denetleyicisinde yer alan m katsayısı model uyumlama yapabilmek amacıyla 0 (sıfır) olarak seçilmektedir.

Tablo 4.2 Uygulama - OTüm Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m
1.84	44.44	0

Elde edilen denetleyici iki farklı sıcaklık koşulu altında sisteme uygulanmakta ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.6 ile gösterilmektedir.

OTüm denetleyicisinin parametreleri model uyumlama yöntemi ile belirlendiği için, oda sıcaklığında sistem cevabı, istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olmaktadır. Şekil 4.6-a incelendiğinde sistem çıkışının oda sıcaklığında aşma yapmadığı ve soğuk ortamda ise %10 aşma yaptığı görülmektedir. Oda sıcaklığında sistem cevabının durulma zamanı 90 milisaniye olarak ölçülürken, soğuk ortamda bu süre 200 milisaniye olarak ölçülmüştür. Sistem cevabı oda sıcaklığında her iki başarımlar ölçütünü de sağlarken, soğuk koşul altında 110 milisaniyelik durulma süresi ölçütünü ve aşma ölçütünü sağlayamamıştır.

Şekil 4.6-b incelendiğinde, her iki sıcaklık koşulunda da OTüm denetleyicinin ürettiği akım miktarının dayanak noktası değişimi anında yükseldiği ancak en büyük akım seviyesine ulaşmadığı görülmektedir. Soğuk ortamda denetleyicinin ürettiği akım komutu artan sürtünmeden kaynaklı olarak, beklendiği üzere daha büyüktür. OTüm denetleyici soğukta başarımlar ölçütlerini sağlayamamaktadır.

4.3.2. Özayarlama OTüm denetleyici ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde Özayarlama OTüm denetleyicinin gimbal sistemine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Bölüm 2.3.3'te anlatılan yöntem kullanılarak denetleyici parametreleri hesaplanmaktadır. SZÖEKK algoritması kullanılarak sistem modeli parametreleri a ve b sürekli olarak kestirilmektedir. Kestirim sonucu elde edilen \hat{a} ve \hat{b} parametrelerine göre denetleyici parametreleri K_p ve K_i , Tablo 4.1'de verilen başarımlar ölçütlerini sağlayacak şekilde hesaplanmaktadır.

Tablo 4.3 Uygulama - SZÖEKK Yöntemi Parametreleri

α	β	$\hat{\theta}_0$	C(s)
10^{-7}	4	[0 0]	$s + 10$

Şekil 4.7 ile iki farklı sıcaklık koşulu altında uygulanan SZÖEKK OTüm denetleyicisinin sonuçları ve parametre değişimleri birlikte verilmektedir. Önceki grafiklere ek olarak dördüncü (d) ve beşinci (e) grafiklerde kestirilen sistem modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır.

Şekil 4.7-a incelendiğinde, model uyumlama yapılmasından dolayı, her iki koşulda da sistem cevabının istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olduğu ve aşmasız bir cevap verdiği görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılan testte durulma süresi 110 milisaniye olarak elde edilmektedir. $-40^\circ C$ sıcaklığında yapılan testte ilk bir kaç saniyede denetleyici istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabından daha yavaş bir cevap vermektedir, ancak parametre kestirimi yakınsadıkça sistem cevabı hızlanmaktadır. Şekil 4.7-e incelendiğinde parametre kestirimi boyunca hatanın nasıl azaldığı görülmektedir. Parametre kestirimleri yakınsadıktan sonra soğuk koşullarda elde edilen durulma süresi 110 milisaniye olmaktadır. Şekil 4.7-c ve 4.7-d ile verilen grafikler incelendiğinde model parametrelerinin iki sıcaklık koşulunda da nasıl yeni parametrelere yakınsadığı görülmektedir.

Şekil 4.7-b'de yer alan grafikte denetleyicinin ürettiği akım değerleri görülmektedir. Akım değerleri incelendiğinde soğuk koşullar altında denetleyicinin ürettiği akım miktarı artmaktadır.

4.3.3. TE-DKD ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde TE-DKD yapısının gimbal sistemine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Kullanılan denetleyicinin detayları Bölüm 2.4'te anlatılmıştır. TE-DKD yapısı parametreleri, Tablo 4.1 ile gösterilen başarımlar ölçütleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu ölçütleri sağlayacak TE-DKD yapısının parametrelerini belirleyecek \tilde{Q} ve \tilde{R} matrisleri Eşitlik 74 ve 75 ile gösterilmektedir.

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1500 \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$\tilde{R} = 0.01 \quad (75)$$

Eniyileme sonucu ortaya çıkan \tilde{K} kazanç matrisi Eşitlik 76 ile gösterilmektedir.

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 10.87 & -387.29 \end{bmatrix} \quad (76)$$

İki farklı sıcaklık koşulu altında bu denetleyici uygulanarak elde edilen denetleyici sonuçları Şekil 4.8 ile verilmektedir. TE-DKD yapısı oda sıcaklığında %32 aşma ve 90 milisaniye durulma süresi başarımına sahiptir. Aynı denetleyici soğuk ortamda %0 aşma ve 110 milisaniye durulma süresi başarımına sahiptir. Her iki sıcaklık koşulu altında da istenilen durulma süresi başarımlar ölçütünü sağladığı görülmektedir. Soğuk ortamda yapılan testlerde TE-DKD yapısı, OTüm denetleyiciden daha düşük durulma süresi sağlayarak durulma süresi başarımlar ölçütünü de sağlamaktadır.

4.3.4. GÇ-RKKD ile Elde Edilen Sonuçlar

GÇ-RKKD yönteminin gimbal eksenine uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenmektedir. Kullanılan denetleyicinin detayları Bölüm 2.5'te anlatılmaktadır.

GÇ-RKKD yönteminde dayanak aktarım işlevi olarak kullanılmak üzere Eşitlik 77 ile gösterilen ikinci derece bir aktarım işlevi seçilmektedir. Bölüm 2.5'te anlatılan görelî derece koşulunun sağlanması için $M(s)$ 'in ikinci derece bir aktarım işlevi olması gerekmektedir. Bu nedenle bu denetleyici için kullanılacak dayanak aktarım işlevi $M(s)$, Tablo 4.1 ile verilen başarıml ölçütlerini sağlayacak şekilde ikinci derece aktarım işlevi olarak belirlenmektedir.

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 72s + 1600} \quad (77)$$

GÇ-RKKD yönteminde kullanılan rölenin genliği en yüksek akım miktarının 2 katı olacak şekilde 16A'dir. Hem röle çıkışındaki çatırdamayı engellemek amacıyla hem de görelî derece koşulunu sağlamak amacıyla rölenin sonrasına konulan süzgeç ise Eşitlik 78 ile gösterilmektedir.

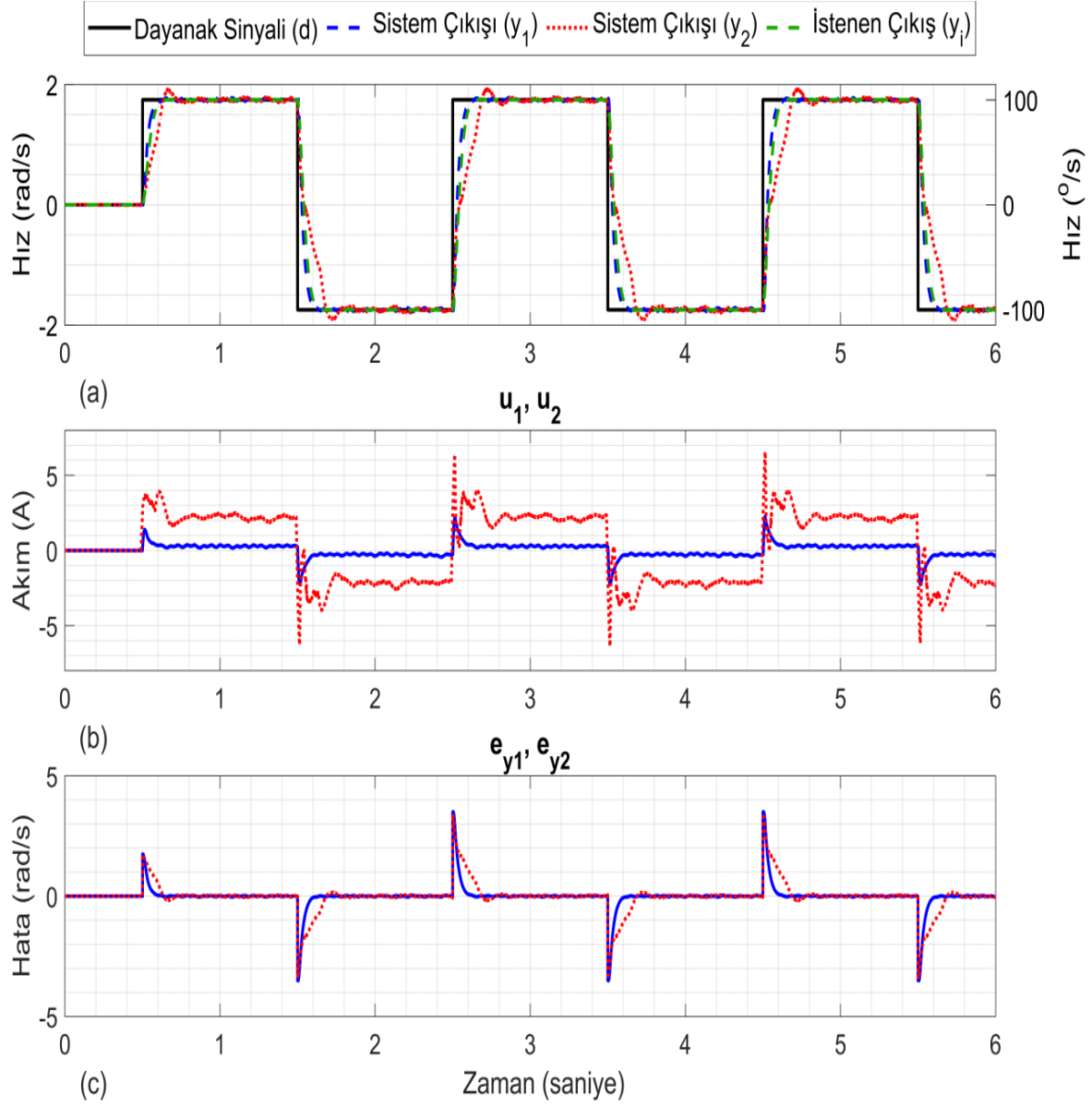
$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s + 25)^2} \quad (78)$$

Şekil 4.9 ile iki farklı sıcaklık koşulu altında uygulanan GÇ-RKKD yapısının sonuçları gösterilmektedir. Şekilde yer alana son grafik diğer grafiklerden farklı olarak röle çıkış sinyali grafiğidir.

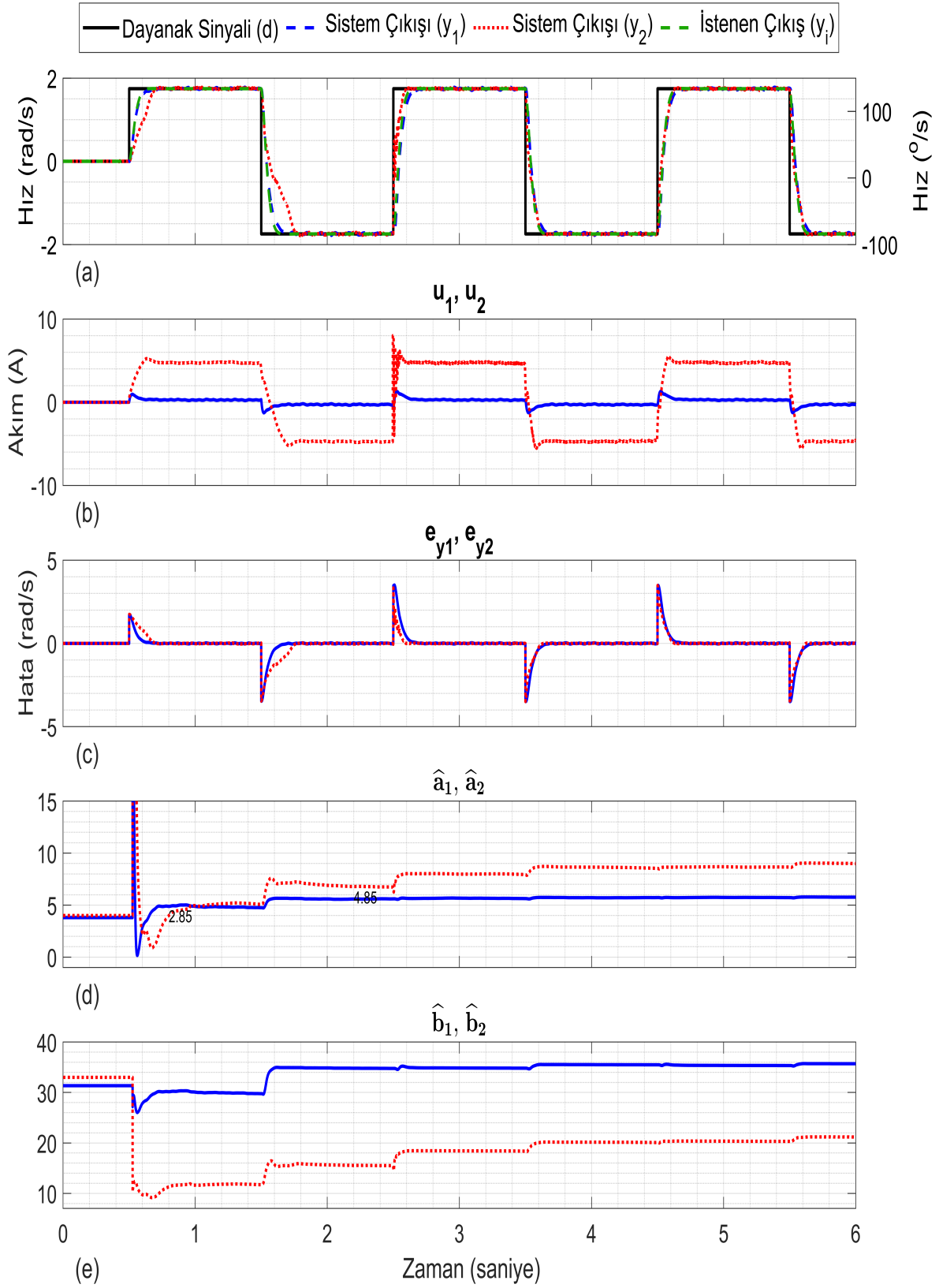
Şekil 4.9-a incelendiğinde GÇ-RKKD yapısının sıcaklık değişimi nedeniyle meydana gelen model parametrelerindeki değişime karşı sistem cevabını dayanak aktarım işlevi sistem cevabına yakın tutmayı başarabildiği görülmektedir. Her iki sıcaklık koşulu altında da aşma miktarı %0 olarak ölçülmektedir. Oda sıcaklığında durulma süresi 100 milisaniye iken soğuk ortamda durulma süresi 110 milisaniyedir.

Şekil 4.9-b ile verilen akım miktarları ve Şekil 4.9-a ile gösterilen sistem cevapları incelendiğinde, Özayarlmalı OTüm denetleyicisi ile GÇ-RKKD yapısı benzer başarımla sahip olduğu görülmektedir. Ancak Özayarlmalı OTüm denetleyicisinin bu sistem cevabını verebilmesi için model parametrelerinin değişimini kestirmesi ve denetleyici parametrelerini

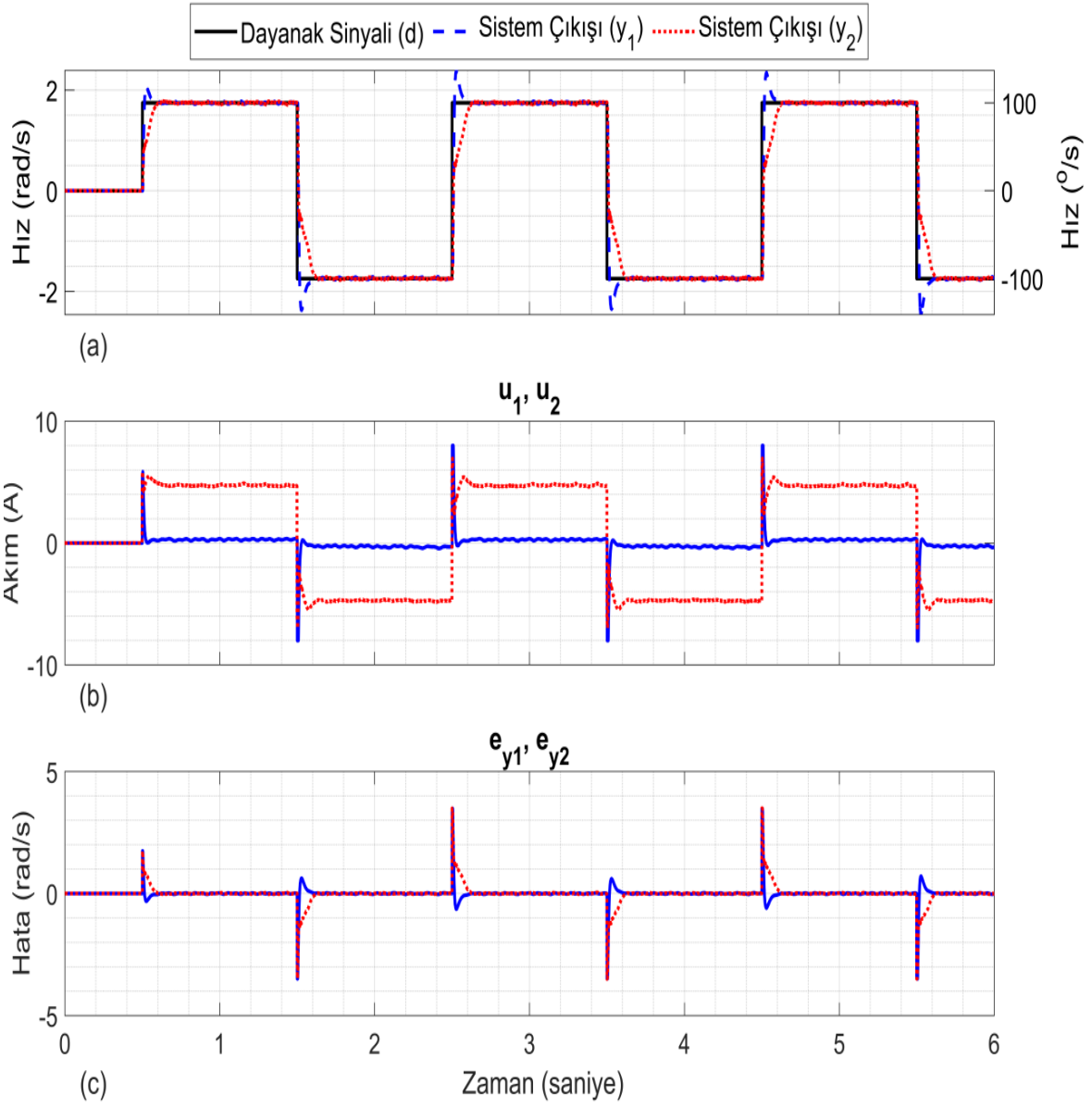
buna göre güncellemesi gerekmektedir. GÇ-RKKD yapısı herhangi bir kestirim yapmadığı için model parametre değişimi altında anlık olarak istenen cevabı verebilmektedir.



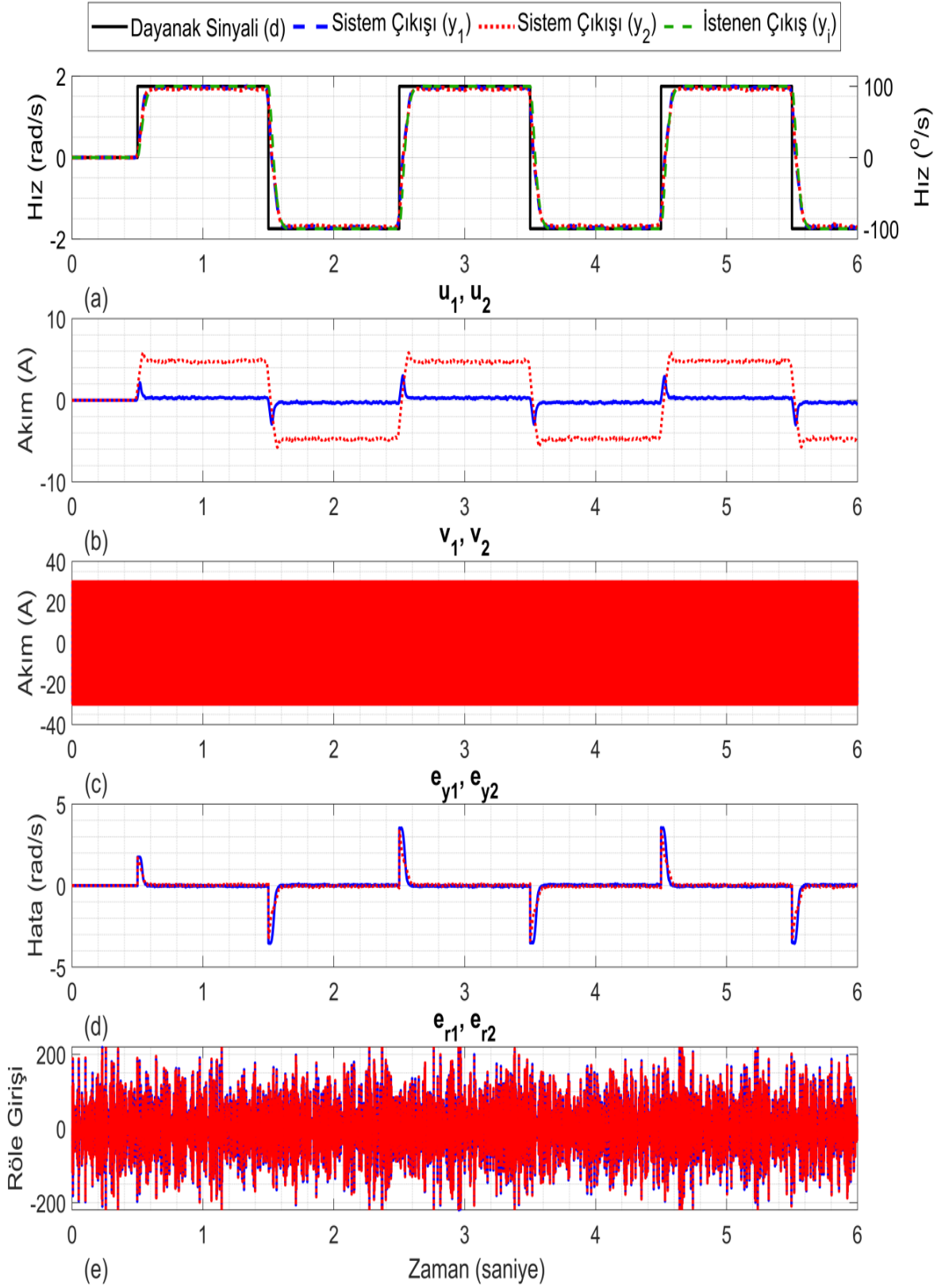
Şekil 4.6 İki Farklı Sıcaklıkta OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.7 İki Farklı Sıcaklıkta Özayarlama OTüm denetleyicisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.8 İki Farklı Sıcaklıkta TE-DKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.9 İki Farklı Sıcaklıkta GÇ-RKKD Yönteminin Sonuçlarının Karşılaştırılması

4.4. Pozisyon Denetimi Uygulama Sonuçları

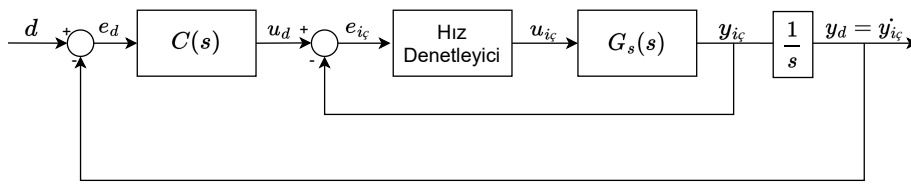
Bu bölümde bir gimbal sistemi üzerinde ardışık konum denetimi hem sıcak hem de soğuk çevre koşulu altında uygulanmaktadır ve sonuçları incelenmektedir. Dış döngüde konum denetleyicisi olarak OTür (Oransal-Türevsel) denetim kullanılmaktadır. Denetleyici parametreleri Eşitlik 60 kullanılarak hesaplanmaktadır. İç döngüde ise Bölüm 2’de anlatılan denetleyicilerden seçilen Özayarlamalı OTüm Denetleyici ve GÇ-RKKD yapısı kullanılmaktadır. Örnekleme zamanı 500 mikrosaniyedir.

İç döngüde yer alan hız denetleyicilerinin tasarımı için kullanılan başarımlar ölçütleri Tablo 4.4 ile verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımlar ölçütü değerleri ile birlikte bu başarımlar ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir.

Tablo 4.4 Uygulama Ardışık Denetim Hız Denetleyicileri için Kullanılan Başarımlar Kriterleri

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	0.9	0.12 s	$\ll \%1$

Şekil 4.10 ile bu bölümde kullanılan ardışık denetim yapısını gösteren öbek çizeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Uygulama - Ardışık Denetim Öbek Çizeneği

Pozisyon döngüsü denetleyici parametrelerin seçim yöntemi Bölüm 3’te anlatılmaktadır. Eşitlik 58 ile verilen aktarım işlevinin parametreleri $\omega_n = 14$ ve $\zeta = 0.9$ olarak seçilmektedir. Eşitlik 60 ile verilen eşitlikler kullanılarak konum denetleyici parametreleri $K_p = 6.328$ ve $K_d = -0.1$ olarak hesaplanmaktadır.

Bu bölümde verilen şekillerde yer alan birinci grafikte dayanak girişi (d) ve sistem çıkışı (y) yer almaktadır. İkinci grafikte denetim sinyali (u) ve üçüncü grafikte dayanak girişi ve sistem çıkışı arasındaki hata (e_y) gösterilmektedir.

4.4.1. İç Döngü: Özayarlama OTüm Denetim

Bu bölümde iç döngüde Özayarlama OTüm Denetleyicinin kullanıldığı ardışık konum denetiminin sonuçları incelenmektedir. Tablo 4.5 içerisinde parametre kestirimi için kullanılan SZÖEKK yönteminin parametreleri yer almaktadır.

Tablo 4.5 Uygulama - Ardışık Denetim için SZÖEKK Yöntemi Parametreleri

α	β	$\hat{\theta}_0$	C(s)
10^{-7}	4	[0 0]	$s + 10$

Şekil 4.11 ile konum döngüsü sonuçları, Şekil 4.12 ile Özayarlama OTüm hız denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde dördüncü ve beşinci grafikte SZÖEKK yönteminin kestirdiği model parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) verilmektedir.

Şekil 4.11 incelendiğinde tüm dayanak noktalarına aşmasız yerleştiği görülmektedir. Şekil 4.12-d ve 4.12-e incelendiğinde SZÖEKK yönteminin parametre kestirimi, ilk dayanak sinyali değişimi ile birlikte hızlıca yakınsamaktadır.

Şekil 4.12-b'de görüldüğü üzere soğuk ortamda artan sürtünme kaynaklı olarak Özayarlama OTüm denetleyicisinin ürettiği denetim sinyalinin büyüme eğilimi vardır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde model parametrelerinde meydana gelen değişimin konum ve hız denetimi başarımlarını üzerinde az bir etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 3.12-a ve 4.12-b incelendiğinde SZÖEKK yönteminin soğuk ortam altında farklı sistem parametrelerine yakınsadığı görülmektedir.

4.4.2. İç Döngü: GÇ-RKKD

Bu bölümde iç döngüsünde GÇ-RKKD yönteminin yer aldığı ardışık konum döngüsünün gimbal sistemine sıcak ve soğuk ortamda uygulanması sonucu elde edilen veriler gösterilmektedir. 4.13 ile konum döngüsü sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.14 ile GÇ-RKKD denetleyicisinin sonuçları gösterilmektedir. Şekilde yer alan üçüncü grafikte röle girişi gösterilmektedir. Dördüncü grafik dayanak sinyali ve sistem çıkışı arasındaki hatanın grafiğidir. Son olarak beşinci grafikte röle girişi yer almaktadır.

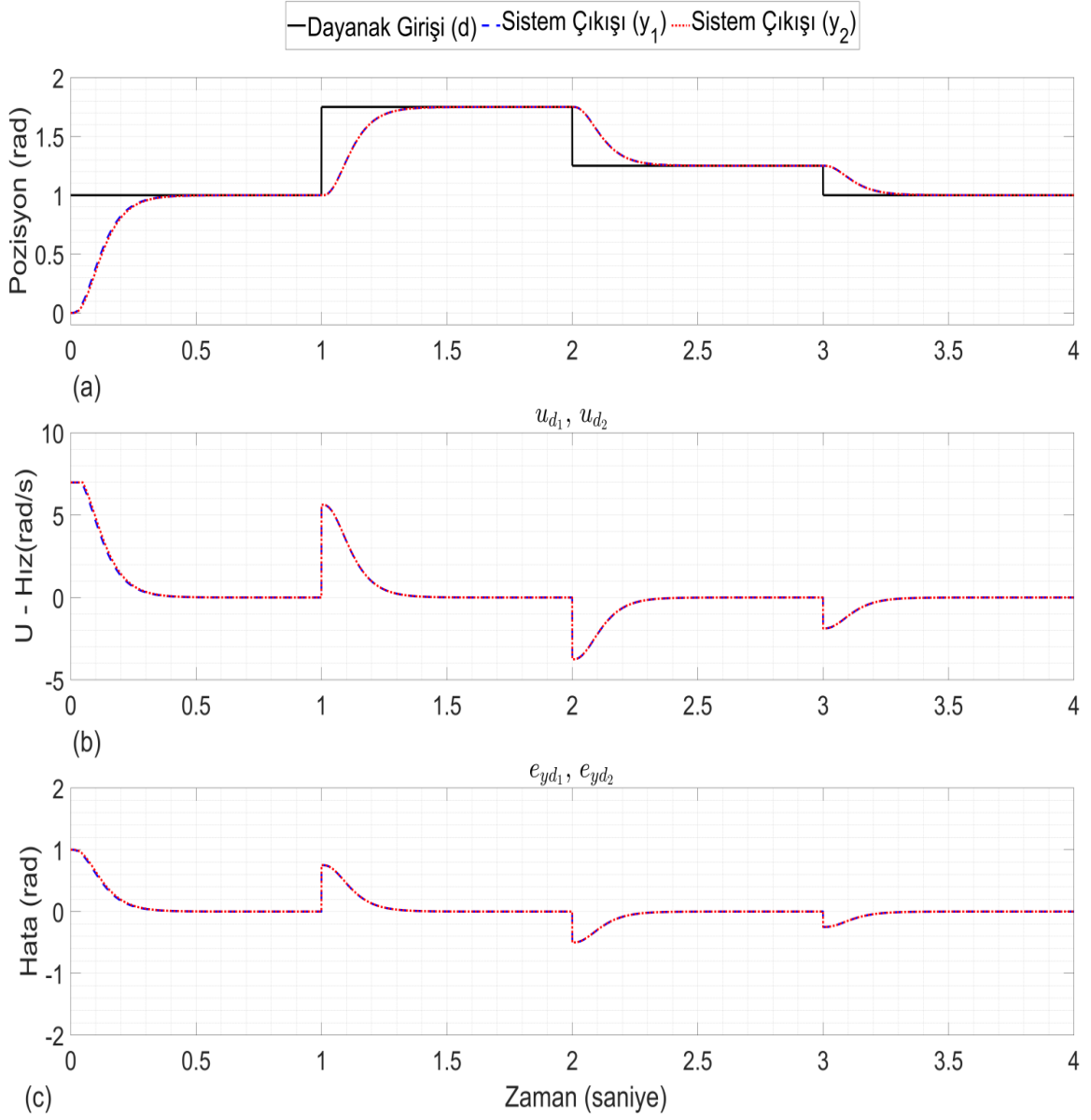
Eşitlik 79 ile dayanak aktarım işlevi $M(s)$ gösterilmektedir.

$$M(s) = \frac{1600}{s^2 + 72s + 1600} \quad (79)$$

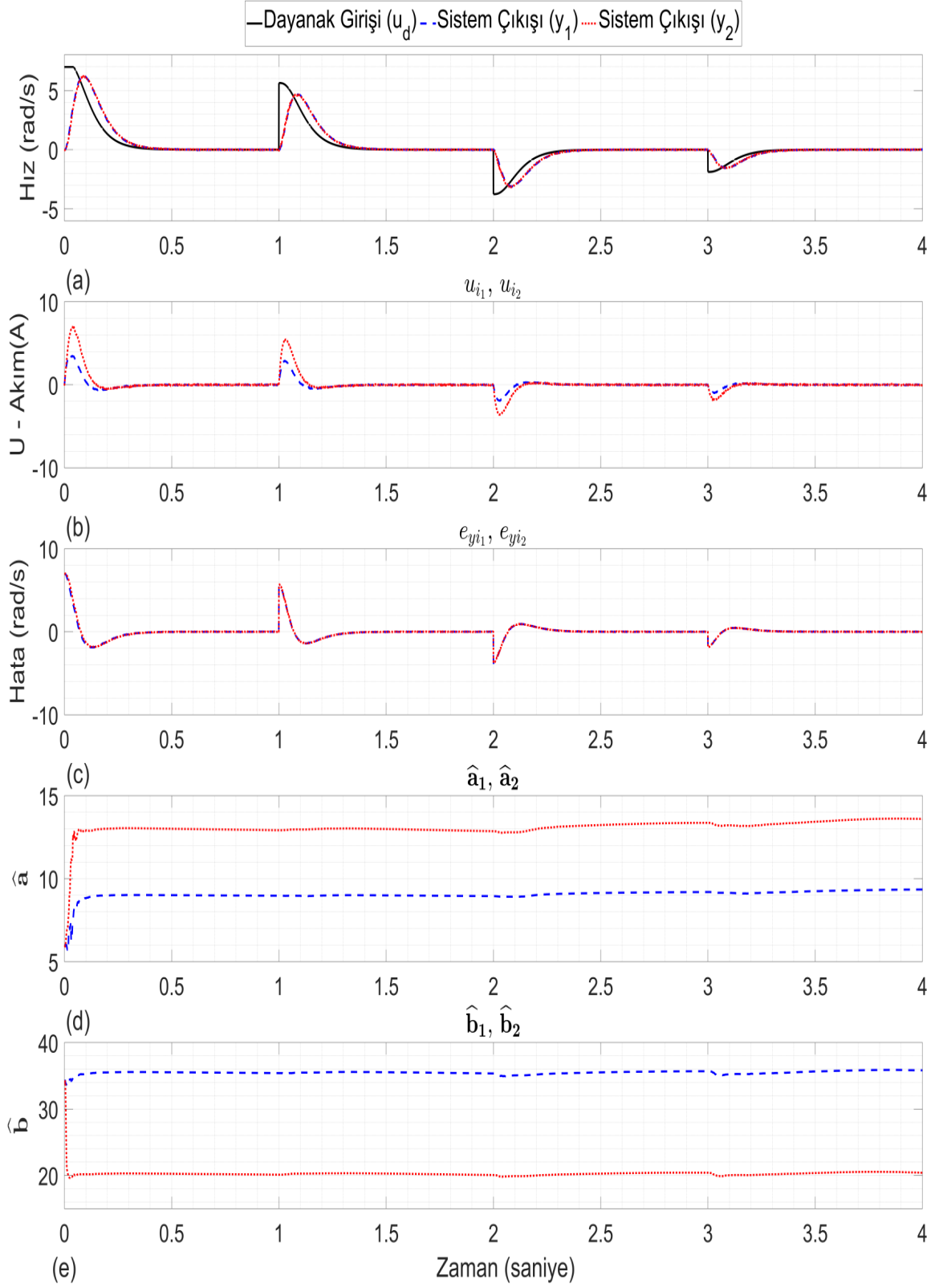
Eşitlik 39 ile verilen görelî derece şartını sağlamak için röle çıkışına Eşitlik 80 ile gösterilen ikinci derece süzgeç eklenmektedir.

$$F(s) = \frac{(25)^2}{(s + 25)^2} \quad (80)$$

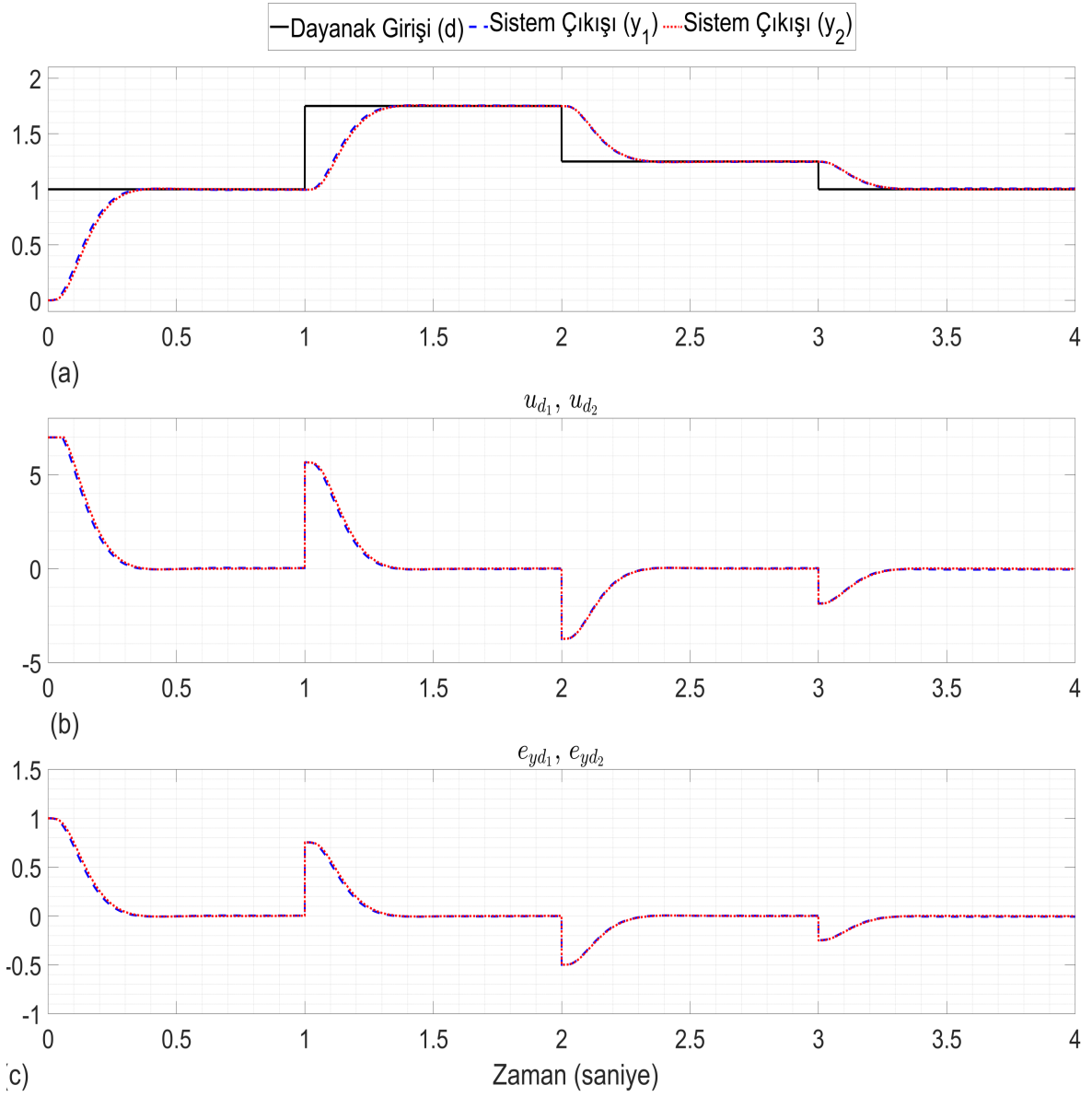
Şekil 4.13 incelendiğinde, Özyarlamalı OTüm denetleyici ile benzer şekilde konum denetiminin aşmasız cevap verdiği görülmektedir. Sıcak ve soğuk ortamda yapılan testlerde elde edilen konum döngüsü sonuçları birbiri ile benzer çıkmaktadır. Sistem çıkışları benzer olduğu için oransal denetleyicinin ürettiği hız komutu grafikleri de benzer olmaktadır. Ancak Şekil 4.13-b incelendiğinde bu hız komutunu yerine getirmek için soğuk ortamda daha yüksek akım komutlarının üretildiği görülmektedir. Şekil 4.13-a'ya bakıldığında hız denetim başarımının soğuk ve sıcak testleri için benzer olduğu anlaşılmaktadır.



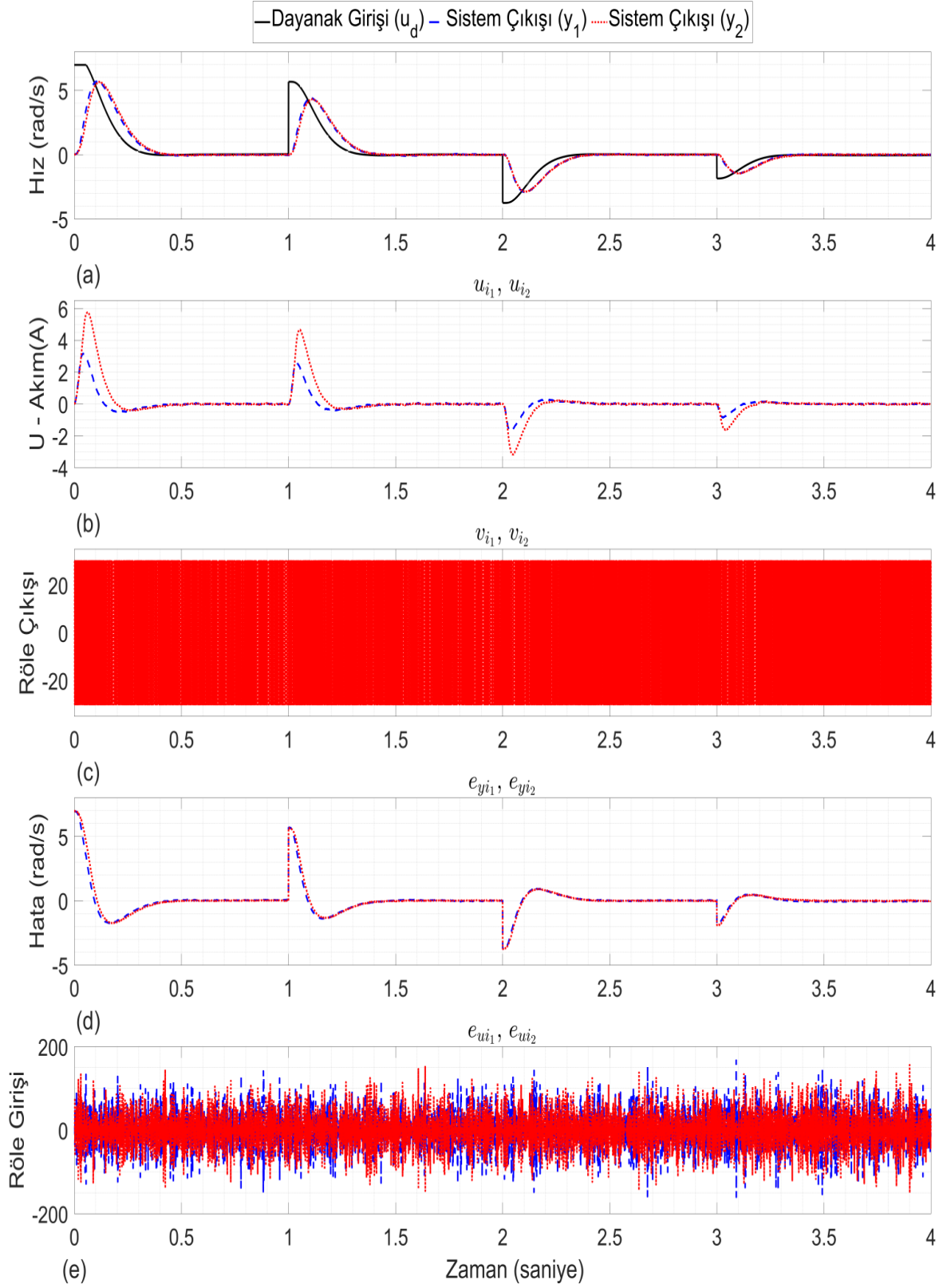
Şekil 4.11 $G_s(s)$ için Pozisyon Denetimi (İç Döngü: Özyarlamalı OTüm)



Şekil 4.12 $G_s(s)$ için Özayarlama OTüm Hız Denetimi



Şekil 4.13 $G_s(s)$ için Pozisyon Denetimi (İç Döngü: GÇ-RKKD)



Şekil 4.14 $G_s(s)$ için GÇ-RKGD Hız Denetimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada 4 farklı denetim yapısı kullanılmaktadır. Bu denetim yapıları ilk olarak benzetim ortamında farklı sistemler üzerine uygulanmaktadır ve bozucu etkiler altındaki başarımları irdelenmektedir. Ardından seçilen 2 hız denetleyicisi ile ardışık konum denetimi benzetim ortamında gerçekleştirilmektedir. Son olarak gerçek bir gimbal sistemi üzerinde hız denetleyicileri ve ardışık konum denetimi uygulanarak başarımları incelenmektedir. Bu çalışmanın temel katkısı, birçok sektörde yaygın olarak kullanılan gimbal sistemleri için kullanılan denetleyicilerin birlikte değerlendirilmesidir. Literatürde yer alan birçok çalışmada bu denetleyicilerin araştırıldığı ve farklı tipte denetleyicilerin gimbal sistemleri üzerinde kullanıldığı görülmektedir. Pozisyon denetiminde kullanılan SZÖEKK kestiricili Özayarlamalı OTüm denetim yapısının ve GÇ-RKKD yapısının bir gimbal sistemi üzerinde uygulandığı bir çalışma bilgimiz dahilinde bulunmamaktadır. Çalışma kapsamında bu denetleyicilerin başarımları hem benzetim ortamında hem de gerçek bir gimbal sistemi üzerinde irdelenmektedir.

Birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılan gimbal sistemleri zorlu koşullar altında çalışmaktadır. Bu nedenle birçok farklı bozucuya maruz kalmaktadır. Ayrıca çalışma ortamında meydana gelen değişimlerden dolayı model parametrelerindeki değişimler sıklıkla yaşanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan OTüm denetleyici, bilinen sistem modeli üzerinde düzgün çalışmaktadır. Her ne kadar bilinen sistem modeli üzerinde başarımları yüksek olsa da, model parametrelerinde bir değişim meydana geldiğinde denetleyici başarımlarını koruyamamaktadır. Literatürde yer alan birçok çalışma da bu sonucu desteklemektedir. Bu nedenle günümüzde gimbal sistemlerinde OTüm denetleyiciler yerine gürbüz veya uyarlamalı denetim yapıları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada uyarlamalı denetim yöntemi olarak SZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özayarlamalı OTüm denetleyici kullanılmaktadır. Hem benzetim ortamında hem de uygulamadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistem parametrelerinde bir değişim meydana geldiğinde, EKK yönteminin değişen model parametrelerini kestirdiği ve OTüm

denetleyici parametrelerini yeni sistem parametrelerine göre güncellediği görülmektedir. Denetleyici parametrelerinin güncellenmesi sonucunda OTm denetleyiciden farklı olarak bu denetleyici başarımını korumaktadır. Her ne kadar bu denetleyici başarımını korusa da, EKK yöntemi yeni parametrelere yeterince yakınsayana kadar denetleyici başarımı düşmektedir. EKK yönteminin parametre yakınsama hızında kestirici parametreleri oldukça kritik bir yere sahiptir. Ayrıca hem denetleyici parametreleri, hem de kestirici için kullanılan parametreler göz önüne alındığında çok sayıda tasarım parametresinin düzgün seçilmesi gerekmektedir.

Gürbüz denetim yapıları da bozucu etkilere ve model parametre değişimlerine karşı oldukça başarılıdır. Bu çalışmada iki farklı gürbüz denetim yapısı kullanılmaktadır. Bunlardan biri G-RKKD yöntemidir. G-RKKD yapısının hem benzetim ortamında hem de gerçek sistem üzerinde yapılan uygulamada belirlenen dayanak aktarım işlevi cevabına benzer cevap verdiği görülmektedir. Uygulanan bozuculara karşı etkili bir bozucu bastırma başarımı göstermektedir. Bu denetim yapısının en büyük avantajlarından biri sistem modelinin bilinmesine gerek kalmadan, sadece göreli derece bilgisine dayanarak kullanılabilmesidir. Her eksen veya gimbal sistemi için farklı denetleyicilerin baştan tasarlanması yerine, başarılı bir G-RKKD yapısının ufak ayarlamalar ile hepsi için kullanılması mümkün görülmektedir. Ayrıca model parametre değişimlerinde meydana gelen değişimlere anlık olarak tepki verebilmektedir. Kullanılan bir diğer denetleyici ise TE-DKD yapısıdır. TE-DKD hem benzetim ortamında hem de uygulamada G-RKKD yapısı ile birlikte diğer denetleyicilere göre oldukça iyi bozucu bastırma başarımı göstermektedir. Ayrıca model parametre değişimlerine karşı da başarımını korumaktadır. Ancak TE-DKD yapısının benzetimde aşmasız bir sistem cevabına sahip olduğu, ancak uygulamada %30 aşma yaptığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. M. Hilkert, Inertially stabilized platform technology, concepts and principles, IEEE Control Systems Magazine, 28(5):25–39, **2008**.
- [2] B. Kürkçü and C. Kasnakoğlu, Estimation of unknown disturbances in gimbal systems, Applied Mechanics and Materials, p. 951–956, **2015**.
- [3] D. W. Clarke, Adaptive control, Autom, 27:207–208, **1991**.
- [4] I. D. Landau, A survey of model reference adaptive techniques - theory and applications, Autom., 10:353–379, **1973**.
- [5] S. Sastry and M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness, 1st edition. Prentice-Hall, Inc., **1989**.
- [6] P.E. E. Wellstead and M. B. Zarrop, Self-Tuning Systems: Control and Signal Processing, 1st edition. John Wiley ; Sons, Inc., **1991**.
- [7] S. A. Harris, C.J. Billings and Institution of Electrical Engineers, Self-tuning and Adaptive Control: Theory and Applications, 2nd edition. Institution of Engineering & Technology.
- [8] V. V. Chalam, Adaptive Control Systems: Techniques and Applications, 1st edition. Marcel Dekker, Inc., **1987**.
- [9] H. Santai and R. Carmichael, Adaptive Tracking Control for a DC Motor, The First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems. 25-27 May 1993, IEEE, Westlake Village, **1993**, p. 231–235.
- [10] V. Utkin and H. Chang, Sliding mode control on electro-mechanical systems, Mathematical Problems in Engineering, 8:100–105, **2002**.
- [11] P. S. Suresh, Optimal Control Theory, 3rd edition. Springer, **2019**.

- [12] B. D. O. Anderson and J. B. Moore, *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*, 1st edition. Prentice-Hall, Inc., **1990**.
- [13] M. H. Ahmad, K. Osman, M. Zakeri, and S. I. Samsudin, *Mathematical Modelling and PID Controller Design for Two DOF Gimbal System*, 2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA). 5-6 March 2021, IEEE, Langkawi, **2021**, p. 138–143.
- [14] R. Caponetto and M. G. Xibilia, *Fractional order PI control of a gimbal platform*, 2017 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). 4-6 September 2017, IEEE, Catania, **2017**, p. 1–4.
- [15] R.J. Rajesh and P. Kavitha, *Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms*, International Conference on Computer, Communication and Control (IC4). 10-12 September 2015, IEEE, Indore, **2015**, p. 1–6.
- [16] R. J. Rajesh and C. M. Ananda, *PSO tuned PID controller for controlling camera position in UAV using 2-axis gimbal*, 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE). 12-14 August 2015, IEEE, Bengaluru, **2015**, p. 128–133.
- [17] S. K. Solaiappan and G. Anitha, *A novel self-tuning fuzzy logic-based pid controllers for two-axis gimbal stabilization in a missile seeker*, International Journal of Aerospace Engineering, 2021:1–12, **2021**.
- [18] V. Obiora and I. E. Achumba, *Adaptive control of Aerial vehicle gimbal using fuzzy-PID compensator*, IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON). 7-10 November 2017, IEEE, FUTO, **2017**, p. 451–456.
- [19] M. V. Abdo, A. R. Toloei, and M. R. Arvan, *Modeling control and simulation of two axes gimbal seeker using fuzzy PID controller*, 22nd Iranian Conference

- on Electrical Engineering (ICEE). 20-22 May 2014, IEEE, Tehran, **2014**, p. 1342–1347.
- [20] M. Serra and J. Quelas, Robust fuzzy gain scheduling pid implementation for gimbal stabilization system, 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC). **2017**, p. 1–6.
- [21] K. Seong, H. Kang, B. Yeo, and H. Lee, The Stabilization Loop Design for a Two-Axis Gimbal System Using LQG/LTR Controller, 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. 18-21 October 2006, IEEE, Busan, **2006**, p. 755–759.
- [22] M. A. Kumar and S. Kanthalakshmi, Hinf control law for line of sight stabilization in two-axis gimbal system, Journal of Vibration and Control, 28(1-2):182–191, **2022**.
- [23] B.J. Smith, W.J. Schrenk, W.B. Gass, and Y.B. Shtessel, Sliding mode control in a two-axis gimbal system, 1999 IEEE Aerospace Conference. 07 March 1999, IEEE, Snowmass, **1999**, p. 457–470.
- [24] C. Espinosa, K. Mayen, M. Lizarraga, S. Romero, and R. Lozano, Sliding mode line-of-sight stabilization of a two-axes gimbal system, 2015 workshop on research, education and development of unmanned aerial systems (red-uas), p. 431–438, **2015**.
- [25] R. Ye, B. Yan, K. Shi, and M. Chen, Interval type-2 fuzzy sliding-mode control of three-axis stabilization gimbal, IEEE Access, 8:180510–180519, **2020**.
- [26] Yue Hu, Yuan Cao, and Shifeng Zhang, Design of sliding mode control with disturbance observers for inertial platform, 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 25-27 May 2013, IEEE, Guiyang, **2013**, p. 4652–4656.
- [27] A. Battistel, T. Oliveira, and V. H. P. Rodrigues, Adaptive Control of an Unbalanced Two-Axis Gimbal for Application to Inertially Stabilized Platforms,

- 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). 2-6 December 2019, IEEE, Belo Horizonte, **2019**, p. 99–104.
- [28] S. Lee and S. Jung, RLS model identification-based robust control for gimbal axis of control moment gyroscope, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 3-7 July 2017, IEEE, Munich, **2017**, p. 584–589.
- [29] K. Ogata, Modern Control Engineering, 4th edition. Prentice Hall PTR, **2001**.
- [30] P. Kheirkhahan, Robust anti-windup control design for PID controllers, 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). 18-21 October 2017, IEEE, Jeju, **2017**, p. 1622–1627.
- [31] K.J. Åström and T. Hägglund, PID Controllers-Theory, Design, and Tuning, 2nd edition. Instrument Society of America, **1995**.
- [32] F. Beevi, T. K. Kumar, and J. Jacob, Novel design method for two degree of freedom controllers, International Review of Automatic Control (IREACO), 8:281, **2015**.
- [33] P. Gawthrop, Continuous-Time Self-Tuning Control Volume I – Design, 1st edition. Research Studies Press, **1987**.
- [34] H. Demircioğlu, Continuous-Time Self-Tuning Algorithms, Ph.D. thesis, Faculty of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, **1989**.
- [35] K.J. Aström, Theory and applications of adaptive control, IFAC Proceedings Volumes, 14(2):737–748, **1981**.
- [36] H. Kwakernaak and R. Sivan, Linear Optimal Control Systems, 1st edition. Wiley-Interscience, **1972**.
- [37] Ş. Kumbay Yıldız, Giriş Çıkış Modeline Dayalı Röle ile Kayan Kipli Denetim, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2013**.

- [38] I. Z. Tsytkin, Relay control systems, 1st edition. Cambridge University Press Cambridge, **1984**.
- [39] M. E. Orejas, UAV Stabilized Platform, Master's thesis, Lulea University of Technology, Lulea, **2007**.
- [40] Ş. Akyürek, B. Kürkçü, Ü. Kaynak, and C. Kasnakoğlu, Control loss recovery autopilot design for fixed-wing aircraft, IFAC-PapersOnLine, 49(9):117–123, **2016**.
- [41] ASELSAN, <https://www.aselsan.com.tr/tr/savunma/urun/2632/cats>. (Erişim Tarihi: **2023-04-06**).
- [42] E. Poyrazoğlu, Detailed modeling and control of a 2-DOF gimbal system, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, **2017**.

EKLER

Ek 1 : İngilizce Türkçe Terimler Sözlüğü

adaptive	:	uyarlamalı
amplitude	:	genlik
bandwidth	:	bant genişliği
block diagram	:	öbek çizeneği
cascade	:	ardışık
chattering	:	çatırdama
closed-loop	:	kapalı döngü
continuous-time	:	sürekli zaman
controller	:	denetleyici
cost function	:	maliyet işlevi
damping ratio	:	sönüm oranı
disturbance	:	bozucu
disturbance rejection	:	bozucu bastırma
encoder	:	açıölçer
estimation	:	kestirme
estimator	:	kestirici
feedback	:	geribesleme
feedforward	:	ileri besleme
filter	:	süzgeç
forgetting factor	:	unutma çarpanı
friction	:	sürtünme
function	:	işlev
fuzzy logic	:	bulanık mantık
gyro	:	ivmeölçer

information matrix	: bilgi matrisi
inertia	: atalet
inertially stabilized platform	: ataletsel kararlılaştırılmış platform
inner loop	: iç döngü
input	: giriş
integral action	: tümlev etkili
least square	: en küçük kareler
linear	: doğrusal
LQR	: DKD
model matching	: kutup uyumlama
natural frequency	: doğal frekans
noise	: gürültü
observer	: gözleyici
open loop	: açık döngü
optimal	: eniyi
optimization	: eniyileme
order	: derece
outer loop	: dış döngü
output	: çıkış
overshoot	: aşma
pole	: kutup
PID	: OTT
PI	: OTüm
PD	: OTür
performance	: başarımlı
performance criteria	: başarımlı ölçütü
polynomial	: çokterimli
position control	: konum denetimi

positive semi-definite	: yarı kesin artı
recursive	: özyineleme
referance	: dayanak
relative degree	: görelî derece
relay	: röle
response	: cevap
robust	: gürbüz
sampling period	: örnekleme aralığı
settling-time	: durulma zamanı
scaler	: sayıl
self-tuning	: özayarlamalı
sensor	: algılayıcı
setpoint	: istenilen çıkış
signal	: sinyal
simulation	: benzetim
sliding mode control	: kayan kipli denetim
speed control	: hız denetimi
stable	: kararlı
state-space	: durum uzayı
steady-state	: kalıcı durum
step	: basamak
threshold	: eşik değeri
torque	: tork
transfer function	: aktarım işlevi
unbalance	: dengesizlik
unstable	: kararsız
zero	: sıfır

Ek 2 : Tezden Türetilmiş Yayınlar

- Tezden türetilmiş olan **”Bir Gimbal Sisteminin Özayarlama 2 Serbestlik Dereceli OTüm Denetimi”** başlıklı bildiri, 14-16 Eylül 2023 tarihlerinde İstanbul Teknik Üniversitesi’nde gerçekleştirilen Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı 2023’de sunulmuştur.

Bir Gimbal Sisteminin Özayarlamalı 2 Serbestlik Dereceli OTüm Denetimi Self-Tuning 2 Degree-of-Freedom PI Control of a Gimbal System

Muharrem Mandacı^{1,2,a}, Şölen Kumbay Yıldız^{1,b}

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

²Kontrol Sistemleri Tasarım Müdürlüğü
ASELSAN A.Ş., Ankara

^ammandaci@aselsan.com.tr

^bsolen@ee.hacettepe.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, 2 Serbestlik Derecesine Sahip (2 SD) Oransal-Tümlevsel (OTüm) denetleyici ve Özayarlamalı 2 SD OTüm denetleyici tasarımı açıklanmaktadır. Her iki denetleyicinin performansı model parametre değişiklikleri altında bir benzetim ortamında test edilerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca, denetleyiciler gerçek bir gimbal sisteminde hem oda sıcaklığında hem de soğuk çalışma ortamında uygulanarak sonuçları irdelenmiştir. Özayarlamalı 2 SD OTüm denetleyicisinde, parametre değişimleri altında 2 DoF OTüm denetleyicisinde gözlenen performans düşüşünü önlemek için sistemin parametrelerini kestirmek üzere Kesikli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler (KZÖEKK) yöntemi kullanılmıştır.

Abstract

This study presents an explanation of the design of two types of controllers: the 2 Degree-of-Freedom (2 DoF) PI controller and the Self-Tuning 2 DoF PI controller. A comparison of the performance of both controllers is conducted under model parameter changes using a simulation environment. Furthermore, the controllers are tested on a real gimbal system in both room temperature and a cold environment, and the results are compared. The Self-Tuning 2 DoF PI controller utilizes the Discrete-Time Recursive Least Squares (DTRLS) method to estimate the parameters of the system to prevent the performance degradation observed in the 2 DoF PI controller under parameter variations.

1. Giriş

Gimbal sistemleri, elektro-optik stabilize sistemler için hedef takip ve hedefe yönelim gibi önemli görevi yerine getiren yapılardır. Takıldıkları platform ve buldukları çevre koşulları kaynaklı bozulmalara maruz kalmaktadırlar. Gimbal mekaniği genellikle iki eksenli oluşmaktadır. Gimbal, eksenleri üzerinde

bakış hattını bozacak açısal hareketleri algılayarak bunlara ters yönde motorları döndürerek bakış hattını sabit tutmayı hedefler. Bu bakış hattı stabilizasyonu olarak adlandırılmaktadır.

Gimbal denetimi hem konum takibini yapabilmek hem de bakış hattı stabilizasyonunu koruyabilmek amacıyla genellikle iç içe iki denetim döngüsünden oluşmaktadır. İçte yer alan hız denetim döngüsü yüksek frekanslı bozucuları bastırırken, dışta yer alan ve bant genişliği iç döngüye görece daha düşük olan konum döngüsü ise bakış hattının yönlendirilmesini sağlamaktadır. Gimbal sistemleri için temel denetim problemi içte yer alan hız denetim döngüsüdür [1]. Denetleyici başarımlarını düşüren temel etkilerin başında model parametre değişimi gelmektedir. Özellikle askeri sistemlerde zorlu çevre koşullarında çalışma şartı aranmaktadır. Geniş sıcaklık aralığında çalışması beklenen sistemlerin, sıcaklık etkisi nedeniyle model parametrelerinde zamanla değişimler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle iç döngüde genellikle model parametre değişimlerine karşı gürbüz denetleyiciler tercih edilmektedir.

Gimbal bakış hattı stabilizasyonu alanında bir çok farklı denetim yöntemi için çalışmalar yapılmaktadır. OTT (Oransal - Tümlevsel - Türevsel) denetleyicilerin [2, 3] kullanılarak yapılan çalışmaların yanı sıra, LQR tabanlı denetleyiciler [4], Kayan Kipli Denetim Yapıları [5, 6] kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Çalışma ortamından kaynaklı model parametrelerinde meydana gelen değişimler sonucunda denetim başarımı düşülebilmektedir. Bu gibi problemlerin çözümü için uyarlamalı denetim yapıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Uyarlamalı denetim kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada model parametre belirsizliklerinin etkisi azaltılırken [7], bir başka çalışmada EKK yöntemi yardımıyla kestirilen model parametreleri kullanılarak denetim yapısının bozucu bastırma performansının artırılabilceği [8] gösterilmektedir.

Bu çalışma kapsamında bir gimbal sisteminin model parametre değişimi altında hız döngüsünün başarımı irdelenmektedir. Denetleyici olarak 2 SD OTüm ve Özayarlamalı 2 SD OTüm denetim yapıları kullanılmaktadır. Özayarlamalı 2 SD denetleyici, sistem modeli parametrelerinin yineli olarak kestirildiği ve bu kestirilen model parametrelerine göre denetim yön-

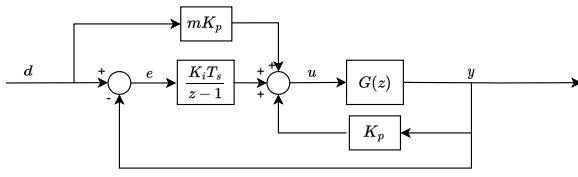
teminin parametrelerinin güncellendiği yapıdır.

2. Denetleyiciler

Bu bölümde hem benzetimde hem de gerçek sistem üzerinde uygulanan denetleyiciler anlatılmaktadır.

2.1. 2 SD OTüm

2 SD OTüm denetleyici [9] öbek çizeneği Şekil 1 ile gösterilmektedir. Şekil 1'de d dayanak girişini, e hata sinyalini, u denetim sinyalini ifade ederken, y sistem çıkışını ifade etmektedir. K_p , K_i ve m parametreleri, 2 SD OTüm denetleyicisinin parametreleridir ve T_s örnekleme zamanını göstermektedir. Son olarak $G(z)$ ayrık zaman sistem modelidir.



Şekil 1: 2 SD OTüm Denetleyici

2 SD OTüm denetleyicisinde, klasik OTüm denetleyiciden farklı olarak dayanak girişi sinyali bir katsayı (m) ile çarpılmaktadır. Bu sayede OTüm denetleyicinin kapalı döngü aktarım işlevine ek olarak getirdiği sıfırın konumu ayarlanabilmektedir.

$G(z)$ Eşitlik 1 ile verilen aktarım işlevi olarak seçildiğinde öbek çizeneğinin kapalı döngü aktarım işlevi $T(z)$, Eşitlik 2 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$G(z) = \frac{b}{z+a} \quad (1)$$

$$T(z) = \frac{K_p m b z - K_p m b + K_i T_s b}{z^2 + z(a-1 + K_p b) - a - K_p b + K_i T_s b} \quad (2)$$

Denetleyici parametreleri seçilerek kapalı döngü aktarım işlevi, belirlenen bir hedef aktarım işlevine ($T_d(z)$) eşitlenebilmektedir. $T_d(z)$ (Eşitlik 4), istenen sistem cevabı parametreleri doğal frekans ω_n ve sönüm oranı ζ kullanılarak elde edilen $T_d(s)$ (Eşitlik 3) aktarım işlevinin ayrık zaman formudur. Belirlenen aktarım işlevi ile model uyumlama Eşitlik 5 ile gösterildiği yapılmaktadır [10].

$$T_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$T_d(z) = \frac{z+c}{z^2 + tz + p} \quad (4)$$

$$\frac{K_p m b z - K_p m b + K_i T_s b}{z^2 + z(a-1 + K_p b) - a - K_p b + K_i T_s b} = \frac{z+c}{z^2 + tz + p} \quad (5)$$

Denetleyici parametreleri $T_d(z)$ ve $G(z)$ parametreleri cinsinden Eşitlik 6 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$K_p = \frac{t-a+1}{b} \quad K_i = \frac{p+a+K_p b}{T_s b} \quad m = \frac{K_i T_s}{K_p (c+1)} \quad (6)$$

2.2. Özyarlamalı 2 SD OTüm

Bir kestirim yöntemi yardımı ile model parametrelerini sürekli olarak kestiren ve bu kestirilen yeni model parametrelerine göre denetleyicinin kendisini güncellediği denetim yapılarına özyarlamalı denetim yapıları denilmektedir. En yaygın kullanılan parametre kestirim yöntemlerinden biri özyinelemeli en küçük kareler yöntemidir (Recursive Least Squares, RLS).

2.2.1. Kesikli Zaman Özyinelemeli En Küçük Kareler (KZÖEKK) Metodu ile Parametre Kestirimi

Bir sistem modeli, $y(t)$ sistem çıkışı, $u(t)$ sistem girişi ve q ileri kaydırma işlevi olmak üzere Eşitlik 9 ile gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte yer alan A ve B çokterimliliği Eşitlik 7 ve 8 ile verilmektedir.

$$A(q) = q^n + a_1 q^{n-1} + \dots + a_n \quad (7)$$

$$B(q) = b_1 q^{m-1} + b_2 q^{m-2} + \dots + b_m \quad (8)$$

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) \quad (9)$$

Bu model kesikli zamanda Eşitlik 10 ile gösterilen fark denklemleri cinsinden yeniden ifade edilebilmektedir.

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t+m-n-1) + \dots + b_m u(t-n) \quad (10)$$

Bu fark denklemi doğrusal parametre formunda yazıldığında Eşitlik 11 elde edilmektedir.

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta \quad (11)$$

θ ve φ vektörleri Eşitlik 12 ve 13 ile verilmektedir. $\varphi(t)$ sistem girişi ve çıkış sinyallerini içeren veri vektörünü, θ parametre vektörünü ifade etmektedir.

$$\theta^T = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_m] \quad (12)$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n) \ u(t+m-n-1) \dots u(t-n)] \quad (13)$$

θ parametrelerinin kestirilmesi için KZÖEKK yöntemi [11] kullanılmaktadır. Kestirilen parametreler ile gerçek parametreler arasındaki kestirim hatalarının (Eşitlik 14) kareleri toplamı maliyet işlevi (Eşitlik 15) olarak tanımlanmaktadır. $\hat{y}(t)$ kestirilen çıkışı ve $\hat{\theta}$ kestirilen parametre vektörünü göstermektedir.

$$\epsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta} \quad (14)$$

$$J = \sum_{k=1}^t (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (15)$$

Maliyet işlevini en küçük yapan $\hat{\theta}$ vektörünü özyinelemeli olarak hesaplamak için, Eşitlik 16, 17, 18 ve 19 ile verilen KZÖEKK yöntemi kullanılmaktadır.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t+1)\epsilon(t+1) \quad (16)$$

$$\epsilon(t+1) = y(t+1) - \varphi^T(t+1)\hat{\theta}(t) \quad (17)$$

$$K(t+1) = \frac{P(t)\varphi(t+1)}{\lambda + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (18)$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda} \left[P(t) - K(t+1)\varphi^T(t+1)P(t) \right] \quad (19)$$

P(t) eşdeğişinti (covariance) matrisini ve λ unutma çarpımını ifade etmektedir. P(t) matrisinin başlangıç değerinin seçimi Eşitlik 20 ile gösterilmektedir.

$$P(0) = \alpha I \quad (20)$$

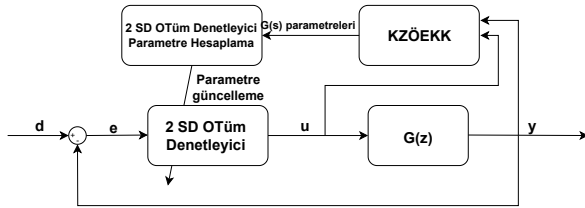
α 1000-100000 arası bir sayıdır. Eğer sistem modeli hakkında bir bilgi yoksa parametre vektörü θ 'nın ilk değeri Eşitlik 21 ile gösterildiği gibi seçilmektedir.

$$\theta(0) = 0 \quad (21)$$

Eğer model parametreleri hakkında bir bilgi mevcut ise, bu parametre değerleri $\theta(0)$ değeri olarak atanır.

2.2.2. Denetleyici Parametre Güncelleme

Şekil 2 ile özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılarak denetleyici parametrelerinin kestirildiği, parametreleri güncellenen denetleyici ile denetimin yapıldığı yapının öbek çizeneği gösterilmiştir. Her örnekleme zamanında kestirilen \hat{a} ve \hat{b} parametreleri kullanılarak güncel denetleyici parametreleri Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır. Bu şekilde yer alan u denetim sinyali, y sistem çıkışıdır. Ayrıca d dayanak girişini ve e hata sinyalini ifade etmektedir.



Şekil 2: Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi ile Özyarlamalı OTüm Denetim Yapısı

3. Benzetim Sonuçları

Kullanılan sistem modeli Eşitlik 22'de gösterilmektedir. Sistem üzerine 2 SD OTüm ve Özyarlamalı 2 SD OTüm denetleyicileri uygulanmaktadır. Benzetim çalışmaları MATLAB 2020B Simulink ortamında gerçekleştirilmektedir.

$$G_b(z) = \frac{b}{z+a} = \frac{0.009081}{z-0.9959} \quad (22)$$

Benzetimin $t=0.7s$ anında a parametresi -0.9959 'dan -0.9897 'ye ve b parametresi 0.009081 'den 0.009958 değerine yükselmektedir.

Tablo 1 ile benzetim için kullanılan başarımlar kriteri değerleri verilmektedir. Tabloda durulma süresi ve aşma başarımlar ölçütü değerleri ile birlikte bu başarımlar ölçütlerini sağlayacak şekilde seçilen istenen kapalı döngü aktarım işlevi parametrelerinin değerleri (ω_n ve ζ) gösterilmektedir.

Tablo 1: $G_b(z)$ için Kullanılan Parametreler

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma
40 rad/s	1	0.15 sn	%0

3.1. 2 SD OTüm Sonuçları

Şekil 3 ile 2 SD OTüm denetleyicinin sonuçları gösterilmektedir. Benzetim modeli $G_b(z)$ ve Tablo 1 ile verilen değerler kullanılarak Eşitlik 6 ile hesaplanan denetleyici parametreleri Tablo 2 ile verilmektedir. 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimi öncesi ve sonrasında ürettiği her iki cevap da aşmasızdır. Model parametre değişimi öncesinde istenen çıkış ile sistem çıkışının benzer olduğu görülmektedir ancak parametre değişiminden sonra sistem çıkışı yavaşlamaktadır. 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimi gerçekleştikten sonraki geçici tepkisi dayanak modelinden farklıdır. Bu nedenle denetim başarımlarını koruyamadığı görülmektedir.

Tablo 2: $G_b(z)$ için 2 SD OTüm Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m
3.90	86.35	≈ 0

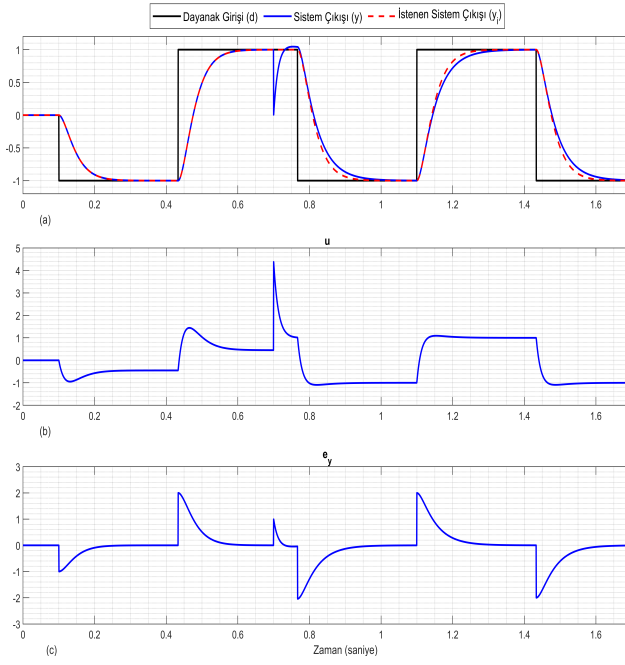
3.2. Özyarlamalı 2 SD OTüm Sonuçları

Şekil 4 ile KZÖEKK parametre kestirim yöntemini kullanan Özyarlamalı 2 SD OTüm denetleyici sonuçları gösterilmektedir. Tablo 1 ile verilen değerler ve KZÖEKK ile kestirilen model parametreleri (\hat{a} , \hat{b}) kullanılarak her örnekleme zamanında denetleyici parametreleri Eşitlik 6 kullanılarak güncellenmektedir. Tablo 3 ile KZÖEKK yönteminin parametreleri verilmektedir. Tabloda yer alan iki farklı unutma çarpımı için benzetim tekrarlanmakta ve sonuçları birlikte verilmektedir.

Tablo 3: $G_b(z)$ için KZÖEKK yöntemi parametreleri

θ_0	α	λ_1	λ_2
[0 0]	10000	1	0.996

Model parametre değişimi öncesinde sistem cevabının istenen sistem cevabına benzediği görülmektedir. Model parametre değişimi meydana geldikten sonra ilk dayanak girişi değişiminde sistem cevabının yavaşladığı, ancak zamanla kestirim yönteminin yeni model parametrelerini kestirmesi sonucunda cevabın hızlandığı görülmektedir. Kestirilen model parametreleri, yeni model parametrelerine yeterince yakınsadıktan sonra,



Şekil 3: $G_b(z)$ ile 2 SD OTüm Denetleyici

sistem cevabının model parametre değişimi öncesindeki cevaba benzer olduğu görülmektedir. Özayrıklama 2 SD OTüm denetleyicinin model parametre değişimine karşı denetim başarımını koruduğu görülmektedir.

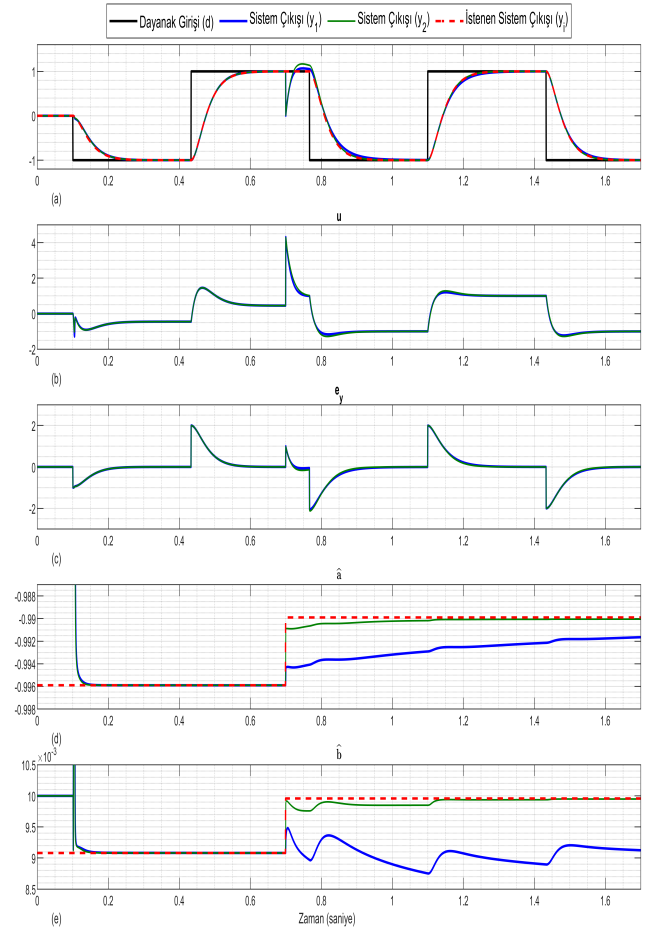
Şekil 4-d ve Şekil 4-e grafikleri incelendiğinde unutma faktörünün etkisi görülmektedir. $\lambda_1 = 1$ için yapılan benzetimde KZÖEEK eski değerleri unutmadığı için parametre yakınsaması oldukça yavaş olmaktadır. $\lambda_2 = 0.996$ değeri için yapılan benzetimde, KZÖEEK yönteminin veri hafızası 0.12 saniyedir. Bu nedenle eski verileri unutmaktadır. Böylece değişen model parametrelerine daha hızlı yakınsamaktadır. Unutma çarpanının doğru seçimi KZÖEEK yönteminin parametre yakınsamasını, dolayısıyla model parametre değişimi altında sistem cevabının istenen sistem cevabına yakınsama hızını doğrudan etkilemektedir.

4. Uygulama

Bu bölümde denetleyicilerin bir gimbal sisteminin bir eksenine uygulanması ile elde edilen sonuçlara yer verilmektedir.

4.1. Kullanılan Sistem Modeli

Bu bölümde kullanılan sistem modeli Şekil 5 ile gösterilen bir gimbal ekseninin basitleştirilmiş modelidir. Model girişi akım ($I(s)$) ve model çıkışı açılma hız ($W(s)$) olmak üzere sistem modelinin aktarım işlevi Eşitlik 23 ile gösterilmektedir. Bu modelde yer alan K_t parametresi kullanılan motorun teknik dokümanında yer alan motor tork sabitini, J ve B_v parametreleri ise sistemin mekanik tasarımı sonucunda ortaya çıkan dönüş eksen eylemsizlik momenti değerini ve sürtünme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 4: $G_b(z)$ ile KZÖEEK 2 SD OTüm Denetleyici

$$G_s(s) = \frac{I(s)}{W(s)} = \frac{K_t}{Js + B_v} \quad (23)$$

Eşitlik 24 ile bir gimbal sisteminin kesikli zaman aktarım işlevi gösterilmektedir. Uygulamada bu model üzerinden denetleyiciler uygulanmaktadır.

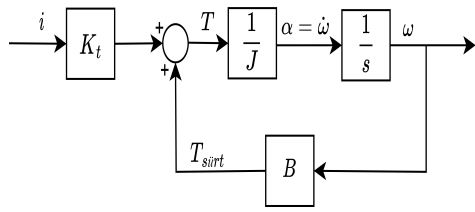
$$G_s(z) = \frac{b}{z + a} \quad (24)$$

Eşitlik 25 ile motor teknik dokümanındaki değerler ve mekanik tasarım sonucu elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan gimbal modeli verilmektedir.

$$G_s(z) = \frac{0.01797}{z - 0.9972} \quad (25)$$

4.2. Uygulama Sonuçları

Gimbal oda sıcaklığındayken denetleyiciler sisteme uygulanmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Ardından gimbal, özellikle hava platformlarının maruz kaldığı en düşük sıcaklıklardan biri olarak kabul edilen -40°C 'lik düşük sıcaklık kabine konarak sistem üzerinde sıcaklık değeri durağan duruma geçene kadar



Şekil 5: Bir Gimbal Ekseninin Basitleştirilmiş Modeli

beklenmiştir ve sonra denetleyiciler sisteme uygulanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Ortamın soğuması sonucu sistemdeki motor, rulman, rulman yağı gibi elemanlardan gelen sürtünme miktarı artacağı için model parametreleri değişmektedir. Bu sayede soğuk ortam kaynaklı parametre değişimine karşı denetleyicilerin başarımı incelenmektedir.

Tabloda 4 ile verilen ω_n ve ζ değerleri istenen cevabın kapalı döngü aktarım işlevinin parametrelerini göstermektedir. Ayrıca denetleyicilerin üretebileceği en büyük akım değeri limiti de tabloda yer almaktadır. Denetim sinyali bu değer üzerinde hesaplanırsa denetleyici içerisinde sınırlandırılmaktadır.

Tablo 4: Uygulama - Başarım Ölçütleri Tablosu

ω_n	ζ	t_d	En Büyük Aşma	Akım Limiti
40 rad/s	0.9	0.12 sn	<<%1	8

4.2.1. 2 SD OTüm

Denetleyici parametreleri Tablo 5 ile verilmektedir.

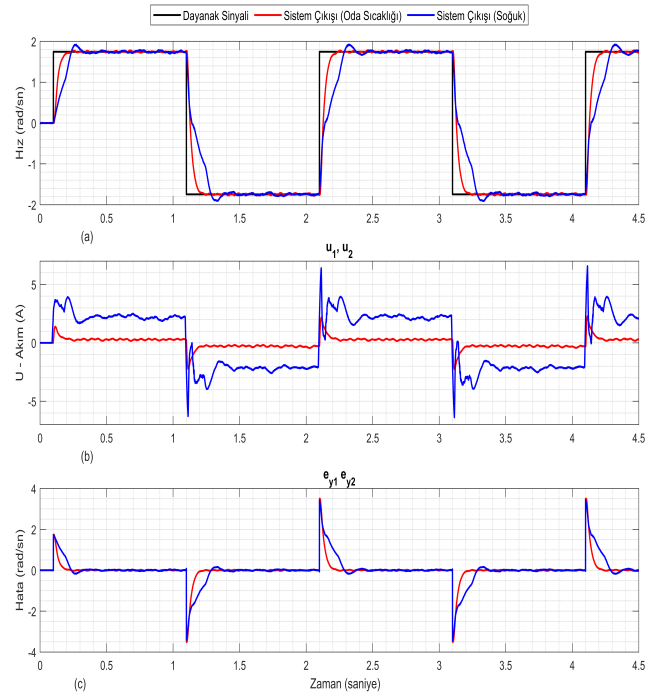
Tablo 5: $G_s(z)$ 2 SD OTüm Tipi Denetleyici Parametreleri

K_p	K_i	m	T_s
1.84	66.7	≈ 0	500 μ s

Model uyumlama yöntemi kullanıldığı için, oda sıcaklığında sistem cevabı, istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olmaktadır. Şekil 6-a incelendiğinde denetleyicinin oda sıcaklığında %0 aşma yapmadığı ve soğuk ortamda %10 aşma yaptığı görülmektedir. Oda sıcaklığında denetleyicinin durulma zamanı 120 milisaniye olarak ölçülmektedir. Şekil 6-b incelendiğinde soğuk ortamda denetim sinyalinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir, buna rağmen soğuk ortamda durulma 170 milisaniye olarak ölçülmektedir. Denetleyici oda sıcaklığında her iki başarım ölçütünü de sağlarken, soğuk koşul altında 120 milisaniyelik durulma süresi ölçütünü ve aşma ölçütünü sağlayamamıştır.

4.2.2. Özayarlama 2 SD OTüm

Şekil 7 ile iki farklı sıcaklık koşulu altında uygulanan KZÖEKK 2 SD OTüm denetleyicinin sonuçları ve parametre değişimleri birlikte verilmektedir. Önceki grafiklere ek olarak şekilde yer alan dördüncü (d) ve beşinci (e) grafiklerde kestirilen sistem



Şekil 6: İki Farklı Sıcaklıkta 2 SD OTüm Denetleyicinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

modeli parametreleri (\hat{a} ve \hat{b}) yer almaktadır. Tablo 6 ile uygulamada KZÖEKK yöntemi için kullanılan parametreler verilmektedir.

Tablo 6: $G_s(z)$ için KZÖEKK yöntemi parametreleri

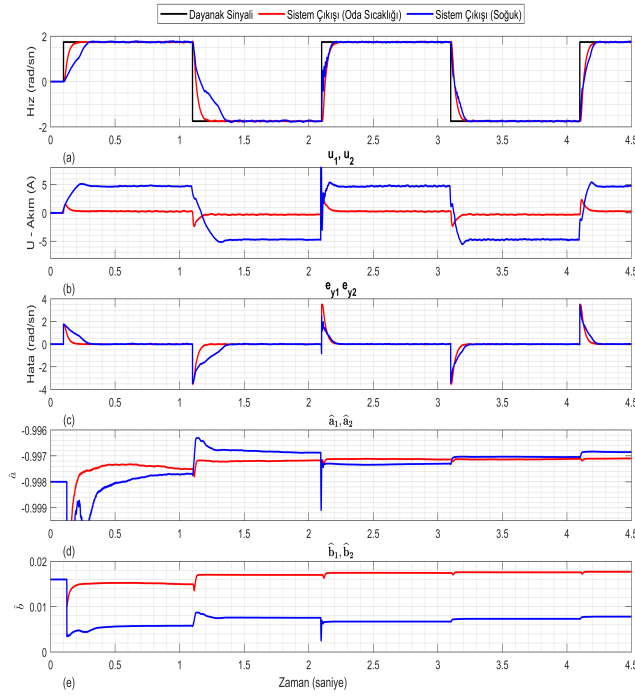
θ_0	α	λ
[-0.998 0.015]	100000	0.998

Şekil 7-a incelendiğinde, Model uyumlama yapılmasından dolayı, her iki koşulda da sistem cevabının istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabı ile çok benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle Özayarlama 2 SD OTüm denetleyici her iki koşulda da beklendiği üzere aşmasız bir cevaba sahiptir. Oda sıcaklığında yapılan teste durulma süresi 120 milisaniye olarak elde edilmiştir. $-40^\circ C$ sıcaklığında yapılan teste ilk bir kaç saniyede denetleyicinin istenen kapalı döngü aktarım işlevinin cevabından daha yavaş bir cevap verdiği, ancak parametre kestirimi soğukta değişen model parametrelerine yakınsadıkça sistem cevabının hızlandığı görülmektedir.

Şekil 7-c ve 7-d ile verilen grafikler incelendiğinde model parametrelerinin iki sıcaklık koşulunda da yaklaşık 2 saniyede yakınsadığı görülmektedir.

5. Sonuçlar

2 SD OTüm denetleyicisinde denetleyici parametrelerinin hesaplanmasında sistem modeli parametreleri kullanılmaktadır. Hem benzetim hem uygulama sonuçları incelendiğinde model



Şekil 7: İki Farklı Sıcaklıkta Özyarlamalı 2 SD OTüm Denetleyicinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

parametreleri yeterince iyi bilindiği durumda istenen sistem çıkışını verdiği görülmektedir. Ancak model parametreleri değiştiğinde, denetleyicinin başarımı düşmektedir. Ancak model parametrelerinde meydana gelen değişimlere karşı denetim başarımını koruyamamaktadır.

Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici ise model parametrelerindeki değişimini KZÖEEK yöntemi ile kestirerek, denetleyici parametrelerini her örnekleme zamanında güncellemektedir. Bu sayede model parametrelerinde bir değişim meydana geldiğinde 2 SD OTüm denetim yapısından farklı olarak başarımını korumaktadır. Çalışma sonucunda model parametrelerinde değişiklik meydana gelmesi olası sistemlerde Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyicinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici yöntemi için unutmaya çarpanının etkisi görülmektedir. $\lambda = 1$ seçilen durum, yani yöntemin eski verileri unutmadığı durum için parametre yakınsamasının oldukça yavaş olduğu, λ değerinin düşürülmesi sonucunda yakınsama hızının arttığı görülmektedir. Özyinelemeli 2 SD OTüm denetleyici kullanılırken sistem uygun bir unutmaya çarpanının seçilmesi denetim başarımını doğrudan etkilemektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu denetim yöntemlerinin başarımı giriş ve çıkış bozucu etkileri altında incelenebilir. Sinüzoidal, rampa gibi farklı dayanak sinyalleri kullanılarak denetleyicilerin başarımları karşılaştırılabilir. Son olarak farklı denetim yöntemleri de denenerek bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile kıyaslanabilir.

6. Kaynakça

- [1] J. M. Hilkert, "Inertially stabilized platform technology, concepts and principles", *IEEE Control Systems Magazine*, 28(5):25–39, 2008.
- [2] W. Ji, Q. Li, B. Xu, J.-J. Tu, and D.-A. Zhao, "Cascade servo control for los stabilization of opto-electronic tracking platform—design and self-tuning," in *2009 International Conference on Information and Automation*. IEEE, 2009, pp. 1034–1039.
- [3] Mohd Hafiez Ahmad, Khairuddin Osman, Mohd Fais Mohd Zakeri, and S. I. Samsudin, "Mathematical modeling and pid controller design for two dof gimbal system," in *2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)*, pages 138–143, 2021.
- [4] Ki-jun Seong, Ho-gyun Kang, Bo-yeon Yeo, and Ho-yeon Lee, "The stabilization loop design for a two-axis gimbal system using lqg/ltr controller," in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 755–759, 2006.
- [5] B. J. Smith, W. J. Schrenk, W. B. Gass, and Y. B. Shtessel, "Sliding mode control in a two-axis gimbal system," in *1999 IEEE aerospace conference. Proceedings (Cat. No. 99TH8403)*, vol. 5. IEEE, 1999, pp. 457–470.
- [6] C. Espinosa, K. Mayen, M. Lizarraga, S. S. H. Romero, and R. Lozano, "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)*. IEEE, 2015, pp. 431–438.
- [7] Andrei Battistel, Tiago Roux Oliveira, and Victor Hugo Pereira Rodrigue, "Adaptive control of an unbalanced two-axis gimbal for application to inertially stabilized platforms," in *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 99–104, 2019.
- [8] Sangdeok Lee and Seul Jung, "RIs model identification-based robust control for gimbal axis of control moment gyroscope." In *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 584–589, 2017.
- [9] Araki, Mituhiko, and Hidefumi Taguchi. "Two-degree-of-freedom PID controllers." *International Journal of Control, Automation, and Systems* 1.4 (2003), 401-411.
- [10] KJ Astrom and T Hagglund. "Pole placement," In *PID Controllers-Theory, Design, and Tuning*, pages 173–179. Instrument Society of America, 1995.
- [11] V. Strojic, "Least squares parameter estimation", *Automatica*, 16(5) ,535–550, 1980. ISSN 0005-1098.