

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MODEL REFERANS
UYARLAMALI DENETLEYİCİ İLE DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİ YÜKSEK
FIRIN GAZ TEMİZLEME TANK SİSTEMİ DENETİMİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÖZGÜR ASLAN

OCAK 2023

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MODEL REFERANS
UYARLAMALI DENETLEYİCİ İLE DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİ YÜKSEK
FIRIN GAZ TEMİZLEME TANK SİSTEMİ DENETİMİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Özgür ASLAN

DANIŞMAN: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

ZONGULDAK

Ocak 2023

KABUL:

Özgür ASLAN tarafından hazırlanan “Bulanık Tabanlı Kazanç Düzenlemeli Model Referans Uyarlamalı Denetleyici ile Demir Üretim Süreçleri Yüksek Fırın Gaz Temizleme Tank Sistemi Denetimi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/01/2023

Danışman: Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Aytaç ALTAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Hamit AYDIN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Raif BAYIR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Fecir DURAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Özgür ASLAN

ÖZET

Doktora Tezi

BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİ İLE DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİ YÜKSEK FIRIN GAZ TEMİZLEME TANK SİSTEMİ DENETİMİ

Özgür ASLAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

Ocak 2023, 129 sayfa

Model referans uyarlamalı denetleyici (MRAC), uygulama kolaylığı ve düşük işlem ihtiyacı özellikleri ile öne çıkan bir denetim yaklaşımıdır. Bir sisteme MRAC uygulamak için o sistemin matematik modelinin bilinmesine gerek duyulmamaktadır. Denetleyici tasarımında dinamik cevabı, sistem ile uyumlu, sistem isterlerini karşılayan bir referans model ve denetim işaretini yönteminin belirlenmesi yeterli olmaktadır. MRAC'ın sahip olduğu uyarlama algoritması, denetimin başlaması ile birlikte, denetim işaretini manipüle ederek sistem çıkış işaretini, denetim isterlerini sağlayan referans model çıkış işaretine yakınsamasını hedefler.

Geleneksel MRAC'ta uyarlama hızı sabittir. Uyarlama hızı, denetim sürecinin durağan olduğu durumlar ve sistemde ani değişimler yaşandığı durumların her birine cevap verecek büyüklükte seçilmektedir. Kazanç düzenlemeli MRAC'ta uyarlama hızı, her koşul için farklı bir değer olarak güncellenmektedir. Bu tez çalışmasında önerilen bulanık tabanlı kazanç düzenleme

ÖZET (devam ediyor)

sayesinde MRAC algoritması, yüksek uyarlama hızı gereken durumlar için hızlı, düşük uyarlama hızı gereken durumlar için yavaş uyarlama hızı ile denetim işaretini manipüle ederek sistem çıkışını referans model çıkışına yakınsamasını sağlayacaktır.

Bir demir çelik fabrikasının sıvı ham demir üretimini gerçekleştiren demir üretim tesisleri, matematik modeli kesin olarak bilinmeyen, dinamik cevabında değişimler ve sürekli dış bozucu etkisine maruz kalan sistemlerden oluşmaktadır. Günümüz sanayiinde, demir üretim süreçlerindeki denetim problemlerinin çözümünde otomasyon sistemlerindeki PID denetleyiciler kullanılmaktadır. PID denetleyici, değişken koşullara hızlı cevap verememesi sebebiyle bu denetim problemlerinin çözümünde yeniden tasarım ihtiyacı duymaktadır. Bu çalışmada, demir üretim süreçlerindeki denetim problemlerinde PID, geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC uygulaması sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Denetim sonuçları, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın geleneksel MRAC ve PID'ye göre başarılı olduğunu göstermiştir. Buradaki uygulamalarda öncelikle servo valf performansı incelenmiş olup elde edilen deneyimler çerçevesinde önemli bir demir üretim süreci denetim problemi olan yüksek fırın gaz yıkama tank sistemi denetim performansı tasarım isterlerine göre değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Model referans uyarlamalı denetleyici, Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli model referans uyarlamalı denetleyici, Uyarlama hızı, Demir üretim süreçleri, yüksek fırın gaz temizleme tank sistemi denetimi

Bilim Kodu: 608.05.02, 608.05.03

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

CONTROL OF BLAST FURNACE GAS CLEANING TANK SYSTEM IN IRON MAKING PROCESS USING FUZZY BASED GAIN REGULATED MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROLLER

Özgür ASLAN

Zonguldak Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rifat HACIOĞLU

January 2023, 129 pages

Model reference adaptive controller (MRAC) is an adaptive control method that stands out with its ease of implementation and low computational requirements. MRAC can be implemented to a control system, without the knowledge of the mathematical model of that system necessary to know the mathematical model of that system. To design a MRAC, it is sufficient to determine a reference model and control method that is compatible with the system and meets the system requirements. Adaptation algorithm of MRAC tries to converge the system output signal to the reference model output signal, which provides the process requirements, by manipulating the control signal, with the start of the process control.

The adaptation rate of the conventional MRAC is constant. In the design period, the adaptation speed of MRAC is determined to respond the systems needs. It should be small enough to establish control during stable conditions and it should be big enough to provide control when sudden changes affect the system or when there is changes in dynamics of the system. With gain regulated MRAC, adaptation rate is determined according to different conditions of the

ABSTRACT (continued)

system. Fuzzy-based gain regulated MRAC, suggested in this thesis, ensures low adaptation speed value for stable system conditions and high adaptation speed value for nonstable system conditions. Accurately determined adaptation speed provides the parameter convergence and the production of the correct control signal with the required speed to minimize error between system and the reference model output.

The iron making processes of an iron and steel factory, which produce liquid raw iron, consist of systems whose exact mathematical model parameters are unknown. These processes are always affected by disturbances and dynamics of the control problem changes in time. Nowadays, PID controllers of the automation system libraries are used to deal with the control problems in the iron making processes. Since PID can not give the desired response to the variable conditions, there is a need for redesign in the control problems. In this study, PID, conventional MRAC and fuzzy-based gain regulated MRAC are applied on control problems in iron making processes. As a beginning, controller performances on servo valve control problem are evaluated, based on the experience gained, the control performance parameters of the blast furnace gas cleaning tank level control system, which is an important iron making process control problem.

Keywords: Model reference adaptive controller, Fuzzy-Based gain regulated model reference adaptive controller, Adaptation speed, Iron making processes, Blast furnace gas cleaning tank system control

Science Code: 608.05.02, 608.05.03

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında yönlendirici ve yol gösterici olan, değerli fikir ve deneyimlerini benden esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU'na, doktora sürecinde beraber çalışma fırsatı bulduğum Doç Dr. Aytaç ALTAN'a, görüş ve önerileriyle gelişmeme katkı sağlayan Prof. Dr. Hamit AYDIN, Prof. Dr. Raif BAYIR ve Doç. Dr. Fecir DURAN'a,

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteğini hep yanımda hissettiğim, öneri ve tavsiyeleri ile daima ileri gitmem hususunda bana yol gösteren babam Turan ASLAN'a, ilkokul çağımda derslerime yardımcı olarak doktora serüvenimin temelini beraber attığım annem Birsan ASLAN'a, yüksek lisans çalışmalarımın beri beni motive etmeye çalışan sevgili kardeşim Elif ASLAN TAŞÇI'ya, doktora eğitimim süresince yaptığım çalışmalarda hep yanımda olan, evimizdeki uzun süreli çalışmalarımı hoşgörü ile karşılayan ve iki tane kız çocuğu dünyaya getiren değerli eşim Mina ASLAN'a, güzel kızlarım Özgü ASLAN ve Aslı ASLAN'a, doktora çalışmalarımın son safhasında yaşattığı güzel hislerden dolayı yeğenim Ata TAŞÇI'ya, tezimi dikkatle okuyarak imla hatalarını gidermeme yardım eden Merve YÜKSEL'e, yüksek lisans ve doktora çalışmalarım süresince Ereğli'den Zonguldak'a gidişlerimde uğrayıp hayır dualarını aldığım ananem Behiye BİRBEN'e,

Akademik çalışmalarım ve meslek hayatımda adeta ikinci bir okul gibi gelişmemi sağlayan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'na teşekkür ederim.

Özellikle tez yazımı süresince istemeden de olsa oyun ve eğlence zamanlarımızdan aldığım, kızım dersinizi yaptınız mı diye sorduğumda, baba sen dersini yaptın mı diye benden hesap soran sevgili kızlarım Özgü ASLAN ve Aslı ASLAN'a anlayışları için minnettarım. Bu tez çalışmasının arka planında, bir hedef belirlemek, o hedefe odaklanmak ve hedefe ulaşmak için çaba sarf etmek var. Sizin de kendi eğitim hayatınızda bunları hatırlayarak hedeflerinize ulaşmanızı diliyorum.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİ	 3
2.1 DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ.....	3
2.2 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE DENETLENEN DEĞİŞKENLER	6
2.3 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KULLANILAN DENETLEYİCİLER	9
2.4 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR.....	12
 BÖLÜM 3 MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİLER	 15
3.1 MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİ TANIMI	15
3.2 MIT VE LYAPUNOV KURALI TABANLI MRAC	19
3.3 BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC	37

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 4 SERVO VALF TEMELLİ DENEY DÜZENEĞİ DENETİM ÇALIŞMALARI.. 55

4.1 SERVO VALF TEMELLİ DENEY DÜZENEĞİ TANIM VE TASARIM İSTERLERİ	55
4.2 SERVO VALF POZİSYONU PID DENETİMİ	56
4.3 SERVO VALF POZİSYONU MRAC DENETİMİ.....	57
4.4 SERVO VALF POZİSYONU BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC DENETİMİ	61
4.5 SERVO VALF POZİSYON DENETİM ÇALIŞMALARI SONUÇLARI.....	66

BÖLÜM 5 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC UYGULAMASI..... 71

5.1 YÜKSEK FIRIN VE GAZ TEMİZLEME TANK SİSTEMİ TANITIMI.....	71
5.2 GAZ YIKAYICI TANKI SEVİYE DENETİM SİSTEMİ.....	75
5.3 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ PID DENETİMİ	79
5.4 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ MRAC DENETİMİ.....	82
5.5 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC DENETİMİ	87
5.6 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ DENETİM ÇALIŞMALARI SONUÇLARI.....	96

BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 111

KAYNAKLAR..... 115

EK AÇIKLAMALAR..... 121

ÖZGEÇMİŞ 129 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Modern yüksek fırın.....	4
Şekil 2.2 Kapalı çevrim denetim sistemi.....	7
Şekil 3.1 MRAC, referans uyarlamalı denetleyici	17
Şekil 3.2 MIT kuralı tabanlı MRAC	20
Şekil 3.3 Lyapunov kuralı tabanlı MRAC	21
Şekil 3.4 MRAC uygulaması için oluşturulan sanal sistemlerin basamak cevapları	22
Şekil 3.5 Referans model basamak cevabı	24
Şekil 3.6 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)	25
Şekil 3.7 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$) ...	26
Şekil 3.8 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$) ...	27
Şekil 3.9 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde denetim işareti ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$) ..	28
Şekil 3.10 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)	29
Şekil 3.11 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)	30
Şekil 3.12 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)	30
Şekil 3.13 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi denetim işareti ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)	31
Şekil 3.14 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde yükselme zamanı değerleri	33
Şekil 3.15 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde yerleşme zamanı değerleri	34
Şekil 3.16 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde en yüksek aşım miktarı	35
Şekil 3.17 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde % RMS hata değeri	35
Şekil 3.18 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde denetim işareti standart sapma miktarı.....	36
Şekil 3.19 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı giriş üyelik fonksiyonları	40
Şekil 3.20 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı çıkış üyelik fonksiyonları	40
Şekil 3.21 Bulanık γ tespiti karar mekanizması	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 3.22 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde sistem çıkışları	43
Şekil 3.23 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde θ uyarlaması.....	44
Şekil 3.24 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde denetim işareti	44
Şekil 3.25 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde γ 'nın θ uyarlaması hızına etkisi.....	45
Şekil 3.26 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde sistem çıkışları.....	45
Şekil 3.27 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde θ uyarlaması	46
Şekil 3.28 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde denetim işareti	47
Şekil 3.29 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde γ 'nın θ uyarlama hızına etkisi	47
Şekil 3.30 Kritik sönümlü sistemin, kritik sönümlü, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü PID ile denetiminde sistem çıkışları	49
Şekil 3.31 Kritik sönümlü sistemin, kritik sönümlü, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü PID ile denetiminde, dış bozucu bölgesi sistem çıkışları	50
Şekil 4.1 Servo valf pozisyon denetim sistemi PID ile denetiminde sistem çıkışları	57
Şekil 4.2 Servo valf pozisyon denetim sistemi MRAC denetiminde kullanılan referans model basamak cevabı.....	58
Şekil 4.3 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.06$ ve $\gamma = 23$	59
Şekil 4.4 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.06$ ve $\gamma = 23$)	60
Şekil 4.5 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.6$ ve $\gamma = 23$)	61
Şekil 4.6 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı giriş üyelik fonksiyonları	62
Şekil 4.7 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı çıkış üyelik fonksiyonları.....	62
Şekil 4.8 Bulanık γ tespiti karar mekanizması.....	64
Şekil 4.9 Servo valf pozisyonunun bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri.....	65
Şekil 4.10 Servo valf pozisyonunun bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetiminde γ değerine göre θ_1 ve θ_2 uyarlaması	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.11 Servo valf pozisyon denetimi yükselme zamanları.....	66
Şekil 4.12 Servo valf pozisyon denetimi yerleşme zamanları	67
Şekil 4.13 Servo valf pozisyon denetimi aşım değerleri	67
Şekil 4.14 Servo valf pozisyon denetimi RMS hata değerleri	68
Şekil 4.15 Servo valf pozisyon denetimi denetim işareti standart sapma değeri	69
Şekil 5.1 Yüksek fırın genel görünümü	72
Şekil 5.2 Yüksek fırın gaz yıkayıcı sistemi.....	74
Şekil 5.3 Yıkayıcı tankı seviye ölçüm sistemi	76
Şekil 5.4 Yüksek fırından alınan gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi verileri.....	77
Şekil 5.5 Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim sistemi Simulink Modeli.....	78
Şekil 5.6 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde PID denetimi sistem çıkışları.....	80
Şekil 5.7 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde PID denetimi sistem çıkışları	81
Şekil 5.8 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi MRAC test düzeneği tasarımı.....	82
Şekil 5.9 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi MRAC tasarımı, referans model basamak cevabı.....	83
Şekil 5.10 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde MRAC denetimi sistem çıkışları .	84
Şekil 5.11 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde MRAC uyarılama parametreleri ...	84
Şekil 5.12 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde MRAC denetimi sistem çıkışları	86
Şekil 5.13 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde MRAC uyarılama parametreleri	86
Şekil 5.14 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımında kullanılan bulanık kural giriş üyelik fonksiyonları	89
Şekil 5.15 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımında kullanılan bulanık kural çıkış üyelik fonksiyonları	90
Şekil 5.16 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımında bulanık tabanlı kural mekanizması	92
Şekil 5.17 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi sistem çıkışları	93
Şekil 5.18 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi γ ve θ değişimleri	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.19 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi, dış bozucu bölgesi sistem çıkışları	95
Şekil 5.20 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi, dış bozucu bölgesi γ ve θ değişimleri	95
Şekil 5.21 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde yükselme zamanları.....	97
Şekil 5.22 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde yerleşme zamanları.....	98
Şekil 5.23 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde aşım miktarları	99
Şekil 5.24 Gaz yıkayıcı denetimi, birinci zaman bölümünde RMS hata değerleri	99
Şekil 5.25 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları.....	100
Şekil 5.26 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde yükselme zamanları.....	101
Şekil 5.27 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde yerleşme zamanları.....	102
Şekil 5.28 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde aşım miktarları	103
Şekil 5.29 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde RMS hata değerleri	105
Şekil 5.30 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi denetim, ikinci zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları	105
Şekil 5.31 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde yükselme zamanları.....	107
Şekil 5.32 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde yerleşme zamanları.....	107
Şekil 5.33 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde aşım miktarları ...	108
Şekil 5.34 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde RMS hata değerleri	109
Şekil 5.35 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları.....	109

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Demir üretim süreçlerindeki kapalı çevrim denetim sistemleri	8
Çizelge 3.1 Sanal test sistemlerinin sistem parametreleri	23
Çizelge 3.2 Sanal test sistemleri için tasarlanan PID denetleyici parametreleri	23
Çizelge 3.3 Kritik sönümlü sanal test sistemi denetim çalışmasının 30. saniyesinden sonra MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.....	32
Çizelge 3.4 Bulanık γ düzenlemesi kuralları	41
Çizelge 3.5 Kritik sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.....	51
Çizelge 3.6 Düşük sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.....	52
Çizelge 3.7 Aşırı sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.....	53
Çizelge 4.1 Sanal test sistemleri için tasarlanan PID denetleyici parametreleri	56
Çizelge 4.2 Bulanık Kurallar.....	63
Çizelge 5.1 Tank sistemi denetimi için tasarlanan PID denetleyici parametreleri.....	80
Çizelge 5.2 Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim çalışmasında MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC kullanımı sonucunda 2000 ile 4000. saniyeleri arasında oluşan denetim performans parametreleri.....	87
Çizelge 5.3 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık kurallar.....	91



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK A: MIT Kuralı Tabanlı MRAC	121
EK B: Lyapunov Kuralı Tabanlı MRAC	125





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

r	: Referans giriş işareti
e	: Sistemi hatası
u	: Denetim işareti
y_p	: Sistem çıkış işareti
K_p	: Oransal sabit
K_i	: İntegral sabiti
K_d	: Türev sabiti
t	: Zaman değişkeni
τ	: Zaman değişkeni
y_m	: Referans model çıkış işareti
θ_1	: MRAC birinci uyarlama parametresi
θ_2	: MRAC ikini uyarlama parametresi
J	: Eder fonksiyonu
θ	: Uyarlama parametreleri
γ	: MRAC uyarlama hızı katsayısı
q	: Türev değişken dönüşüm operatörü
s	: Laplace operatörü
$G_m(s)$	: Referans model transfer fonksiyonu
$R(s)$	: Referans giriş işareti
$G(s)$	: Sistem transfer fonksiyonu
$E(s)$	: Hata işareti
a	: Sistem model parametresi
b	: Sistem model parametresi
a_m	: Referans model parametresi
b_m	: Referans model parametresi
V	: Lyapunov fonksiyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$G_{ks}(s)$	: Kritik sönümlü sanal test sistemi transfer fonksiyonu
$G_{ds}(s)$	: Düşük sönümlü sanal test sistemi transfer fonksiyonu
$G_{as}(s)$	: Az sönümlü sanal test sistemi transfer fonksiyonu
$\frac{\partial}{\partial \theta}$	: Kısmi türev operatörü
γ'	: MRAC uyarlama katsayısı değişken dönüşümü operatörü

KISALTMALAR

B	: Büyük
B. Lyp	: Bulanık tabanlı kazanç düzenelemeli MIT kuralı tabanlı MRAC
B. MIT	: Bulanık tabanlı kazanç düzenelemeli MIT kuralı tabanlı MRAC
°C	: Santigrat derece
CK	: Çok küçük
CO	: Karbon monoksit
CO₂	: Karbondioksit
ÇB	: Çok büyük
DCS	: Distributed control system, ayrık denetim sistemi
H₂	: Hidrojen
K	: Küçük
Lyp	: Lyapunov
M.Ö.	: Milattan önce
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
MPC	: Model redictive controller, model öngörülü denetleyici
MRAC	: Model reference adaptive controller, model referans uyarlamalı denetleyici
N₂	: Azot
NASA	: Americaleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NB	: Negatif büyük
NK	: Negatif küçük
No	: Numara
PB	: Pozitif büyük

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

PID	: Proportional integral derivative
PID_{as}	: Aşırı sönümlü sanal test sistemi için tasarlanan PID
PID_{ds}	: Düşük sönümlü sanal test sistemi için tasarlanan PID
PID_{ks}	: Kritik sönümlü sanal test sistemi için tasarlanan PID
PK	: Pozitif küçük
PLC	: Programmable logic controller, programlanabilir mantıksal denetleyici
RMS	: Root mean square, karelerinin ortalamasının karekökü
X-15	: Nasa araştırma uçağı





BÖLÜM 1

GİRİŞ

Model referans uyarlamalı denetleyiciler (MRAC), sistemin matematiksel modelinin bilinmediği durumlarda kullanılan denetleyicilerdir. MRAC, bünyesindeki uyarlama algoritması ile denetlenen sistem cevabının, tasarım isterlerine göre oluşturulan referans modele yakınsatacak bir denetim işareti üretir. Uyarlama algoritmasındaki parametreler, belirli bir uyarlama hızı ile ideal değerlere yakınsayarak denetim işaretini üretmektedir. Sisteme etki eden değişkenlerde bir farklılık oluştuğunda, uyarlanan parametrelerin ideal değerleri değişir ve MRAC belirli bir uyarlama hızı ile tekrar yeni koşullara ulaşmaya çalışır. Bu tez çalışmasında model referans uyarlamalı denetleyicilerin performansının endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesi, kazanç değişimi ve dış bozucu etkisi gibi durumlarda hızlı yakınsama için önerilen bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC yaklaşımının performans analizi incelenmektedir.

Literatürde çok farklı yaklaşımlarda MRAC tasarımları bulunmaktadır. Abougarair ve Shashoa (2021), kimyasal karıştırma tankı sıcaklık denetiminde iki uyarlama parametrelili MRAC ve PID denetleyici kıyaslaması yapmıştır. Çalışmada dış bozucuda dalgalanma olduğunda MRAC'ın PID'ye kıyasla daha az kalıcı durum hatası oluşturduğu tespit edilmiştir. Ponomarev (2020), laboratuvar ortamındaki sıcaklık denetiminde bir uyarlama parametrelili MRAC ve bulanık PID denetleyici kıyaslaması yapmıştır. Yapılan çalışmalarda bulanık PID, MRAC'a oranla daha az en yüksek aşım miktarı oluşturmuştur. Buna karşın MRAC, daha az yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri ile denetim sağlamıştır. Altan ve arkadaşları (2018), bir uyarlama parametresine sahip MRAC ile insansız hava aracı yük taşıma sistemi denetimini yapmıştır. Thusoo (2019), quadrotor irtifa denetimini bir uyarlama parametrelili MRAC ve PID ile yaparak denetleyici performanslarını kıyaslamıştır. İrtifa denetimi yerleşme zamanının MRAC ile PID'ye kıyasla 2 saniye daha hızlı olduğunu tespit etmiştir. Tomaselli (2019), common-rail dizel motor basınç denetiminde iki uyarlama parametrelili MRAC kullanmıştır. Yapılan denetim çalışmalarının sonuçları, aynı denetim probleminin çözümünde PID denetleyici kullanıldığında

elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. MRAC'ın basınç denetiminde PID'ye göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak çalışmada, MRAC'ın uygulama kolaylığı ve sistem parametrelerindeki değişimlere göre uyarlamalı oluşunun PID'ye göre üstün tarafları olduğu vurgulanmıştır.

Bu tez çalışmasında yüksek fırın gaz temizleme sistemi yıkayıcı tankı seviye denetimi, PID ve geleneksel MRAC ile yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda MRAC uyarlama hızında yapılacak değişikliklerle denetim performansının iyileşeceği öngörülmüştür. Bunun üzerine aynı denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC uygulaması yapılmıştır. MRAC, içerdiği uyarlama mekanizması ile değişken koşullara uyum sağlayabilmektedir. Buna ek olarak uyarlanan parametrelerinin uyarlama hızının da güncellenebilir olması MRAC'ın performansını artıracığı öngörülmektedir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC uygulamasının yapılacağı demir üretim süreçleri hakkında bilgi verilmiştir. Demir üretim süreçlerindeki denetim problemleri, bu problemlerin çözümünde kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bölüm 3'te, geleneksel MRAC algoritmaları ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tanımlamaları yapılmıştır. Bu denetim yöntemleri, az sönümlü, kritik sönümlü ve aşırı sönümlü sistemlerin denetiminde değerlendirilerek performans analizi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, PID denetleyici sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Çalışmanın 4. bölümünde servo valf temelli deney düzeneğindeki denetim probleminde geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC uygulaması yapılmıştır. Denetim sonuçları, PID denetleyici ile yapılan denetlemeden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 5'te, yüksek fırın gaz temizleme sistemi yıkayıcı tankı seviye denetim sistemi hakkında bilgi verilmiştir. Bu sistemdeki seviye denetim probleminde, geleneksel MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve PID denetleyici uygulamaları yapılmıştır. Denetim sonucunda elde edilen veriler incelenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmanın 6. bölümünde de yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİ

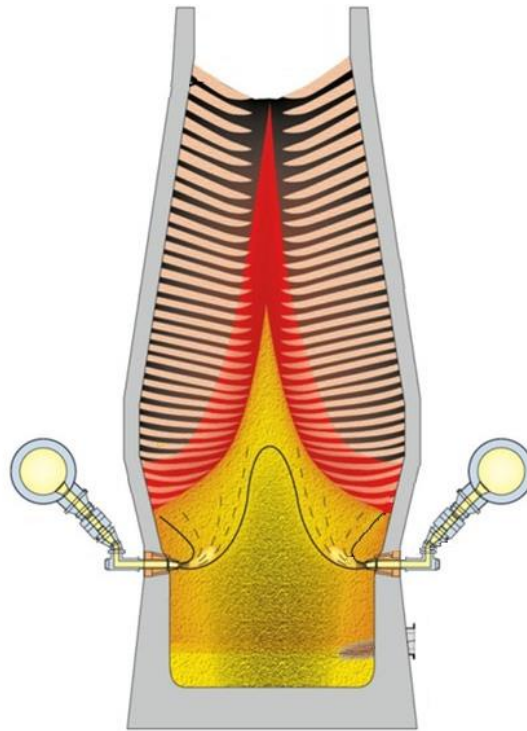
Bu bölümde demir üretim süreçleri ile birlikte kullanılan denetim yaklaşımları değerlendirilmektedir. Ek olarak tez çalışmasında önemli yer tutan yüksek fırın sürecinin çalışması hakkında bilgi verilmektedir. Bu çerçevede denetlenen değişkenler ve tasarım istekleri değerlendirilecektir.

2.1 DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ

Demir çelik sektörü ülke ekonomisi ve sanayileşmesinde lokomotif olma özelliğine sahiptir (Toktarova vd. 2022). Demir çelik ürünleri, dayanıklı tüketim malları ve yatırım malları sanayinin ana girdisidir. Bu nedenle bir ülkenin demir çelik ürün tüketim düzeyi o ülkedeki refahın ve gelişmişliğin en önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilir (Taghipour vd. 2022). Ekonomileri güçlü olan ülkelerde ve gelişmekte olan ülkelerde demir çelik üretimi sürekli artmakta ve tüketim hızını karşılayabilecek üretim kapasiteleri oluşmaktadır.

2022 yılı dünya ham çelik üretimi, 1,831.5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Üretilen çeliğin %73.2'si bünyesinde yüksek fırınlar bulunduran entegre tesislerde, %26.3'ü ise elektrik ark ocaklı tesislerde üretilmiştir. Türkiye, 2022 yılında 35.1 milyon ton ham çelik üretimi ile Avrupa'nın 2. dünyanın da 8. büyük ham çelik üreticisi olmuştur. Türkiye'de üretilen ham çeliğin yüzde 24'ü entegre demir-çelik tesislerinde, yüzde 76'sı da yarı entegre tesislerde üretilmektedir. Dünyada demir üretimi tarihinin, arkeolojik kazılar neticesinde bulunan mızrak, ok, zırh gibi eşyaların yaşlarına bakılarak M.Ö.3000 yıllarına kadar dayandığı tahmin edilmektedir. Türklerin Ergenekon Destanı, Almanların Wielandsage Destanı gibi pek çok bölgede destanlarla anlatılmaktadır (Yaman, 2022). İlk zamanlarda demir üretimi için yüksek kalorili kömür ve demir cevheri karıştırılır ve bu karışımın etrafı çamur ile sıvanırdı. Cevher ve kömür karışımı bulunan hücreye insan, rüzgar veya su gücü ile tahrik alan körük yardımıyla basınçlı hava tatbik edilirdi. İlerleyen çağlarda insanların demir ihtiyacının artması, demirin daha büyük miktarda ve daha verimli üretilmesine yol açmıştır (Park ve Voyakin, 2021).

Günümüzde yüksek fırınlar, demir cevheri ve kok kömürünün yüksek basınçlı ve önceden ısıtılmış sıcak hava ile reaksiyona girdiği reaktörlerdir. Şekil 2.1’de bir örneği gösterilen modern yüksek fırınlar, kok fabrikaları, sinter ve pelet hazırlama tesisleri ile birlikte demir üretim süreçlerinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Demir üretim süreçlerinin başlangıcı sayılan kok bataryalarında koklaşabilir kömür, havayla temas ettirilmeden 1200°C civarındaki sıcaklıkta bekletilir. Bu sırada kömür içerisindeki uçucu maddeler gaz haline geçerek kömürü terk eder. 18-20 saat pişirilen kömür %90’dan fazla karbon oranına sahip olmaktadır. Düşük kül oranı, gözenekli yapısı, taşıyıcı olma özelliği ve yüksek kalorisi ile kok kömürü yüksek fırınlarda yakıt olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 Modern yüksek fırın (Geerdes vd., 2020).

Kok Bataryalarından atık gaz olarak çıkan ham kok gazı, tali mahsuller tesislerinde temizlenerek, hem kok bataryalarını hem de yüksek fırın sobalarını ısıtmak için kullanılmaktadır.

Düşük demir oranına sahip cevher, atık demir tozları ve kok kömürü ile karıştırılarak ateşe verilir. Karışımın yüksek sıcaklık ile birbirine kaynaması neticesinde yüksek demir içeriği ve düşük toz oranı bulunan sinter ve pelet malzemeleri, Sinter ve Pelet fabrikalarında üretilir. Sinter ve pelet, yüksek fırınların demirli malzeme kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Yüksek fırınlar, sıvı ham demirin üretildiği kimyasal reaktörlerdir (Winfield vd. 2013). Yüksek fırının öncelikli amacı, yüksek kaliteli sıvı ham demirin, düşük maliyetlerle üretilmesini sağlamaktır (Winfield vd. 2013). Buna ek olarak, yüksek fırınlarda, sürekli ve sorunsuz üretimin getireceği enerji maliyeti ve verimlilik hedeflenmektedir (Li vd. 2021). Demirli malzemeler ve kok kömürü yüksek fırın içerisine, fırının tepesinden boşaltılır. Katı hammaddeler, fırın içerisinde katmanlar halinde bulunmaktadır. Kok kömürü, demirli malzemeler ve yardımcı malzemelerin her birinin ayrı bir katmanda bulunması, fırın içerisindeki reaksiyonların sağlıklı gerçekleşmesi için gerekli bir koşuldur (Geerdes vd. 2020).

Fırının tabanında bulunan tüyer isimli deliklerden fırın içerisine, sobalarda 1200°C'ye kadar ısıtılmış olan basınçlı sıcak hava uygulanır. Sıcak hava, yüksek fırın tabanından tepesine doğru hareket ederken, kok kömürü, demirli malzeme ve indirgemeye yardımcı malzemeler ile her katmanda farklı reaksiyonlara girer. Bu reaksiyonlar sonucunda fırın tabanında 1450°C civarında sıvı demir ve sıvı cüruf oluşurken fırın tepesinde de fabrikada yakıt kaynağı olarak kullanılabilecek yüksek fırın gazı oluşmaktadır (Geerdes vd. 2020).

Karşılıklı girdi akışına sahip dikey reaktör olan yüksek fırının içerisine alt taraftan sıcak hava, üst taraftan da demir indirgeme reaksiyonlarında kullanılacak olan hammaddeler uygulanır. Tabandan uygulanan sıcak hava, fırın içerisinde yukarı, fırının tepesine doğru hareket eder. Fırın içerisindeki hareketi sırasında, fırının farklı bölmelerinde uğradığı kimyasal reaksiyonlar neticesinde, yüksek fırın gazı olarak isimlendirilen gaza dönüşür (Aslan, 2009). Kimyasal içeriği, CO, CO₂, H₂ ve N₂ gazlarından oluşan yüksek fırın gazı, fırın içerisindeki kok kömürü, demir içerikli katı malzeme ve indirgeyici malzemelerin tozlarını da bünyesinde taşımaktadır (Zheng vd. 2021). Yüksek fırın gazı, kimyasal içeriği sebebiyle yanıcı bir üründür. Bu gaz entegre demir-çelik tesislerinde, yüksek fırına sıcak hava sağlayan sobaların ve kok batarya fırınlarının ısıtılmasında kullanılır ve tesisin karbon ayak izinin düşürülmesinde rol oynar (Wiklund vd. 2016).

Yüksek fırın gazı, fırından çıktığı toz içerikli haliyle yüksek fırın sobasında yakıt olarak kullanılamaz. Gaz bünyesindeki toz, soba tuğlalarının aşınmasına ve ateşlemenin yapıldığı brülör veriminin düşmesine sebep olur (Winfield vd. 2013). Yüksek fırın gazının tozsuzlaştırılması, yüksek fırın gazı hattında bulunan ve gaz temizleme sistemi olarak isimlendirilen bir dizi ünite sayesinde yapılmaktadır. Bu üniteler, yüksek fırın gazı içerisindeki büyük tozları filtreleyen toz tutucu ve gazın yıkanarak yakıt olarak kullanılacak forma

kavuşmasını sağlayan yıkayıcı sistemidir. Yüksek fırın tepesinden çıkan gaz, toz tutucu sistemi bünyesindeki siklona girer. Siklonda yerçekimi etkisi ile gaz içerisindeki görece büyük ebatlı tozlar ayrıştırılır.

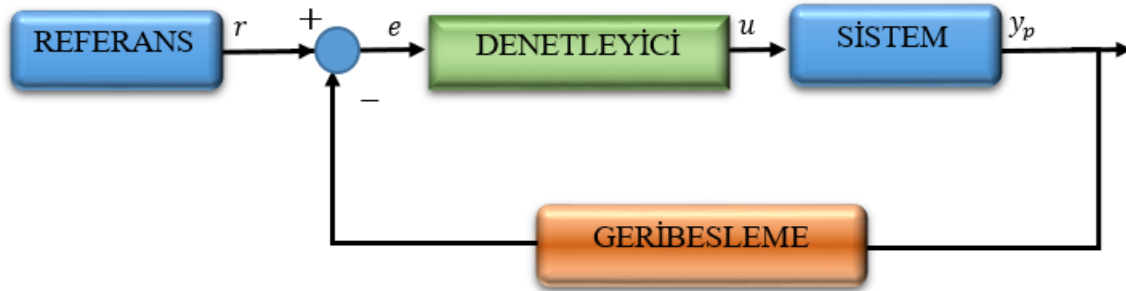
Siklondan çıkan gaz, yıkayıcı sistemine girer. Yıkayıcının giriş kısmında su sprey nozulları bulunur. Bu nozullar yüksek fırın gazına su püskürterek gaz içerisindeki tozları ayrıştırır. Yıkayıcı çıkış kısmında bulunan kurutucu bölümde yüksek fırın gazının nemi alınır. Bu aşamadan sonra yüksek fırın gazı, tepe gazı geri dönüşüm sisteminde basınç kaynağı ve demir üretim süreçlerinde ısı kaynağı ihtiyacı olan bölümlerde kullanılmaya uygundur (Li vd. 2022).

Yüksek fırındaki reaksiyonların gerçekleşmesi için, fırın içerisindeki alt ve üst basınçların dengeli olması gerekmektedir. Bu yüzden fırın tepe basıncının, o anki fırın çalışma şartlarına göre sabit bir değerde tutulması gerekir. Yüksek fırın tepe basıncı denetimi, gaz temizleme sistemi bünyesindeki yıkayıcı sisteminde yapılmaktadır. Yüksek fırın gazı hattı atmosfere kapalı olduğundan, yıkayıcı girişindeki yüksek fırın gazı basıncı, yüksek fırın tepesindeki gaz basıncına eşittir (Aslan vd. 2017). Yıkayıcı içerisindeki konik eleman olarak isimlendirilen ve açıklık oranına göre gazın geçmesine müsaade eden yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar bir valf gibi düşünülebilir. Konik elemanlar gazın yolunu tamamen kapatırsa gaz hattında iletim olmaz ve yıkayıcı giriş tarafındaki gaz hattı gazla basınçlanmaya başlar. Bu durum yüksek fırın tepesindeki gaz basıncının da artmasına neden olur. Benzer biçimde de konik elemanlar gazın geçişine tamamen izin verirse bu sefer de yıkayıcı giriş tarafındaki gaz hattında ve yüksek fırın tepesinde basınç düşer. Bu özelliği ile konik elemanlar, yüksek fırın tepe basıncının ayarlanması amacıyla kullanılmaktadır (Aslan, 2009).

2.2 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE DENETLENEN DEĞİŞKENLER

Demir üretim tesislerdeki süreçler, otomasyon sistemleri ile denetlenmektedir (Aslan vd. 2022). Otomasyon sistemleri, farklı türlerdeki değişkenlerin denetimini sağlamaktadır. Demir üretim süreçlerinde genellikle Şekil 2.2'deki gibi, bir giriş bir çıkışlı kapalı çevrim sistemlerin denetimi yapılmaktadır. Burada sistem çıkışının istenen değeri, denetim algoritmasına referans giriş işareti olarak uygulanır. Sahada bulunan sensör yardımıyla ölçülen sistem çıkışı, otomasyon sistemindeki denetim algoritmasına girer. Sistemin giriş işareti ve ölçülen geribesleme işareti, bir tankın sıcaklığı, bir akışkanın akış hızı gibi herhangi bir büyüklük olabilir. Geribesleme işareti ve referans giriş işareti arasındaki fark, hata işareti olarak denetim

algoritması içerisinde hesaplanır. Denetleyici, sistem çıkışı ile referans giriş arasındaki farkı sıfıra yakınsatacak bir denetim işareti üretir. Denetim işareti, sahadaki tahrik tahrik elemanına iletilir ve tahrik elemanı vasıtasıyla, sisteme uygulanır. Döngüsel olarak çalışan otomasyon sistemi işlemcisi, sistemin çıkış işaretini tekrar okur ve yeni bir denetim işareti üretir. Böylece kapalı çevrim denetim sistemi sürekli olarak denetlenmeye çalışılır (Możaryn vd. 2021). Çalışması yukarıdaki gibi özetlenen ve Şekil 2.2’de blok diyagram olarak ifade edilen kapalı çevrim denetim sistemi, demir üretim süreçlerinin her aşamasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 Kapalı çevrim denetim sistemi.

Çizelge 2.1 demir üretim süreçlerinin farklı aşamalarında kullanılan kapalı çevrim denetim sistemi örneklerini içermektedir. Çizelgenin ilk sütunu, denetim sisteminin kullanıldığı sürecin adını, ikinci sütunu denetlenen değişken adını, üçüncü sütun, tahrik elemanı tipini ve dördüncü sütun da geribesleme sensörü tipi bilgilerini içermektedir.

Çizelge 2.1’deki sistemler, kapalı çevrim denetleyiciler ile denetlenmektedir. Çizelgenin ilk satırındaki problemde otomasyon sistemi uygulama yazılımında bulunan denetleyicinin girişine, sahadaki basınç sensörünün ürettiği basınç bilgisi uygulanır. Sürecin o anki durumuna göre gerekli kok gazı basıncı değeri, referans değeri olarak denetleyici girişine uygulanır. Denetleyici çıkışı da sahada bulunan elektro hidrolik valfin ne kadar açılacağını belirten denetim işareti olarak valfe gönderilir.

Çizelge 2.1 Demir üretim süreçlerindeki kapalı çevrim denetim sistemleri.

Tesis	Değişken	Tahrik elemanı Tipi	Sensör Tipi
Kok Fabrikası	Kok gazı basıncı	Elektrohidrolik tahrik elemanı	Basınç sensörü
Tali Mahsüller	Amonyaklı su seviyesi	Pnömatik valf	Seviye sensörü
Sinter Fabrikası	Sinter fırın sıcaklığı	Pnömatik valf	Sıcaklık sensörü
Yüksek Fırın	Fırın tepe basıncı	Elektrohidrolik tahrik elemanı	Basınç sensörü
Kömür Enjeksiyon Tesisi	Dairesel sınıflandırıcı hızı	Motor sürücü	Hız Sensörü

Çizelge 2.1'in dördüncü satırında yüksek fırın gazı basıncı denetimi tanımlanmıştır. Çalışan bir yüksek fırının iç hacmi basitçe 4 ayrı bölüme ayrılabilir. Bu bölümlerde aşağıdan yukarıya sırasıyla sıvı haldeki demir madeni ve cüruf, fırın içerisine uygulanan sıcak hava, fırın içerisine boşaltılmış olan katı hammaddeler ve yüksek fırın gazı bulunmaktadır. Fırına alt taraftaki tüyerlerden uygulanan sıcak hava, fırın içerisindeki katı malzemelere sıcaklığını aktararak ergimenin oluşmasını sağlar. Sıcak hava fırın içerisinde yukarıya doğru hareket ettikçe katı malzemeler ile kimyasal reaksiyona da girer. Böylece demirin indirgenmesi sürecini sağlar. Reaksiyonların ardından oluşan gaz, yüksek fırın gazı olarak isimlendirilir. Bu gazın sürekli ve düzgün bir rejimle fırının üst kısımlarına ulaşması, yüksek fırın üretim süreci için önemlidir. Bu rejimin bozulması, fırın içerisindeki katı hammaddenin alt tarafı ve üst tarafındaki gaz basıncı dengesinin bozulmasına sebep olur. Bu basınç dalgalanmaları, fırın içerisindeki katı malzemenin istemsiz şekilde hareket ederek çalkalanmasına sebep olabilir. Bununla birlikte fırının üst kısmındaki basıncın, fırın tasarım değerlerinin üzerine çıkması da donanım sağlığı açısından risk oluşturur. Bu sebeple, bir yüksek fırının tepesinde oluşan yüksek fırın gazı basınç denetimi, üretim süreci için hayati öneme sahiptir. Yüksek fırın tepe gazı basınç denetim probleminde, tahrik elemanı elektrohidrolik bir piston, denetlenen değişken ise gaz basıncıdır (Aslan, 2009).

Çizelge 2.1'deki diğer problemler de kok gazı basıncı örneğinde olduğu gibi, sahadan alınan bir ölçüm ve ölçülen değerin değişmesini sağlayacak biçimde konumlandırılmış bir tahrik elemanı ile denetlenmektedir. Demir üretim süreçlerinde kullanılan otomasyon sistemlerinin

binlerce giriş ve çıkış işaretine sahip olması, **Çizelge 2.1**'deki örneklerin çoğaltılabileceğini göstermektedir.

2.3 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KULLANILAN DENETLEYİCİLER

Bölüm 2.2'de verilen kapalı çevrim denetim sistemleri, otomasyon sistemlerinin önemli bir parçasını oluşturan denetleyiciler tarafından denetlenmektedir. Otomasyon sistemlerinin fonksiyon kütüphaneleri, çeşitli denetleyici algoritmalarına sahiptir. Bu denetleyicilerden en sık kullanılanları aç-kapa denetim yapma imkanı sunan mantıksal kapılar ve oransal denetime imkan tanıyan PID denetleyicilerdir (Bolton 2021, Kılıç 2022).

Bununla birlikte son yıllarda endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaşanan gelişmeler ve donanımların artan işlem kapasiteleri sayesinde model öngörülü denetleyicilerin endüstriyel tesislerde kullanımı artmıştır (Aslan 2009, Cavone vd. 2022). Bu yöntemde denetleyici, sistemin matematik modelini kullanarak sistemin gelecekteki durumunu öngörür bulunur (Altan ve Hacıoğlu 2014). Bu sebeple MPC yönteminin düzgün çalışması için, denetlenen sistemin matematiksel ifadesinin bilinmesini gerektirmektedir (Altan ve Hacıoğlu 2020). Endüstriyel tesisteki denetim problemi için matematiksel model oluşturulması oldukça zordur (Altan vd. 2017). Bu durum, araştırmacıları sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymayan denetim yöntemleri hakkında araştırma yapmaya yöneltmektedir (Westenbroek vd. 2020). Geleneksel PID denetleyiciler, uygulama kolaylığı sebebiyle, endüstriyel tesislerdeki denetim problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır (Alqadasi vd. 2019). Kimyasal bir tesisteki buhar kazanının seviye denetimi, yüksek fırın tepe basınç denetimi, PID denetleyici tarafından yapılmaktadır (Aslan 2009, Tavoosi vd. 2021). MPC'nin endüstriyel tesislerde kendisine uygulama alanı buluyor olmasına rağmen, bu denetim yönteminin sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyması beraberinde uygulama zorluğu da getirmektedir. Bu sebeple aç-kapa ve PID denetleyiciler uygulama kolaylığı ile endüstriyel tesislerde en sık kullanılan denetim yöntemleridir.

Demir üretim süreçlerinde kendine sıkça yer bulan hidrolik sistemlerde, yağ sıcaklığının belirli bir değer aralığında olması gerekir. Yağ fazla soğuk olursa akışkanlığı azalır ve yağ ile tahrik edilen piston hareket ettirilemez. Yağ fazla sıcak olursa viskozitesi düşer, yağın yapısı incelir ve hidrolik tesisatta kaçaklar meydana gelir. Her iki durumda da hidrolik yağ ile tahrik edilen donanımın verimi düşer. Sıcaklık nominal değerden negatif veya pozitif yönde daha fazla

uzaklaşırsa, donanımın hidrolik yağ ile tahrik edilmesi olanaksız hale gelir (Gupta vd. 2021). Yağ sıcaklığını denetleyen denetleyici, yağ sıcaklığı değerini ve referans değerini giriş olarak alır. Bu sistemin tahrik elemanı, yağı ısıtmak için kullanılan rezistansdır. Yağ sıcaklığı, istenilen sıcaklık aralığının minimum değerinden düşük ise rezistans çalışır ve yağ ısınmaya başlar. Yağ sıcaklığı minimum değerini belirli bir ölü zaman miktarı aştığında rezistansın enerjisi kesilir ve yağı ısıtma süreci sonlanır. Otomasyon sistemi, yağ sıcaklığı denetimi ile ilgili bu işlemleri yapmak için bir kıyaslama algoritması kullanır. Burada kıyaslama algoritması, aç-kapa denetleyici olarak görev yapmaktadır.

Bazı denetim problemlerinde, sisteme değişken oranlarda etki etmesi gerekir. Denetim işaretinin sisteme değişken oranlarda etki etmesi gereken durumlarda, otomasyon sistemlerindeki oransal denetim algoritmaları kullanılır. Wei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Sinter Fabrikası bünyesindeki sinterleme fırınına gönderilen hammaddelerin nem oranının denetimi incelenmiştir. Bu uygulamada, sinterleme için uygun olan hammadde nemini elde etmek için karıştırma tamburuna su ilavesi yapılmaktadır. Hammaddelerin yüzeysel rutubeti ölçülerek denetim sistemine geribesleme işareti sağlanmaktadır. Geribesleme işareti ve denetim isterlerinin kıyaslanması ardından, otomasyon sistemindeki denetleyici uygun denetim işaretini üretmektedir. Bu örnekte denetim işareti oransal denetim valfine girerek, valfin gerekli olan su miktarını tamburdaki hammaddeye göndermesi sağlanır (Wei vd. 2022). Endüstriyel otomasyon sistemlerindeki oransal denetim problemi çözümlerinin %80'inde kullanılan PID denetleyiciler, demir üretim süreçlerinde de benzer sıklıkta kullanılmaktadır (Ranjani ve Murugesan 2015).

Çizelge 2.1'deki denetim problemlerinde aç-kapa denetleyiciler de PID denetleyiciler de kullanılabilir. Her iki yöntemde de denetim sistemi donanımında geribesleme işareti üreten sensör ve denetim işaretini sürece uygulayan donanım bulunmaktadır. İki denetim yöntemi arasındaki tercih, süreç çıkış işaretinin hangi hassasiyet değeri ile denetlemek istendiğine göre değişir.

Endüstriyel tesislerde PID denetleyici, analog veya dijital lokal denetim donanımları, PLC, DCS ve bilgisayarlar ile gerçekleştirilmektedir. PLC ve DCS sistemlerinde Eşitlik (2.1)'e göre bir fonksiyon oluşturmak ve PID denetleyici yapmak mümkün olduğu gibi, bu sistemlerin fonksiyon kütüphanelerinde bulunan PID algoritmaları da kullanılmaktadır (Haidekker 2020, Zhu 2022). Matematiksel ifadesi Eşitlik (2.1)'deki gibi gösterilen PID denetleyicinin K_p , K_i ,

K_d parametreleri, PID denetleyici ile denetlenen ve kapalı çevrim transfer fonksiyonu bilinen bir sistemde, PID parametreleri kök yer eğrileri yardımıyla belirlenebilir (Ali vd. 2023) ki burada denetlenen sistem girişi denetleyici girişindeki hata ile birlikte

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

tanımlanmaktadır.

Endüstriyel süreçlerin çoğunda, sistemin matematiksel modeli kesin olarak bilinmemektedir. Denetim sistemi tasarımcıları, sistemin basamak girişlere verdiği tepkileri inceleyerek sadece sistemin derecesi, gecikmeleri ve bozucuları hakkında bilgi sahibi olurlar. Tasarımcı bu bilgiler ışığında PID denetleyicilerin katsayılarını yaklaşık olarak tespit edebilir. Ziegler-Nichols ve Cohen Coon gibi yöntemler, endüstriyel tesislerde bulunan ve matematiksel ifadesi kesin olarak bilinmeyen sistemlerin PID parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Ziegler ve Nighols 1942, Das vd. 2023).

Çizelge 2.1'de örneklendirilen sistemler gibi demir üretim süreçlerinde denetlenen sistemlerin de matematiksel modeli kesin olarak bilinmemektedir. Bu sistemleri denetlemek için tasarlanan PID denetleyicilerin parametreleri, sistem üzerinde yapılan denemelerden elde edilen verilere göre yapılmaktadır. Bu işlem aslında Ziegler-Nichols yönteminde olduğu gibi sisteme birim basamak tipinde giriş işareti uygulanmasının ardından sistemin verdiği tepkilerin takip edilmesine dayalıdır (Muresan ve De Kesyer 2022). Bu deneme sonucunda sistemin kazancı, gecikmesi ve ölü zamanı gibi bilgiler edinilir. Tasarımcı da Ziegler-Nichols ve benzeri yöntemlerde olduğu gibi veya kendi deneyimlerine dayanarak PID parametrelerini belirler (Aldemir and Anwer, 2020). Bu işlem sonrasında PID denetleyicinin sistemi denetlemesi sağlanır ve gerekli görülürse parametrelerde küçük değişiklikler yaparak denetleyicinin hassas tasarımını gerçekleştirirler.

Gelişen teknoloji ile otomasyon sistemlerinde kullanılan işlemcilerin birim zamanda yaptığı işlem sayıları artmıştır. Hızlı işlemciler karmaşık işlemleri yapabilecek hale gelmiştir ve işlemcilerin fonksiyonlarına ileri denetim kütüphaneleri eklenmiştir (Balke vd. 2022). İleri denetim kütüphaneleri içerisinde, geleneksel PID denetleyicilerden daha farklı kabiliyetlere sahip, MPC ve bulanık mantık denetleyici gibi algoritmalar bulunmaktadır.

2.4 DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Demir üretim süreçleri, hiç durmadan çalışmak üzere tasarlanmış sistemlerdir (Inayat 2023). Bu tesisler sadece arıza ve periyodik bakım ihtiyaçları için kısmi olarak kısa süreli durdurulurlar (Zhu vd. 2022). Sürekli olarak farklı koşullarda çalışması, demir üretim tesisleri otomasyon sistemlerindeki denetleyiciler için zorlayıcı olmaktadır. Sürekli çalışan tesisler, toz, nem, titreşim, aşındırıcılar gibi olumsuz şartlara maruz kalırlar. Olumsuz ortam şartları, tesislerdeki donanımların yıpranmasına sebep olur (Gusev vd. 2021). Yıpranarak eskiyen donanımların dinamik davranışları değişir (Aslan vd. 2022). Yüksek fırına pulverize kömür taşıyan bir boru hattı özellikleri, o hattaki kömür akışını etkiler. Bu sistemin bir matematik modeli oluşturulursa, boru hattı tasarım parametreleri de bu modele etki eder. Sistem çalışması sırasında boru hattı üzerindeki dirsek kısımları, zaman içerisinde kömür taneciklerinin çarpması sebebiyle aşınır. Bu sebeple boru hattı, sistemin matematiksel modeline eskisinden daha farklı bir şekilde etki eder ve sistemin tepkisi önceki durumlara göre değişmektedir. Bu durumdaki sistemin matematiksel modelinin yeniden oluşturulması gerekmektedir (Aslan 2009).

Ortam koşulları da tesislerdeki sistemlerin veya bütün tesisin farklı dinamik tepkiler vermesine sebep olabilir. Yaz aylarında devreye alınan bir tesisin otomasyon sistemindeki denetleyiciler, sistemin sıcak hava koşullarındaki dinamik cevabına göre tasarlanmaktadır. Ortam sıcaklığının ve nemin değişmesi, sistemlerin tepkilerini değiştirmektedir. Aslında burada değişen, sistemin matematiksel modelidir.

Benzer şekilde tesislerde kullanılan hammadde özellikleri de sürekli değişim göstermektedir. Bir hammadde besleme sisteminin devreye alınması sırasında yüzeysel nemi az olan demir cevheri kullanıldığında, silo kapağı açılarak cevherin konveyöre boşalması takip edilir. Silodaki belirli miktardaki cevherin konveyöre ne kadar sürede boşaldığı tespit edilir. Bu tespite göre yüksek fırına gönderilecek olan hammaddelerin trafiğini ayarlamak için gerekli ön bilgi edinilir. Nemin az olması durumunda cevherin silo kapaklarından konveyöre kolayca akacağı beklenmektedir. Başka bir zamanda aynı tesiste siloda bulunan cevher, yağmur, kar gibi etmenlerden dolayı nemlendiğinde, cevherin dış yüzeyinde çamurlaşma meydana gelir. Bu çamurumsu yapı cevher parçalarının birbirine yapışmasına sebep olur ve silodan konveyöre birim zamanda giden cevher miktarı azalır. Bu durumda, yüksek fırın hammadde besleme sistemindeki malzeme hızlarının yeniden ayarlanması yani sistemin matematiksel modelinin yeniden belirlenmesi gerekir.

Demir üretim süreçlerinde ölçülebilen veya ölçülemeyen dış bozucular bulunmaktadır. Kok gazı, demir çelik tesislerinde yakıt olarak kullanılan bir yan üründür (Rosado vd. 2020). Kok gazı tüketimi, tesislerin çalışma koşullarına göre zamanla artıp azalabilmektedir. Sinter fabrikasında bulunan sinterleme fırını sıcaklığı, kok gazı ile sağlanmaktadır (Niel vd. 2022). Fırına giren kok gazı miktarı, PID'den denetim işareti alan oransal valf ile denetlenmektedir. Kok gazı hattındaki gaz basıncı, demir çelik tesisi genelindeki tüketim miktarına göre artıp azalmaktadır. Basıncıdaki değişim nedeniyle, valf açıklığı sabit olsa dahi, fırına giren gaz miktarının değişmesine sebep olmaktadır. Bu durum, sinter fırını sıcaklığını denetleyen denetleyicinin parametrelerinin sadece tasarım yapılan zaman için geçerli olduğunu göstermektedir. Farklı zamanlarda farklı kok gazı hattı basıncı olması, yani bozucunun değişken olması, sıcaklık olarak ölçülen sistem çıkışının karakterinin de sürekli olarak değişeceğini göstermektedir.

Tasarımcılar tarafından sürece dahil edilen PID denetleyiciler, sorumluluk bölgesindeki süreç geribesleme işareti ile arzu edilen referans çıkış değeri arasındaki farkı sürekli minimize etmeye çalışırlar. Bu denetleyiciler, parametreleri belirlendiği anda istenilen başarı düzeyinde denetim sağlayabilirler. Ancak süreçteki dış bozucuların değişimine uyarlanamayan PID denetleyiciler, farklı zamanlarda farklı performanslara sahip olabilirler. Örneğin bir kurutma fırınının sıcaklık denetimini yapan PID denetleyici sıcak yaz aylarında tasarlandıysa, bu denetleyicinin performansı havaların soğuduğu kış aylarında düşmektedir. Benzer şekilde sinter fabrikasında malzeme hazırlama bölümündeki bir konveyörlü besleyicinin hız denetimini yapan PID denetleyici sistemin temiz olduğu bir anda tasarlanmış olabilir. Tesisin yüksek toz ve nem oranına sahip olması sebebiyle malzeme besleme oluğunda birikip sertleşen malzemeler, oluğun malzeme taşıma kapasitesini düşürür ve temiz duruma göre tasarlanmış olan PID denetleyici performansı düşer (Mallick vd. 2021).

Demir üretim süreçleri, entegre demir çelik fabrikalarında tüketilen enerjinin yaklaşık %70'inin tüketildiği tesislerdir (Lv vd. 2019). Bu tesislerdeki denetim performansının düşüşü, enerji verimliliğine direkt olarak etki edecektir. Bu yüzden demir üretim tesislerindeki denetleyicilerin performansının sürekli olarak en iyi düzeyde tutulması beklenir.

Bu bölümde, demir üretim süreçlerinde kullanılan denetim yöntemleri ve bu yöntemlerin kullanılması esnasında karşılaşılan zorluklar ile ilgili bilgiler verildi. Bu sorunlar ile karşılaşıldığında ve denetim performansı düştüğünde, denetleyici parametrelerinin belirlenme

prosedürü, denetleyici yeni koşullara uygun hale gelene kadar uygulanır. Denetleyicinin yeniden tasarlanması süreci bazı durumlarda tesis çalışırken, bazı durumlarda ise tesis duruyorken yapılabilir. Tesisin çalışması esnasında yapılan tasarımlarda, süreç normal dışı streslere maruz kalmaktadır. Bu durum süreç güvenliği veya ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Denetleyici tasarımı için üretim süreci durdurulduğunda hem üretimin kaybı olur hem de durdurulan üretimin tekrar başlatılması için fazladan enerji ve hammadde kayıpları yaşanır.

Kullanım ve parametre tespit kolaylığı bakımından PID denetleyiciler, demir üretim süreçleri gibi gerçek dünya problemleri üzerinde sıkça kullanılmaktadır. Buna karşın, sabit parametrelili olmasından dolayı, yukarıdaki gibi zamanla değişime uğrayan sistemler için performansı kısıtlıdır (Li vd. 2021). PID denetleyicinin zamanla değişime uğrayan sistemlerdeki performansını sürekli kılabilmek için bulanık mantık, yapay sinir ağları, model referans uyarlamalı denetleyiciler gibi yöntemlerle uyarlamalı hale getirildiği uygulamalar bulunmaktadır (Pravika ve Jakob 2021, Ranjani ve Murugesan 2015). Bu yöntemlere ek olarak, farklı koşullar için tasarlanan PID denetleyicilerin, sürecin durumuna göre aktif hale getirilmesi ile uyarlama sağlanabilmektedir (Aftab ve Luan 2022).

BÖLÜM 3

MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİLER

Bu bölümde, model referans uyarlamalı denetleyici tanımı yapılarak MIT ve Lyapunov kural tabanlı MRAC yaklaşımları tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında önerilen bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ile birlikte performans analizi yapılmaktadır. PID denetleyici ile kıyaslamalar gerçekleştirilmekte olup MRAC kullanımında dikkat edilmesi gereken durumlar ifade edilmektedir.

3.1 MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİ TANIMI

Model referans uyarlamalı denetleyiciler (MRAC), sistem parametrelerinin kesin olarak bilinmediği ve bilinmeyen parametrelerin zamana bağlı olarak değiştiği durumlarda kullanılan bir denetim yöntemidir (Ciba ve İskender 2018, Rajesh ve Deepa 2020). MRAC, bünyesindeki uyarlama algoritması ile denetimi en iyi yapacak olan denetim işaretini üretmeye çalışır (Aslan vd. 2022). MRAC uyarlaması için, denetlenen sistemin matematik modeline ihtiyaç yoktur (Manna vd. 2023, Duan 2022). Uyarlama, denetlenen sistem çıkışının referans model çıkışına yani o sistem için istenen çıkış işaretine yakınsaması için gerekli olan denetim işaretini üretmeye yönelik yapılır (Azevedo vd. 2021).

Uyarlamalı denetim, sistem parametrelerinin kesin olarak bilinemediği ve bu bilinmeyen parametrelerin değişkenlik gösterdiği durumlarda kullanılan denetim yöntemidir (Mukherjee vd. 2022). Modele dayalı çeşitli uyarlamalı denetim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler, sistem dinamiklerini makul biçimde ifade edebilen parametrik modellere ihtiyaç duyarlar. Yapılarındaki belirsizliklerden dolayı gerçek dünya problemlerinin matematiksel modellerinin oluşturulması oldukça zordur. Bu durum, sistem modeline ihtiyaç duymayan denetim yöntemleri ile ilgili araştırmalar yapılmasına sebep olmuştur (Westenbroek vd. 2020).

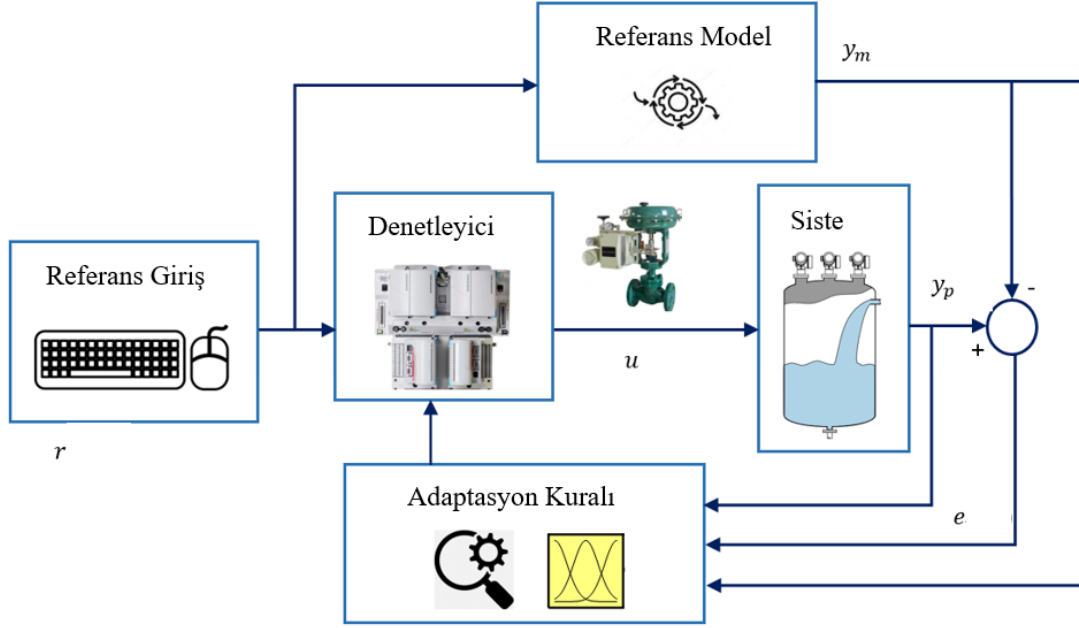
1950'lerin başlarında, yüksek performanslı uçakların otomatik pilot sistemi tasarım problemi, araştırmacıları uyarlamalı denetim alanında çalışmaya zorlamıştır. 1968 yılında H.P. Whitaker, yaptığı çalışmada Nasa X-15 araştırma uçağının otopilot sistemine model referans uyarlamalı

denetleyicileri uygulamıştır (Whitaker ve Rediess 1970). X-15 araştırma uçağı, 10 yıl boyunca 199 görev gerçekleştirmiştir (Griffin vd. 2022). Yıllar içerisinde MRAC, havacılık, robot kolları, endüstriyel süreç denetimi gibi gerçek dünyadaki uyarlama ihtiyacı olan denetim problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır (Shekhar ve Sharma 2018, Seghiri vd. 2023).

Model referans uyarlamalı denetleyiciler, klasik denetim yöntemleri gibi sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymazlar (Costa 2020). En genel anlamda MRAC, bir referans model ve bir uyarlama algoritması ve bir denetim kuralından oluşur (Cartocci vd. 2022). Şekil 3.1, matematiksel modeli bilinmeyen bir sistemi denetlemek için tasarlanmış olan MRAC yapısını göstermektedir. MRAC, denetlenen sistem çıkışı ile referans model çıkışını birbirine yakınsatarak, iki çıkış işareti arasındaki hatayı sifra yakınsatmaya çalışan bir denetim yöntemidir (Arabi vd. 2019, Candy 2021). MRAC yönteminde, referans model ile sistem çıkışı arasındaki hatayı sifra yakınsatmaya çalışan eleman Şekil 3.1’de uyarlama mekanizması olarak gösterilmektedir.

$$e(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (3.1)$$

Genel anlamda MRAC, referans giriş işareti, denetleyici, sistem, referans model ve uyarlama algoritması bileşenlerinden oluşur. Burada sistem, denetim problemine konu olan sistemin matematik modelini göstermektedir. MRAC uygulamalarında genellikle sistemin matematiksel ifadesi bilinmemektedir. Denetleyici bloğu, tasarımcı tarafından belirlenen denetim yöntemini belirtir. Referans model, tasarımcı tarafından belirlenen bir matematik modelidir. MRAC’ın son bileşeni olan uyarlama mekanizması da Eşitlik (3.1)’de verilen, sistem çıkışı y_p ve referans model çıkışı y_m arasındaki fark olan hatayı sıfır yapmaya çalışan bir matematiksel yöntemidir.



Şekil 3.1 MRAC, referans uyarlamalı denetleyici.

MRAC yönteminde referans model oluşturulurken, denetlenen sistemin davranışı incelenmelidir. Sistemin yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve en yüksek aşım değeri ile ilgili sınır değerleri tespit edilmelidir. Referans giriş işareti, referans modele uygulandığında, model çıkışında y_m çıkış işareti oluşmaktadır. Benzer şekilde referans giriş işareti denetleyiciye uygulanır ve sistem çıkışında y_p işareti oluşur. Uyarlama algoritması y_p ve y_m arasında oluşan hata işaretine göre çalışmaya başlar ve blok çıkışında bir uyarlama parametresi üretir. Bu parametre de denetleyici bloğuna giriş olarak uygulanır ve denetleyicinin ürettiği denetim işaretine müdahale eder. Programın her bir döngüsünde uyarlama parametresi tekrar hesaplanır ve y_p ile y_m arasındaki hata sıfıra eşitlenene kadar değeri değişmeye devam eder (Altan vd. 2018). MRAC yönteminde, hatayı sıfıra yakınsatacak uyarlamanın sürekli olarak yapılıyor olması, denetleyicinin sürekli olarak yeni katsayılarla sahip olmasını sağlar. Denetleyici, yeni koşullara uyarlanır. Sistemin matematik modelindeki değişim veya dış bozucu etkisinin y_p işareti üzerindeki olumsuz etkisini giderir (Shahgolian vd. 2016).

Örneğin, kok fabrikasında bulunan batarya şarj arabasının pozisyon denetim sisteminin, arabanın ağırlığı, ortam şartları, hareket motorlarının kondisyonu ve diğer bozucu etkilerden bağımsız olarak her koşulda aynı performansı göstermesi beklenir. Arabanın her koşuldaki hızlanma ve yavaşlama davranışı aynı olmalıdır. Bu davranışların nasıl olması gerektiği, kok bataryası şarj arabasının tasarımcıları ve kullanıcıları tarafından belirlenir. Arabanın pozisyon

denetimi MRAC ile yapılmak istendiğinde, araba için istenilen hızlanma ve yavaşlama eğrilerini ifade eden bir matematiksel model oluşturulur. Bu model, referans model olarak adlandırılır. MRAC'ta oluşturulan uyarlama algoritması, hız sensöründen aldığı sistem çıkış işareti ile referans model çıkış işareti arasındaki sifra yakınsatmaya çalışan denetim işaretini oluşturmaya çalışacaktır.

Referans model oluşturulmadan önce tasarımcı, sistemin fiziksel şartlarını inceler ve sistemden beklenen denetim cevabını tespit eder. Ardından bu cevaba uygun bir referans model oluşturur. Referans modele referans giriş işareti $r(t)$ uygulandığında, y_m referans model çıkış işareti oluşur. Denetim problemine konu olan sisteme denetim işareti $u(t)$ i uygulandığında, sistem çıkışında y_p çıkış işareti oluşmaktadır. Bu çalışmadaki MRAC tasarımlarında, literatürde sıkça karşılaşılan, Eşitlik (3.2)'deki denetim yöntemi kullanılmaktadır.

$$u(t) = \theta_1 r(t) - \theta_2 y_p(t) \quad (3.2)$$

Burada θ_1 ve θ_2 , MRAC uyarlama algoritması tarafından hesaplanan uyarlama parametreleridir. MRAC, θ parametrelerini eğiterek y_p ve y_m arasındaki hatayı minimize eden u denetim işaretini üretmeye çalışır. MRAC'ın θ uyarlaması için Eşitlik (3.3)'teki maliyet fonksiyonundan yararlanılır.

$$J(\theta) = \frac{e(\theta)^2}{2} \quad (3.3)$$

Maliyet fonksiyonunun değişken parametresi θ , MRAC uyarlama algoritmasının uyarlama parametresidir. Bu çalışmada kullanılan u denetim işareti θ_1 ve θ_2 'ye bağlıdır. Buna göre θ_1 ve θ_2 değerlerini, maliyet fonksiyonunun negatif gradyanı yönünde değiştirmenin hatayı minimize etmesi beklenir (Coman vd. 2018).

MRAC uygulamasında en kritik problem, sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki hatayı sifra yakınsatan, kararlı bir uyarlama mekanizmasının elde edilmesidir (Coman vd. 2018, Sun vd. 2022). Yapılan literatür araştırmalarında, uyarlama mekanizmasının oluşturulması için MIT kuralı ve Lyapunov kuralı olarak isimlendirilen iki yöntemin sıkça kullanıldığı görülmüştür.

3.2 MIT VE LYAPUNOV KURALI TABANLI MRAC

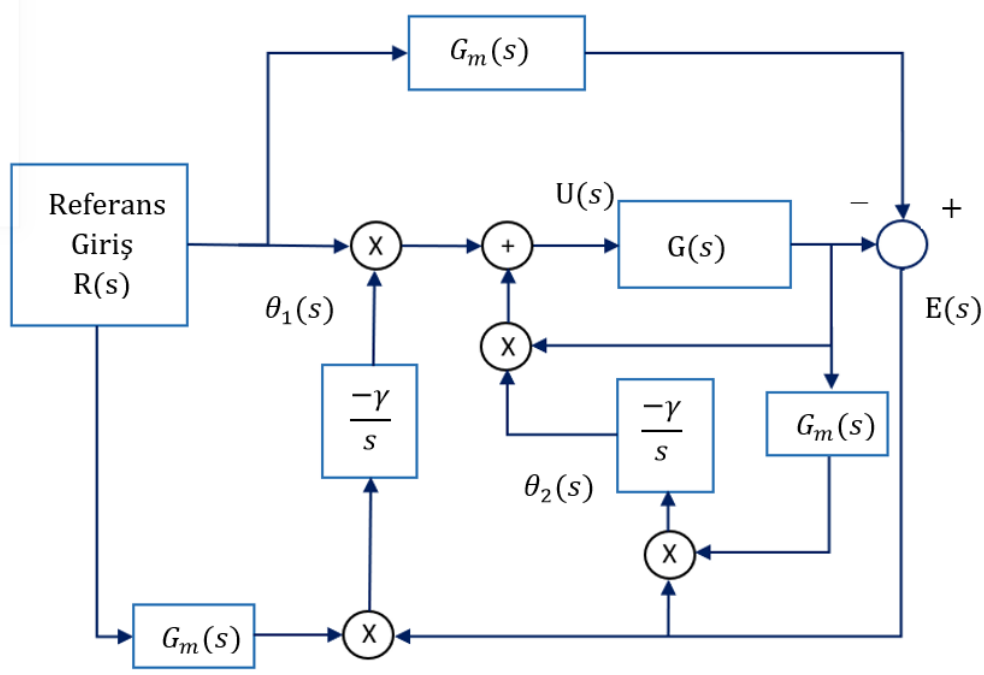
MIT kuralı 1961 yılında Massachusetts Institute of Technology'deki Instrumentation Laboratory'de geliştirilen bir yöntemdir (Mareels vd. 1987). Kuralın adın, geliştirildiği yer olan MIT'den gelmektedir. MIT kuralı, MRAC uygulamalarında ilk kullanılan yöntemdir. İlk kullanım alanı X-15 araştırma uçağı olsa da günümüzde birçok sistem denetleyici tasarlamak amacıyla kullanılmaktadır (Whitaker ve Rediess, 1970). MIT kuralı tabanlı MRAC uyarlama algoritmasının çıkarımı EK A'da detaylandırılmaktadır.

Tanım 3.1: MIT kuralına göre maliyet fonksiyonunun değerini minimize eden θ_1 ve θ_2 değerlerinin uyarlanması Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te tanımlanmaktadır. Burada her iki uyarlama parametresi de $G_m(q)$ ile ifade edilen referans modele bağlıdır. Ek olarak θ_1 ve θ_2 , γ uyarlama hızı katsayısı ve hata işareti ile doğru orantılıdır (Aslan vd. 2022).

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma G_m(q)r(t)e(t) \quad (3.4)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \gamma G_m(q)y(t)e(t) \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te bulunan γ değeri, uyarlama hızını belirlemektedir. γ 'nin değerinin artması ile θ değerlerinin değişim hızı artar, yani MRAC'ın uyarlama hızı artar. γ değerinin azalması ile de θ değerlerinin değişim hızı azalır, yani MRAC'ın uyarlama hızı azalır (Jain ve Nigam 2013). Şekil 3.2'teki blok diyagram, uyarlama mekanizması MIT kuralına göre oluşturulan MRAC'ın yapısını göstermektedir.



Şekil 3.2 MIT kuralı tabanlı MRAC.

Tanım 3.1’de ifade edilen ve Şekil 3.2’de blok yapısı gösterilen MIT kuralı tabanlı MRAC yaklaşımında, θ_1 ve θ_2 ’nin ideal durumdaki değerleri birinci dereceden bir sistem yapısı için Eşitlik (3.6) ve (3.7)’de verilmektedir. Bu eşitliklerdeki a ve b ifadeleri, denetlenen sistemin matematik modelinin parametreleridir.

$$\theta_1 = \frac{b_m}{b} \quad (3.6)$$

$$\theta_2 = \frac{a_m - a}{b} \quad (3.7)$$

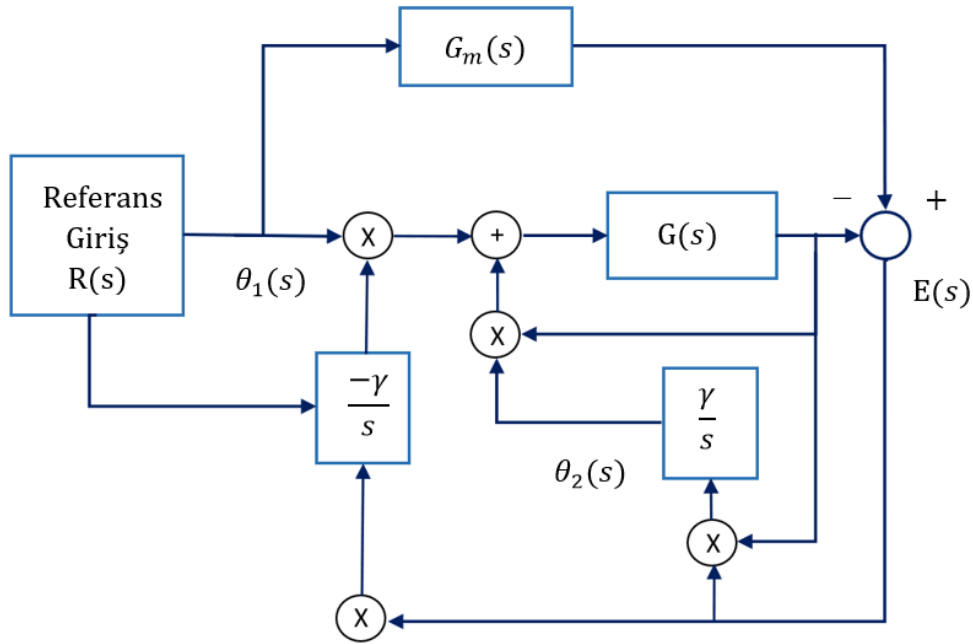
Uyarlanan parametrelerin referans model parametrelerine bağımlılığı ile birlikte beklenen değerine ulaşması uyarlama hızı γ değerinin doğru seçimi ile mümkün olacaktır. Bu durum, γ ’nin limitlerinin bulunmasına sebep olmaktadır. γ değerinin çok artırılması veya çok azaltılması durumlarında, θ uyarlama parametrelerinin değişim hızı sistem ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu durum da sistem çıkışının, osilasyona girmesine sebep olmaktadır (Kim vd. 2019, Duvanov vd. 2020). MIT kuralı tabanlı MRAC yaklaşımındaki bu durumun çözümünde Lyapunov kararlılık teoreminden faydalanılmaktadır. Bu yaklaşımda MRAC uyarlama kuralını oluşturmak için Lyapunov kararlılık teoremine dayalı, pozitif ve negatif tanımlı Lyapunov fonksiyonu kullanılmaktadır (Aslan vd. 2022, Mukherjee 2022).

Tanım 3.2: Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta, denetlenen sistem çıkışı $y_p(t)$ 'yi belirlenen referans model çıkışı $y_m(t)$ 'ye yakınsatmak için $V(e, \theta_1, \theta_2)$ maliyet fonksiyonu ile minimize eden denetim işareti $u(t)$ 'nin oluşmasını sağlayan θ_1 ve θ_2 parametreleri Eşitlik (3.8) ve (3.9)'daki gibi elde edilir.

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma r(t)e(t) \quad (3.8)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \gamma y_p(t)e(t) \quad (3.9)$$

Tanım 3.2'deki Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın blok diyagram biçiminde gösterimi Eşitlik (2.31) ve (2.32)'deki θ_1 ve θ_2 parametrelerinin uyarlama kurallarını içeren MRAC yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir. Maliyet fonksiyonu $V(e, \theta_1, \theta_2)$ ve detaylı analizi Tanım 3.2 için Ek B'de verilmektedir.



Şekil 3.3 Lyapunov kuralı tabanlı MRAC.

Endüstriyel tesislerdeki denetim problemlerinde PID denetleyiciler, uygulama kolaylıkları sebebiyle sıkça kullanılmaktadır. Tanım 3.1 ve Tanım 3.2'de verilen MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetleyicileri hem birbirleriyle hem de PID denetleyici ile kıyaslamak için yapılan çalışmalarda 3 farklı karakterde 2. dereceden sistem kullanılmaktadır. Eşitlik (3.10) ile ifade edilen kritik sönümlü sistem, Eşitlik (3.11) ile ifade edilen az sönümlü sistem ve Eşitlik

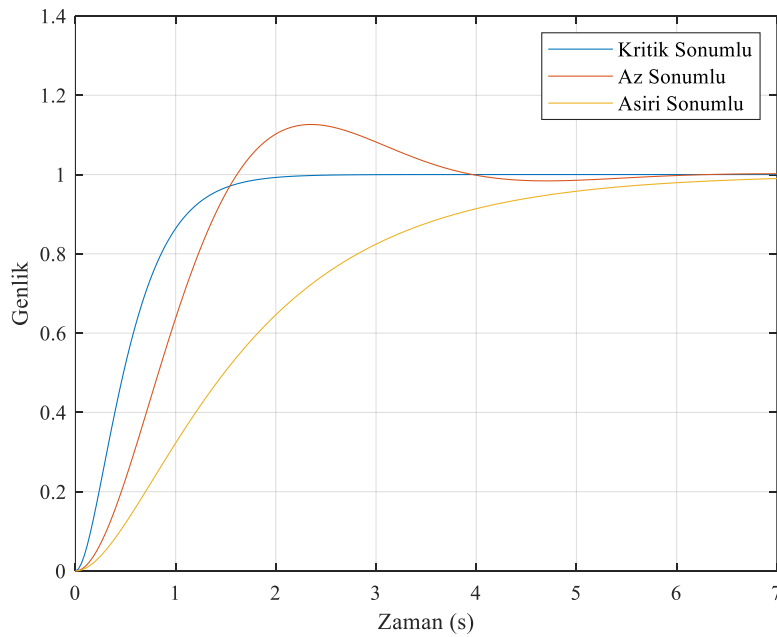
(3.12) ile ifade edilen aşırı sönümlü sistem kullanılarak, MRAC ve PID denetleyiciler için sanal test ortamı tasarlanmıştır.

$$G_{ks}(s) = \frac{12.25}{s^2 + 7s + 12.25} \quad (3.10)$$

$$G_{ds}(s) = \frac{2.56}{s^2 + 1.76s + 2.56} \quad (3.11)$$

$$G_{as}(s) = \frac{1.513}{s^2 + 2.829s + 1.513} \quad (3.12)$$

Endüstriyel tesislerinde olduğu gibi demir üretim tesislerindeki denetim problemlerinde de sistemin dinamik tepkileri, yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve en yüksek aşım tasarım isterlerini oluşturmaktadır. Sistemde kullanılan donanımların yaşlanması, ortam koşullarının değişmesi gibi etkenler, tasarlanan klasik PID denetleyicinin tasarım isterlerine göre güncellenmesini gerektirir. Bu çalışma MRAC'ın demir üretim süreçlerinde kullanımı konusunu içermektedir. Sanal test sistemleri oluşturulurken de denetim probleminin çözümünde karşılaşılan durumlar dikkate alınmıştır. Modellenen her üç sistem de birbirlerine yakın yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve en yüksek aşım değerlerine sahiptir. Bunun sebebi, gerçek dünya problemlerinde olduğu gibi dış etkenler veya yaşlanmaya bağlı olarak sistemin yükselme zamanı, yerleşme zamanı veya en yüksek aşım miktarındaki değişim durumunu göstermektedir.



Şekil 3.4 MRAC uygulaması için oluşturulan sanal sistemlerin basamak cevapları.

Şekil 3.4, sanal test sistemlerinin basamak cevaplarını göstermektedir. Sanal test sistemlerinin yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve en yüksek aşım değeri bilgileri, **Çizelge 3.1**'de bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 Sanal test sistemlerinin sistem parametreleri.

	Kritik Sönümlü	Az Sönümlü	Aşırı Sönümlü
Yükselme Zamanı	0.9594	1.0874	3.3471
Yerleşme Zamanı	1.6669	3.6441	6.0411
En Yüksek Aşım (%)	0	12.6324	0

Sanal test sistemleri, farklı karakterdeki sistemler üzerinde denetim çalışmaları PID ve MRAC ile yapılmaktadır. Burada tasarım isterleri, yükselme zamanı 1.2 saniyeden az, yerleşme zamanı 3.3 saniyeden az ve en yüksek aşım miktarı değeri %7'den az olarak düşünülmektedir. Demir üretim tesislerinde PID ile çözülen denetim problemlerinde, denetim performansı düştüğünde, denetleyicilerin yeniden tasarlanması ihtiyacı doğar. Sanal test sistemlerinde yapılan PID uygulamasında da bu durum canlandırılmak istenmiştir. Bunun için kritik sönümlü, az sönümlü ve aşırı sönümlü sistemlerin her biri için ayrı ayrı PID denetleyici tasarlanmıştır.

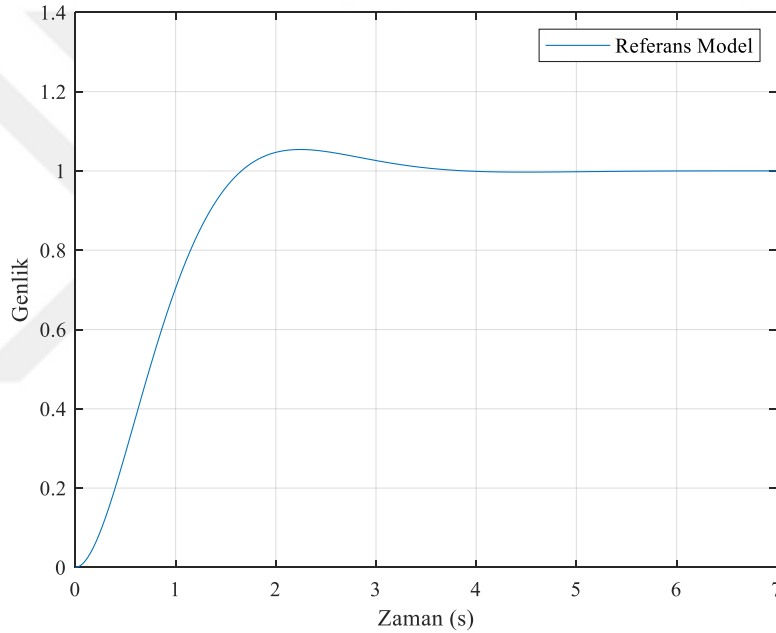
Sanal test sistemlerini denetleyecek PID denetleyicilerin tasarımında, Ziegler Nichols yöntemi kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları ve kişisel sanayi tecrübelerime göre, günümüz sanayi tesislerindeki PID denetleyicilerin tasarımında Ziegler Nichols yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada da aynı yöntemin tercih edilme sebebi, sanayi şartlarında tasarımı yapılan bir PID denetleyicinin yine aynı koşullarda tasarlanan MRAC'ı kıyaslamak içindir. Buna göre tasarımı yapılan 3 adet PID denetleyicinin parametreleri **Çizelge 3.2**'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Sanal test sistemleri için tasarlanan PID denetleyici parametreleri.

Denetleyici Katsayısı	Kritik Sönümlü	Az Sönümlü	Aşırı Sönümlü
P	0.48	0.3709	0.8450
I	1.3290	0.7660	0.5060
D	0	0	0

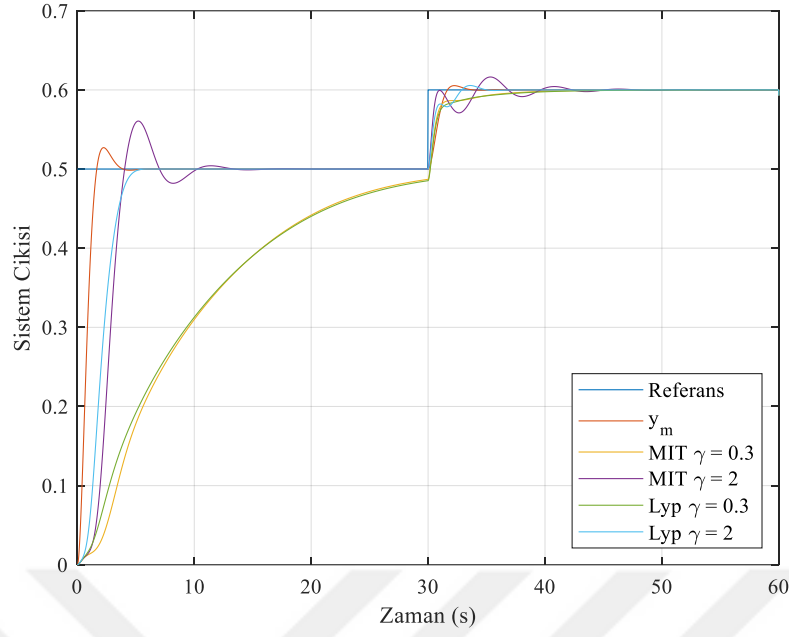
Sanal test sistemlerinin denetimini yapan MRAC'ın referans modelini tasarlamak için sistemlerin dinamik davranışları incelenmiştir. Sistemlerin fiziksel kapasitelerine uygun yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerlerine sahip bir referans model oluşturulmuştur. Sanal test sistemlerinin denetimini yapmak için tasarlanan MRAC için belirlenen referans model, Eşitlik (3.13)'te verilmiştir. Referans model tasarımı yapılırken denetim isterleri, yükselme zamanı 1.0825 saniye, yerleşme zamanı 3.1434 saniye ve en yüksek aşım miktarı değeri %5.4084 olarak belirlenmiştir. Bu özellikler ile tanımlanan referans modelin basamak yanıtı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

$$G_m(s) = \frac{3.65}{s^2 + 2.6s + 3.65} \quad (3.13)$$



Şekil 3.5 Referans model basamak cevabı.

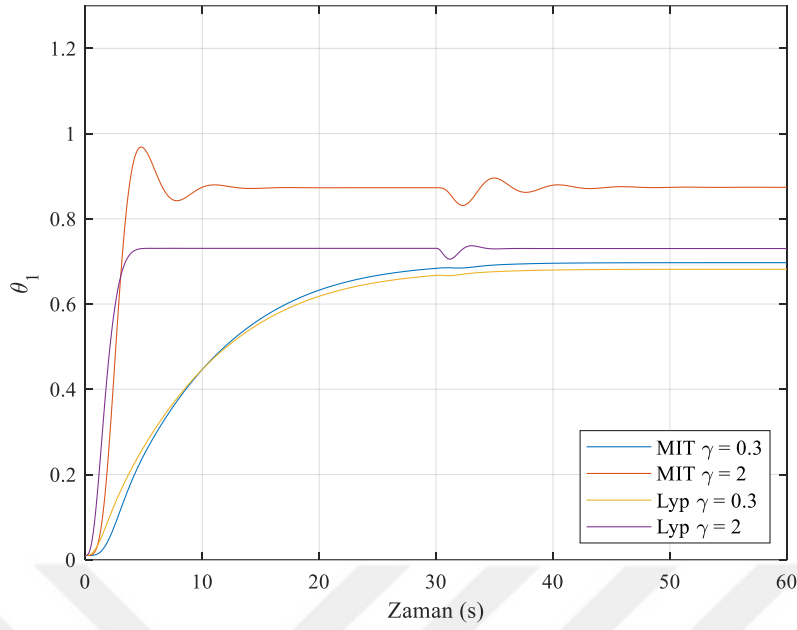
MRAC tasarımında referans model haricinde bir parametre daha bulunmaktadır. Bu parametre, MRAC uyarlama algoritmasının uyarlama hızını belirleyen γ uyarlama hızı katsayısı değeridir. θ parametrelerinin zamana göre değişimi, MIT uyarlama kuralı için Eşitlik (3.4) ve (3.5), Lyapunov uyarlama kuralı için Eşitlik (3.8) ve (3.9)'da görüldüğü gibi γ değerine bağlıdır. Eşitliklerdeki ifadelerle göre, γ uyarlama hızı katsayısının değeri ne kadar büyük seçilirse, θ 'ların zamana göre değişimi de o kadar hızlı olmaktadır. Bunun tersi olarak, γ uyarlama hızı katsayısının değeri ne kadar küçük seçilirse, θ 'ların zamana göre değişimi de o kadar yavaş olmaktadır.



Şekil 3.6 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$)

Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da, kritik sönümlü sanal test sisteminin, γ değerinin 0.3 ve 2 olması durumları için MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetimi neticesinde elde edilen veriler bulunmaktadır. Denetimin başladığı 0. saniyede, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’deki θ_1 ve θ_2 uyarlama parametrelerinin değeri 0’dır. Eşitlik (3.2)’deki ifade denetim işaretinin, θ_1 ve θ_2 uyarlama parametrelerinin sırasıyla referans giriş işareti r ve sistem çıkış işareti y_p ile çarpımları neticesinde oluştuğunu gösterir. Buna göre denetimin 0. saniyesinde denetim işaretinin 0 olması beklenir. Şekil 3.9’daki veriler de bu ifadeyi desteklemektedir.

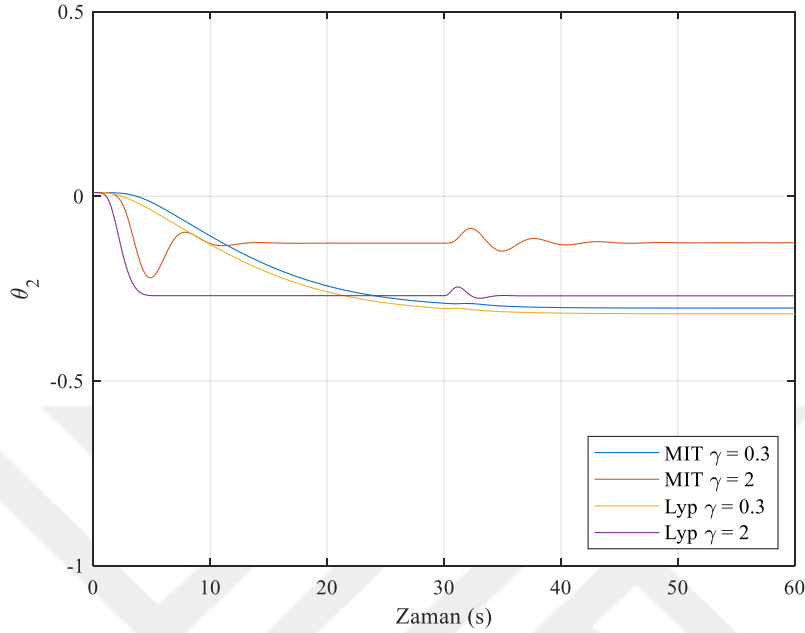
Denetim süreci 0. saniyeden başlayarak devam ettiğinde, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’deki θ_1 ve θ_2 değerlerinin değiştiği gözlemlenmektedir. Uyarlama parametreleri θ_1 ve θ_2 , MIT kuralı tabanlı MRAC için Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5), Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için Eşitlik (3.6) ve (3.7)’deki ifadelerde tanımlandığı gibi değişim gösterir. Uyarlama hızı katsayısı γ ’nın 0.3 olduğu durumda MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ların θ uyarlamasının, γ ’nın 2 olduğu duruma kıyasla yavaş olduğu gözlemlenmektedir. Bu yavaş uyarlama sebebiyle γ ’nın 0.3 olması halinde MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ın denetim işareti, γ ’nın 2 olduğu durumdakinden daha yavaş değer değiştirmiştir.



Şekil 3.7 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).

Denetim işaretinin yavaş ve hızlı değişiminin denetim probleminin çözümünde ortaya çıkardığı sonuç, Şekil 3.6’da kendisini göstermektedir. Denetimin başlaması ile birlikte referans model çıkış işareti y_m , referans giriş işaretinin etkisi ile 0.5 değerine yükselmiştir. Uyarlama algoritması, θ_1 ve θ_2 parametrelerini uyarlayarak, referans model ile sistem çıkışları arasındaki hatayı minimize etmesi beklenen denetim işaretinin üretilmesini sağlamıştır. γ ’nın 0.3 olduğu durumda uyarlama hızı o kadar yavaş kalmıştır ki, MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ların her ikisi de çalışmanın 30. saniyesinde, referans giriş işareti 0.5 olmasına rağmen sistem çıkışını ancak 0.48 değerine yükseltebilmiştir. Denetim çalışmasının 30. saniyesinde referans giriş işareti 0.5’den 0.6’ya yükseltilmiştir. Bu anda, θ_1 ve θ_2 parametreleri başlangıç koşulunda değildir ve sistem hakkında gerekli uyarlamayı sağlamıştır. Bu sebeple, 30. saniye sonrasında her iki denetleyicinin oluşturduğu yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri denetim çalışmasının başlangıcındaki değerlere oranla daha küçük olmuştur. Çalışmanın ilk anında yükselme zamanı değeri MIT kuralı tabanlı MRAC için 18.69 saniye, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 19.56 saniye olarak tespit edilmiştir. Referans değerinin yükseltildiği 30. saniyede tespit edilen yükselme zamanı değeri MIT kuralı tabanlı MRAC için 3.78 saniye, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 3.53 saniyedir. Benzer şekilde, çalışmanın ilk anında yerleşme zamanı değeri MIT kuralı tabanlı MRAC için 23.45 saniye, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 24.41 saniye olarak görülmektedir. Buna karşılık referans değerinin 0.5’ten 0.6’ya

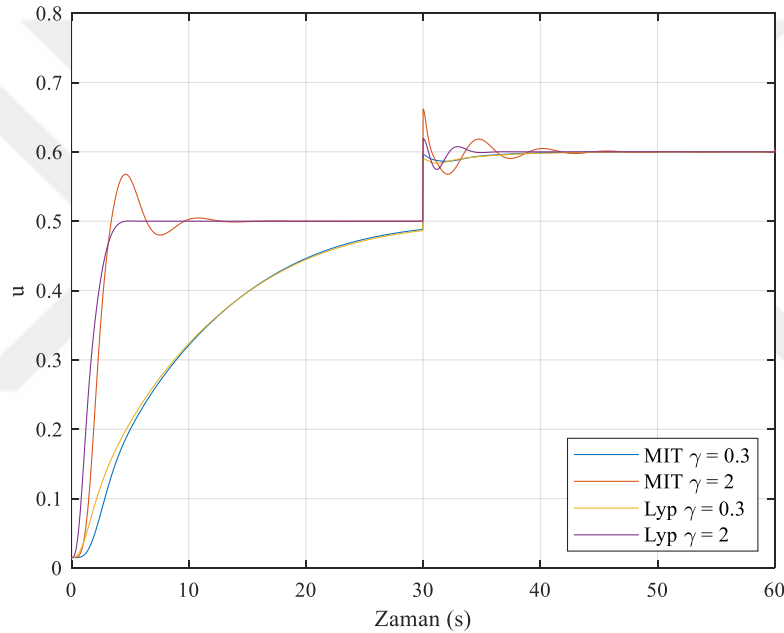
yükseltildiği 30. saniyede, MIT kuralı tabanlı MRAC 9.56 saniyelik, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise 10.68 saniyelik yerleşme zamanı ile denetimi sağlamaktadır.



Şekil 3.8 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).

γ 'nın 2 olduğu durumda da uyarlama algoritması, θ_1 ve θ_2 uyarlaması yaparak denetim işareti üretilmesini sağlamaktadır. Burada uyarlama hızı katsayısı değeri bir önceki denemeye kıyasla hızlı olduğundan, θ_1 ve θ_2 'nin zamana göre değişimi belirgin biçimde hızlı olmuştur. Uyarlamanın yavaş olduğu durumda MIT kuralı tabanlı MRAC'ın θ_1 ve θ_2 parametreleri 30 saniyede ideal değerine yakınsamaktadır. Buna karşın uyarlamanın hızlı olduğu durumda bu süre 13.6 saniye olarak görülmektedir. Benzer şekilde Lyapunov kuralı tabanlı MRAC uyarlama parametreleri, uyarlamanın yavaş olduğu durumda 30 saniyede ideal değerine yakınsamaktadır. Uyarlama hızı katsayısı 2'ye yükseltildiğinde ise uyarlama parametrelerinin ideal değerine yakınsaması 4.9 saniyede gerçekleşmektedir. Uyarlama hızı katsayısı değerinin 2 olması durumunda MIT kuralı tabanlı MRAC, denetimin 0. saniyesinden sonra 2.05 saniyelik, denetimin 30. saniyesinden sonra 0.55 saniyelik yükselme zamanı oluşturmuştur. Bu anlardaki yükselme zamanları Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için sırasıyla, 2.51 ve 2.25 saniyedir. Benzer şekilde γ 'nın 2 olması durumunda MIT kuralı tabanlı MRAC'ın sebep olduğu yerleşme zamanı, denetimin 0. saniyeden sonra 9.28 saniye, denetimin 30. saniyesinden sonra 13.87 saniyedir. Aynı durumda Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın sebep olduğu yerleşme zamanı değerleri sırasıyla 4.43 ve 4.5 saniyedir.

Uyarlama hızının yavaş olduğu durumda yerleşme zamanı ve yükselme zamanı değerleri her iki MRAC için de yüksektir. Beklendiği gibi uyarlama hızı artırıldığında, denetleyici tepkisi hızlı olmakta ve yükselme zamanı ile yerleşme zamanı değerleri azalmaktadır. Ancak bu hızlı tepki, beraberinde sistem çıkışında aşım oluşmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.6 incelendiğinde, γ 'nın 2 olması durumunda MIT kuralı tabanlı MRAC'ın %32.43 kadar aşımına sebep olduğu görülmektedir. Buna karşın aynı uyarlama hızına sahip Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta aşım bulunmamaktadır. Bu durum, tanımlarda bahsedildiği gibi, MIT kuralı tabanlı MRAC'ın γ uyarlama hızı katsayısı değerinin değişimine karşı Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'a göre daha hassas olduğu durumunu desteklemektedir.

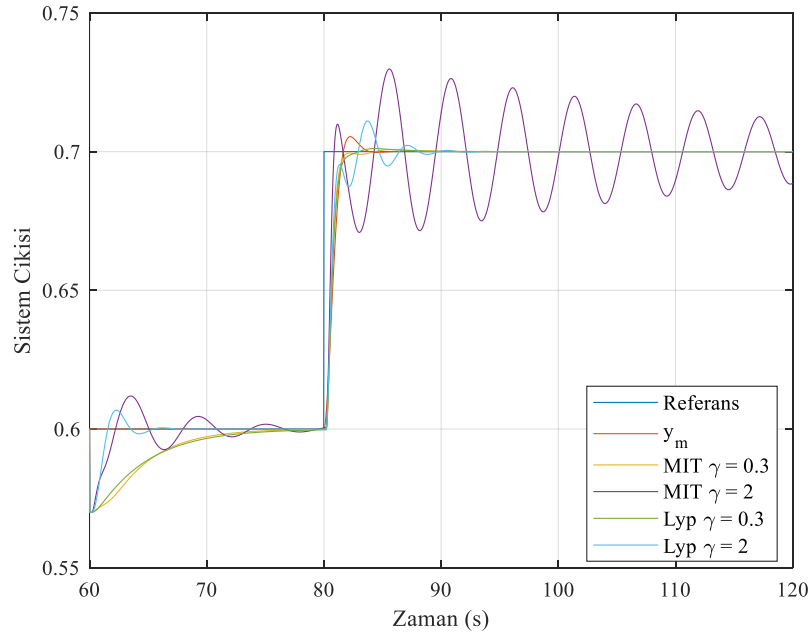


Şekil 3.9 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde denetim işareti ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).

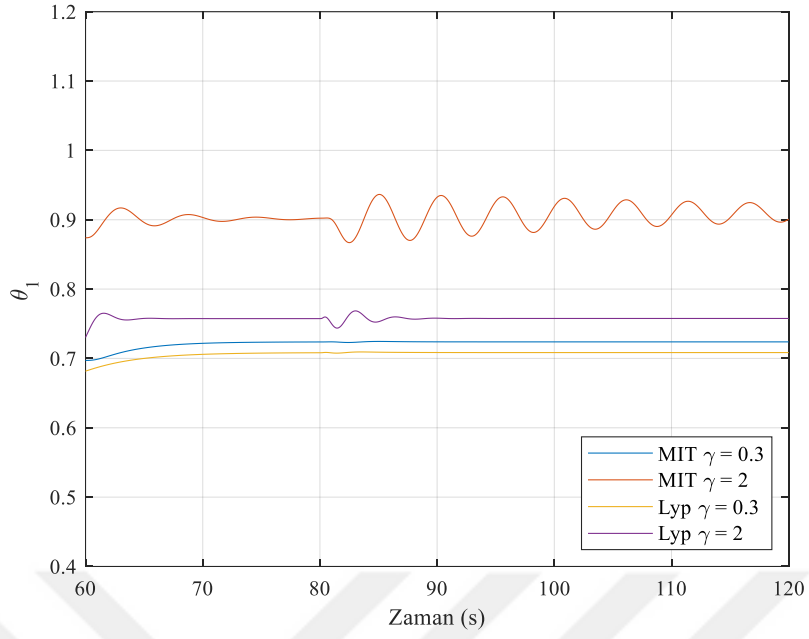
Denetim çalışmasının 60. saniyesinde, sanal test sistemine bir bozucu eklenmiştir. Bu bozucu, endüstriyel tesislerde sıkça karşılaşılan ve donanım yıpranması sebebiyle geribesleme işaretinde gözlenen gecikmeyi canlandırmaktadır. Sanal sistem, denetim çalışmasının 60. saniyesinden sonra bozucu etkisi altında denetlenmektedir. Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te denetim çalışmasının son bölümünde elde edilen veriler bulunmaktadır.

Şekil 3.10'da bozucu etkisi uygulandıktan sonra her iki denetleyicinin de 80. saniyeye kadar denetimi sağlayarak kalıcı durum hatasını yok ettiği görülmektedir. Bu anda referans giriş 0.6'dan 0.7'ye yükseltildiğinde her iki denetleyici de Şekil 3.13'te görülen denetim işaretlerini üretmektedir. Bu aşamadan sonra γ 'nın 0.3 olduğu durum için MIT kuralı tabanlı MRAC, 0.86

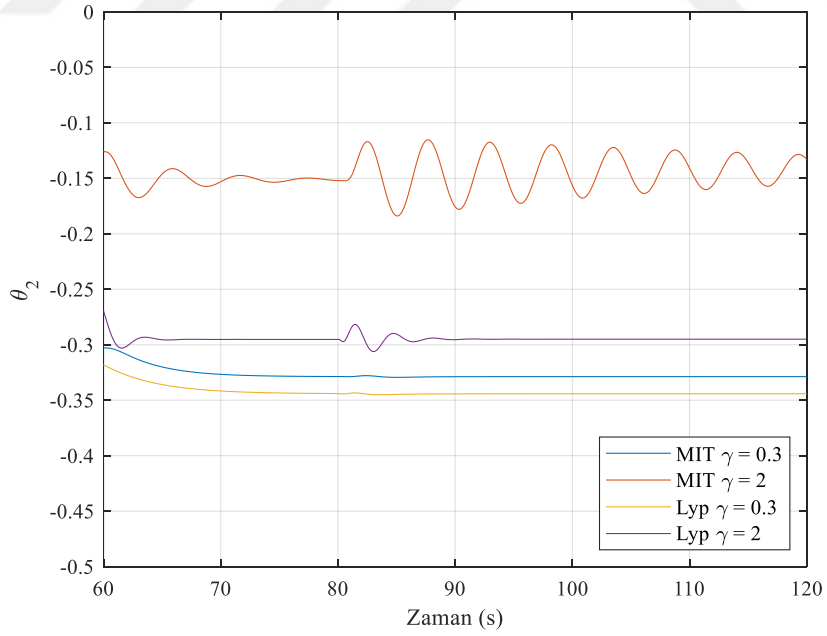
saniyelik yükselme zamanı, 1.64 saniyelik yerleşme zamanı ve %0.76 aşım ile denetimi sağlamıştır. γ 'nın 0.3 olduğu durum için Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 0.93 saniyelik yükselme zamanı, 1.93 saniyelik yerleşme zamanı ve %1.12 aşım ile denetimi sağlamıştır. Uyarlama hızı katsayısının artırılarak 2'ye yükseltildiği durum için MIT kuralı tabanlı MRAC, 0.46 saniyelik yükselme zamanı ve %29.78 aşım ile denetimi sağlamaya çalışmaktadır. Ancak bu durumda sistem çıkışı, sürekli salınıma girmekte ve referans giriş değerine yakınsayamamaktadır. Denetimin 80. saniyesinden sonra uyarlama hızı katsayısının 2 olduğu durumda Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 0.72 saniyelik yükselme zamanı, 7.4 saniyelik yerleşme zamanı ve %11.05 aşım miktarı ile denetimi sağlayabilmiştir. γ 'nın yüksek değerlerinde uyarlama hızı da yüksek olmaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC, γ değişimine karşı Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'a göre daha hassas olduğundan, θ_1 ve θ_2 değerleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de görüldüğü gibi denetimin 80. saniyesinden sonra sürekli salınım yapmaktadır. Salınının sebebi, uyarlama parametrelerinin ve dolayısıyla denetim işaretinin, yüksek uyarlama hızı sebebi ile birim zamanda daha çok değişmesidir. Denetim işareti ani ve yüksek genlikli tepkiler verdiğinde, sistem çıkışı da ani değişimler göstermektedir. Sistem çıkışının değişimi ile hatanın aniden değişmesi, uyarlama parametrelerinin ideal değerini tekrar değiştirmekte ve bu sefer de bir öncekinin tersi yönde uyarlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum sistem çıkışında sürekli bir salınıma sebep olmaktadır.



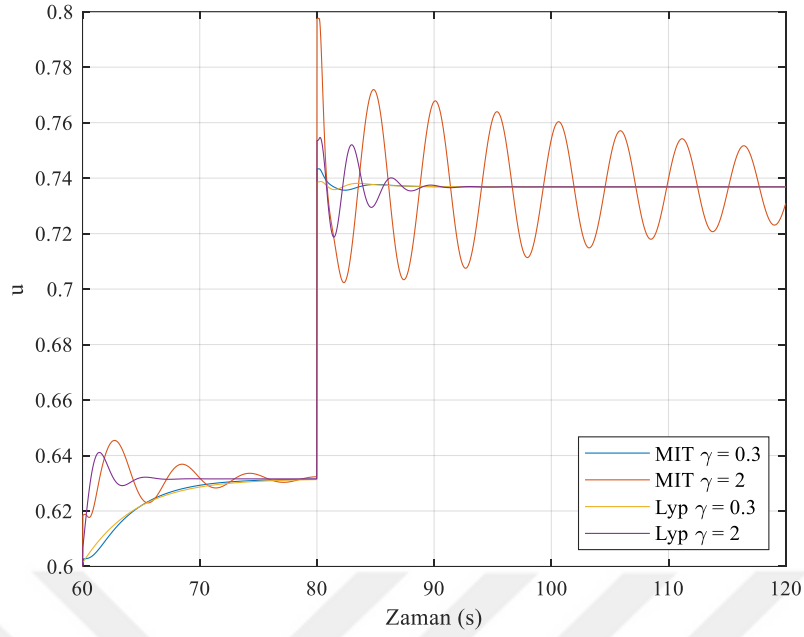
Şekil 3.10 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).



Şekil 3.11 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).



Şekil 3.12 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi için θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).



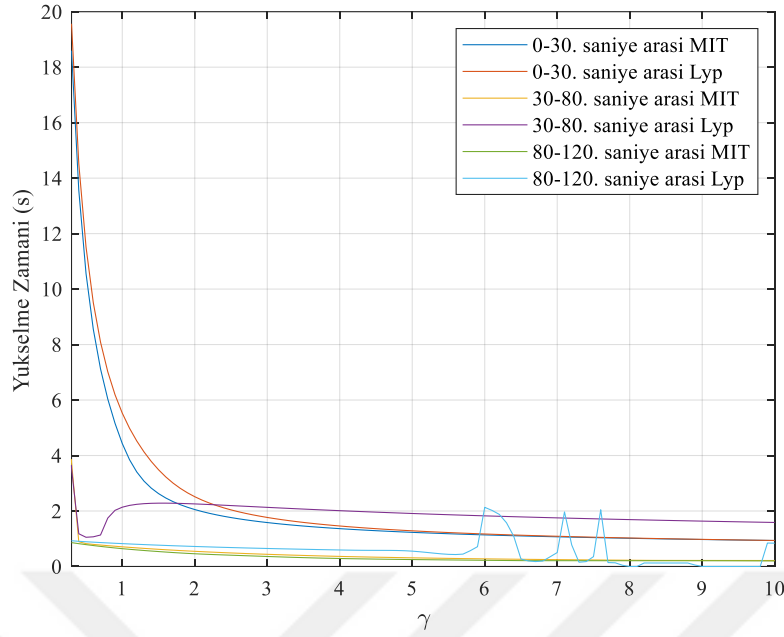
Şekil 3.13 Kritik sönümlü sistemin MRAC denetiminde, dış bozucu bölgesi denetim işareti ($\gamma = 0.3$ ve $\gamma = 2$).

Denetim çalışmaları, γ uyarlama hızı katsayısının 0.1 ve 10 arasındaki değerler kullanılarak tasarlanan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar ile de yapılmıştır. Yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan veriler kullanılarak elde edilen denetim performansı parametreleri, **Çizelge 3.3**'te bulunmaktadır. Çizelgede, farklı γ değerleri kullanılarak tasarlanan MRAC'larla yapılan denetimde, 30. Saniyede referans giriş işaretinin 0.5'ten 0.6'ya yükseltilmesi neticesinde oluşan yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en yüksek aşım miktarı ve RMS hata değerleri bulunmaktadır. **Çizelge 3.3**'teki verilere göre MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde yükselme zamanı değerinde, γ uyarlama hızı katsayısının artması ile 3.761 saniyeden 0.215 saniyeye kadar düzenli bir düşüş, yerleşme zamanında 9.56 saniyeden 29 saniyeye çıkış, en yüksek aşım miktarında %0'dan %50'ye artış gözlemlenmektedir. γ değerindeki artış ile oluşan bu denetim performansı parametreleri beraberinde, hata RMS değerinde %1.37'den %2.27'ye artışa sebep olmaktadır. Uyarlama hızı katsayısının 0.3'ten 10'a yükselmesi ile Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde yükselme zamanı değerinde, 3.534 saniyeden 1.587 saniyeye kadar düzenli bir düşüş gözlenmiştir. Uyarlama hızı katsayısının artışı ile yerleşme zamanında 10.683 saniyeden 8.984 saniyeye çıkış, en yüksek aşım miktarında %0'dan %33.901'ye artış gözlemlenmektedir. γ değerindeki artış sistem çıkışı ile referans giriş işareti arasındaki hatanın RMS değerini çok etkilememiştir. Uyarlama hızının değişimi, hatanın RMS değerinin %1.442'den, %1.420'ye düşmesine sebep olmuştur.

Çizelge 3.3 Kritik sönümlü sanal test sistemi denetim çalışmasının 30. saniyesinden sonra MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.

γ	Yükselme Zamanı		Yerleşme Zamanı		En Yüksek Aşım (%)		RMS Hata (%)	
	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov
0.3	3.761	3.534	9.564	10.683	0	0	1.372	1.442
1.0	0.709	2.137	7.310	3.298	3.819	0.804	1.073	1.109
2.0	0.546	2.255	13.868	7.398	16.325	5.576	1.196	1.136
4.0	0.363	2.011	21.473	4.781	34.583	14.698	1.580	1.209
7.0	0.247	1.752	21.896	5.684	42.569	25.381	1.178	1.314
10.0	0.215	1.587	29.194	8.984	50.534	33.901	2.267	1.420

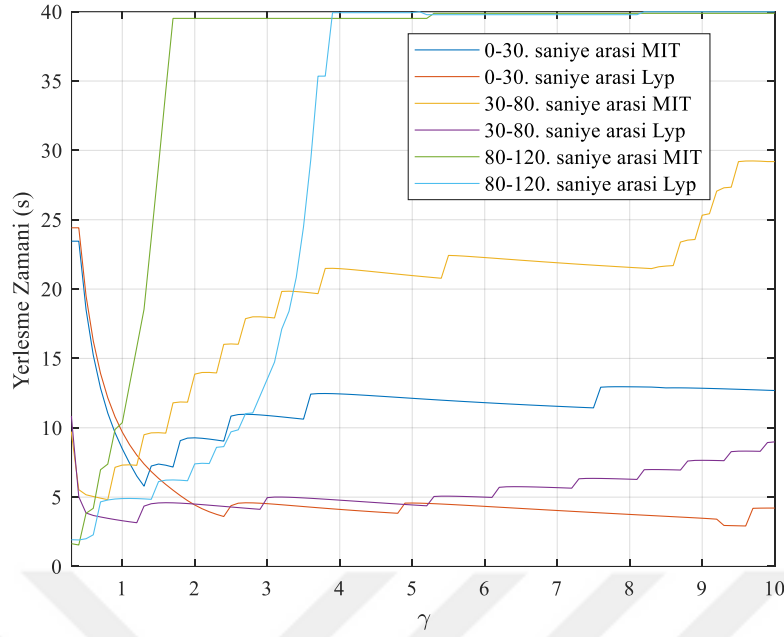
Her iki denetleyici için de γ değerindeki artış ile yükselme zamanındaki düşüş, denetleyicilerin uyarlama kurallarından kaynaklanmaktadır. MIT ve Lyapunov uyarlama kurallarında, uyarlama parametrelerinin değişim hızı γ değeri ile doğru orantılıdır. γ ne kadar büyük olursa uyarlama parametreleri olması gereken değere o kadar hızlı yakınsar. Bu durum denetim işaretinin de olması gereken değerine daha hızlı yakınsamasına neden olur. Denetim işaretindeki ani değişimler de sistem çıkışının daha hızlı değişmesine ve yükselme zamanı değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun aksine, uyarlama hızındaki artışın, MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde yerleşme zamanında artışa sebep olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, MIT uyarlama kuralının referans model parametrelerine bağlı olması sebebiyle uyarlama hızı değişimine karşı hassas olmasıdır. Bu hassasiyet yüksek γ değerlerinde sistem çıkışının salınma girmesine sebep olmuştur. MIT kuralı tabanlı MRAC'ın aksine, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde yerleşme zamanı **Çizelge 3.3**'teki verilere göre MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde, γ uyarlama hızı katsayısının 0.3'ten 10'a yükselmesi ile yerleşme zamanı 10.683 saniyeden 3.298 saniyeye kadar düştükten sonra 8.948 saniyeye yükselmektedir. γ değeri daha artırıldığında, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın da sistem çıkış işaretini yüksek uyarlama hızı sebebiyle salınma sokma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.14 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde yükselme zamanı değerleri.

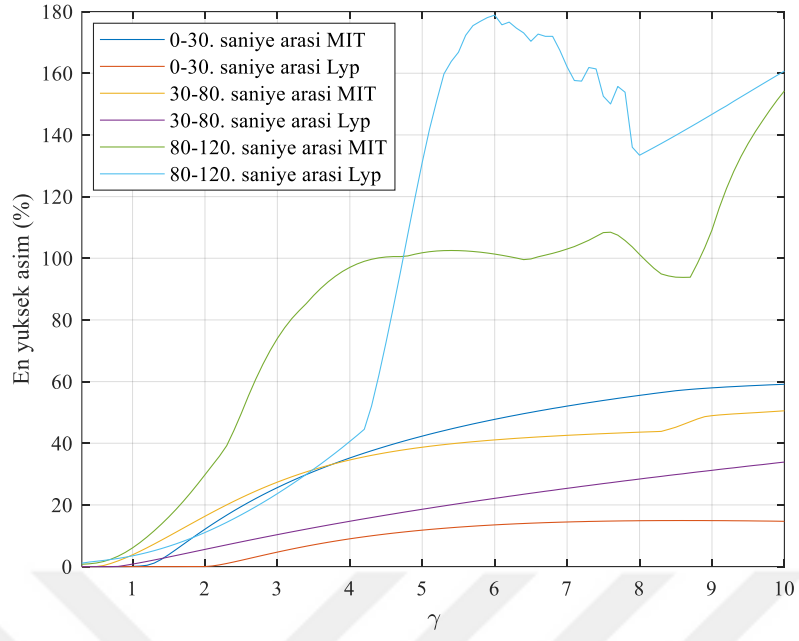
Kritik sönümlü sanal test sisteminin, farklı γ değerleri ile tasarlanmış olan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetimi, neticesinde oluşan denetim performans parametreleri Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de görülmektedir. Şekillerde her performans parametresi, γ ’nın 0.1’den 10’a kadar 0.1’er aralıklarla artışına göre çizdirilmiştir. Şekillerdeki bütün performans parametreleri, her iki MRAC denetimi için ve denetim sürecinin 3 ayrı bölgesine özel olarak gösterilmektedir.

Şekil 3.14’te MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ların yükselme zamanı değerleri yer almaktadır. Yükselme zamanı her iki MRAC’ta da γ ’nın artışı ile denetimin ilk bölümünde yaklaşık 10 kat düşmektedir. Denetimin ikinci ve üçüncü bölümlerinde her iki denetleyici için de denetimin ilk bölümünde uyarılama hızı artışı genel olarak yükselme zamanı değerini düşürse de ilk bölümdeki kadar etkili değildir.

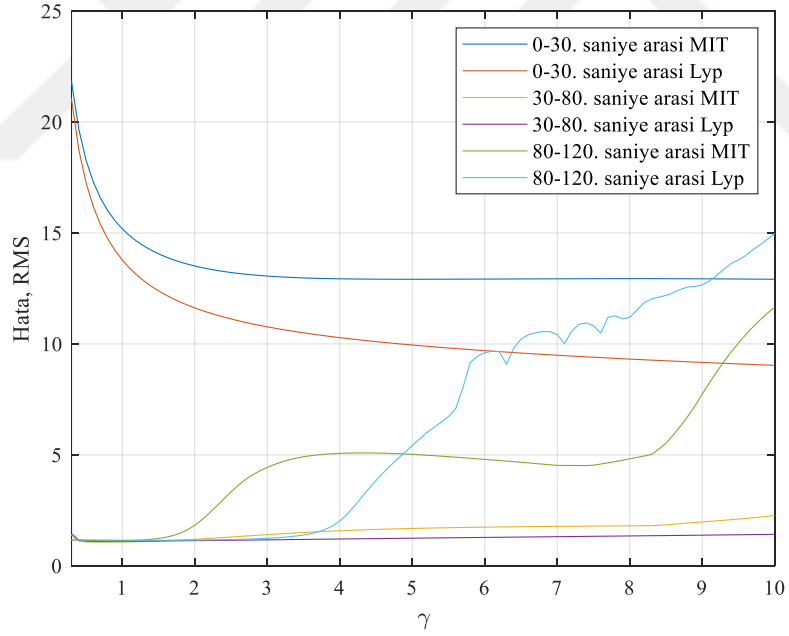


Şekil 3.15 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde yerleşme zamanı değerleri.

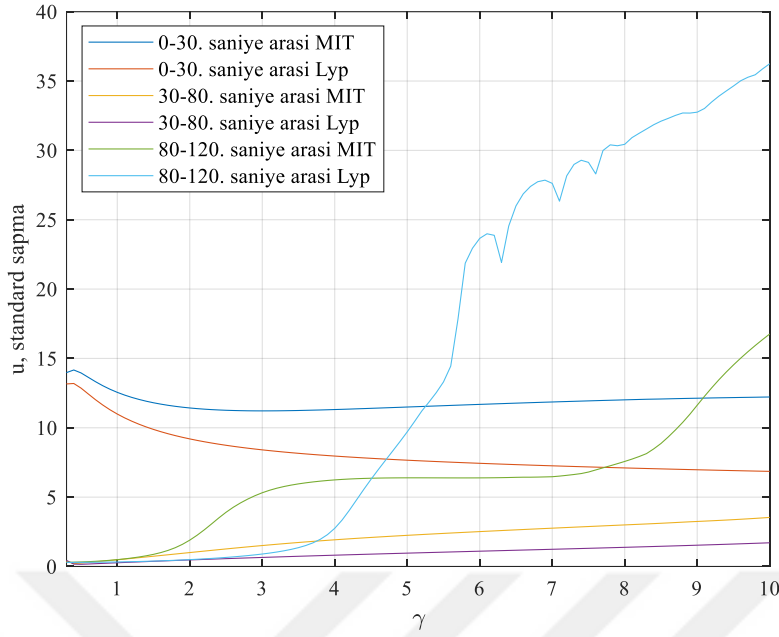
Şekil 3.15'te verilen yükselme zamanı değerleri, denetimin ilk bölgesi için her iki MRAC için de γ 'nın artması ile düşmektedir. İlk bölümde MIT kuralı tabanlı MRAC için en uygun γ değeri 7.5, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için ise 9.5'tir. Denetimin ikinci ve üçüncü bölümlerinde ise γ değeri 0.7'den büyük seçildiğinde, yerleşme zamanı değeri hızla artmaktadır. Şekil 3.15'teki verilere göre γ değerinin 0.7'den küçük seçilmesi denetim isterlerini sağlamaktadır. Ancak bu durumda, Şekil 3.14'te denetimin ilk bölümü için görülen yükselme zamanı değeri her iki MRAC için de 7 saniyeden daha uzun sürecektir. Şekil 3.16, γ 'nın denetimdeki aşım miktarına etkisini göstermektedir. γ 'nın 1'den küçük değerleri için en yüksek aşım her iki MRAC için de %5 civarında iken, γ 'nın artması ile birlikte, aşım miktarının %160 değerine kadar artabildiği görülmektedir. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'deki verilere göre de denetimin ilk bölümünde γ 'nın 10 seçilmesi, sistem hatasının RMS değeri ve denetim işaretinin standart sapması değerini minimize etmektedir. Ancak denetimin ikinci ve üçüncü bölümlerinde γ 'nın 1.5'ten büyük olması MIT kuralı tabanlı MRAC için, γ 'nın 3'ten büyük olması da Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için hata RMS ve denetim işareti standart sapma değerlerinin artışa geçmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3.16 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde en yüksek aşım miktarı.



Şekil 3.17 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde % RMS hata değeri.



Şekil 3.18 Kritik sönümlü sistem MRAC denetiminde denetim işareti standart sapma miktarı.

Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18’de incelenen denetim performans parametrelerinin γ ’ya göre değişimleri, γ değeri tespitinin, MRAC tasarımındaki önemini göstermektedir.

Kritik sönümlü sanal test sistemlerinde yapılan MRAC denetim çalışmalarında, γ uyarılama hızı katsayısı değişiminin MRAC performansına olan etkileri görülmektedir. Yapılan çalışmalar, γ değerinin MRAC performansı için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Tasarımcı, γ değerini küçük seçtiğinde, en yüksek aşım değeri ve yerleşme zamanı düşük olmakta, ancak yükselme zamanı ve RMS hata değeri büyük olmaktadır. Buna karşın γ değerini büyük seçtiğinde ise yükselme zamanı düşecek ancak yerleşme zamanı ve en yüksek aşım değeri artacaktır. RMS hata değeri ise bir noktaya kadar düşmekte ardından tekrar artışa geçmektedir. Bu durum tasarımcının üstesinden gelmesi gereken büyük bir sorundur.

Bölüm 1 ve Bölüm 2’de, endüstriyel tesislerde kullanılan PID denetleyici tasarımında ve bu denetleyicinin sürdürülebilirliğinde yaşanan sorunlara değinilmektedir. Endüstriyel tesislerde kullanılan PID denetleyicilerin tasarımında genellikle Ziegler Nichols yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılırken sistem üzerinde, sistemi sabit genlikli ve sabit frekanslı salınıma sokmak için bir dizi deneme yapılır. Ardından yapılan hesaplamalarla belirlenen PID parametreleri belirlenir. Sonrasında ise, parametrelerin hassas tasarımı için

sistemde tekrar denemeler yapılır. Bu denemeler endüstriyel tesisler için sorunlar teşkil eder. Yapılan her denemede sistem neticesi kesin olarak belli olmayan biçimde çalışmaya zorlanır. Elde edilen verilere göre tasarımcı parametre değişimi yapar ve yaptığı değişikliğin sonucunu görmek için tekrar deneme yapar. Bu bölümde MRAC ile yapılan denetim çalışmaları da denetleyici tasarımı yapmak için sistem üzerinde birçok deneme yapılması gerektiğini göstermektedir. Kritik sönümlü sistemin denetiminde 100 farklı γ değeri kullanılarak denemeler yapılmıştır. Bu denemelerin ardından elde edilen veriler yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en yüksek aşım miktarı ve RMS hata değerleri bakımından incelendiğinde, γ için kısıtlı bir ideal değer aralığı olduğu görülmektedir.

3.3 BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC

Tanım 3.3: Denetlenen sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki fark ve bu farktaki değişimin giriş üyelik fonksiyonları olarak verildiği durumda uyarlama hızı γ 'nın seçimi çıkış üyelik fonksiyonu olarak tanımlanacak olursa kural tabanlı Çizelge 3.4'te verildiği gibi bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC hızlı parametre uyarlaması sağlayacaktır.

Kritik sönümlü sanal test sisteminde yapılan denetim çalışmaları γ uyarlama hızı katsayısının MRAC tasarımı için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir (Dinakin ve Oluseyi, 2021). Tasarımcı sistemde yapacağı denemeler ile ideal γ değer aralığını tespit etmelidir. Yapılan denemelerde γ değeri küçük seçildiğinde en yüksek aşım küçük olmakta ancak RMS hata büyük olmaktadır. γ değeri büyük seçildiğinde ise yükselme zamanı azalmakta ancak en yüksek aşım miktarı artmaktadır. Performans parametrelerinin γ 'ya göre değişimleri de her zaman doğrusal değildir. Çizelge 3.3'teki verilere göre Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta yerleşme zamanı, γ 'nın 0.3'ten 1'e yükselmesi ile düşmekte, 1'den 10'a artması ile de tekrar yükselmektedir. Benzer olarak, γ 'nın 0.3'ten 1'e yükselmesi ile sistem çıkışında oluşan hatanın RMS değeri her iki denetleyici için de düşüşe geçmekte ardından γ 'nın artması ile tekrar yükselişe geçmektedir.

Kritik sönümlü sanal test sisteminde yapılan denetim çalışmaları, sistem üzerinde farklı γ değerleri ile deneme yaparak, ideal γ uyarlama hızı katsayısı aralığını zor olduğunu göstermektedir. Uyarlama hızındaki artış, bazı denetim performans parametrelerinde iyileşme sağlarken bazılarında kötüleşmeye sebep olmaktadır. Üstelik uyarlama hızındaki artış aynı denetim performans parametresi için bazen iyileşmeye, bazen de kötüleşmeye sebep

olmaktadır. Bu bölümde, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC incelenmiştir. Bulanık tabanlı kazanç düzenleme ile ideal γ 'nın tespiti için sistemde art arda deneme yapmaya gerek kalmaz. Bununla birlikte, γ değerinin bulanık bir şekilde değişken olması, MRAC'ın denetim probleminin farklı ihtiyaçlarını da karşılayabilmesini sağlar (Shahgholian vd. 2016). Örneğin, Şekil 3.6'da denetimin 0. saniyesinde referans girişin değerinin 0.5'e yükselmesi ile γ değeri 0.3 olan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde sistem çıkışının referans model çıkışına sırasıyla 23 ve 24 saniye sonra yakınsadığı görülmektedir. γ değeri 10 olduğunda ise MRAC'ın hızlı tepkisi ile aşım oluşmakta ve sistem çıkışı referans modele yakınsamaktadır. Buna karşılık denetimin 80. saniyesinde dış bozucu etkisi altındaki sistemin referans giriş işareti değiştirildiğinde, uyarlama hızının yüksek olduğu durumlarda sistem çıkışının salınımına girme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Oysaki bu durumda uyarlama hızı yavaş seçildiğinde sistem çıkışının salınım yapmadan referans girişe yakınsadığı gözlemlenmektedir. Yapılan çalışmalar, bir denetleme sürecinde karşılaşılan farklı koşullar için MRAC'ın farklı γ uyarlama hızı katsayısına sahip olmasının denetim performansını artıracaklarını göstermektedir.

Referans model çıkışı ile sistem çıkışı arasındaki fark büyük ise γ değeri de büyük olmalıdır. Böylece θ uyarlaması hızlı olur. Bu sayede sistem çıkışının referans model çıkışına yakınsaması için gerekli olan denetim işareti de hızlı bir şekilde üretilir. Denetim işareti etkisiyle sistem çıkış işareti y_p , referans model çıkışı y_m 'e yakınsamaya başladığında, denetim probleminde farklı bir evreye geçilmiştir. Hata hala büyüktür ancak azalmaktadır. Bu durumda uyarlama hızının bir önceki evrede olduğu gibi büyük olması, θ değerlerinin hızlı biçimde uyarlanmaya devam etmesini sağlar. Böylece denetim işareti de hatayı düşürme yönünde yükselmeye devam eder. Bu durumda, **Çizelge 3.3**'te γ 10 olduğunda gözlemlenen büyük genlikli aşımalarla karşılaşılır. Oysaki hata büyük olsa dahi azalmaya başladıysa artık denetim altına girmeye başlamıştır. Bu durumda uyarlama hızı azaltılarak θ 'ların uyarlaması yavaşlatılmalı ve denetim işareti değerinin artış hızı yavaşlatılmalıdır. Benzer şekilde y_p ile y_m arasındaki hata değeri küçük olduğunda, uyarlama hızı o kadar küçük olmalıdır ki, denetleme sırasında oluşacak küçük hatalar, θ 'ların yavaş uyarlaması ile üretilen ve değerinde ani değişimler bulunmayan denetim işareti ile giderilmelidir. Hatanın büyük olduğu durumdaki gibi hatanın küçük olduğu durumda da hata değişim hızı γ değerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Bir denetim probleminde hata değeri küçük olabilir ancak sisteme uygulanan ani bozucu etkiler, ilk anda küçük hatalar oluştursa da uygun uyarlama sağlanamadığında hata değeri zamanla artar. Bu sebeple, hatanın zamana göre değişimi arttığında γ değerinin de

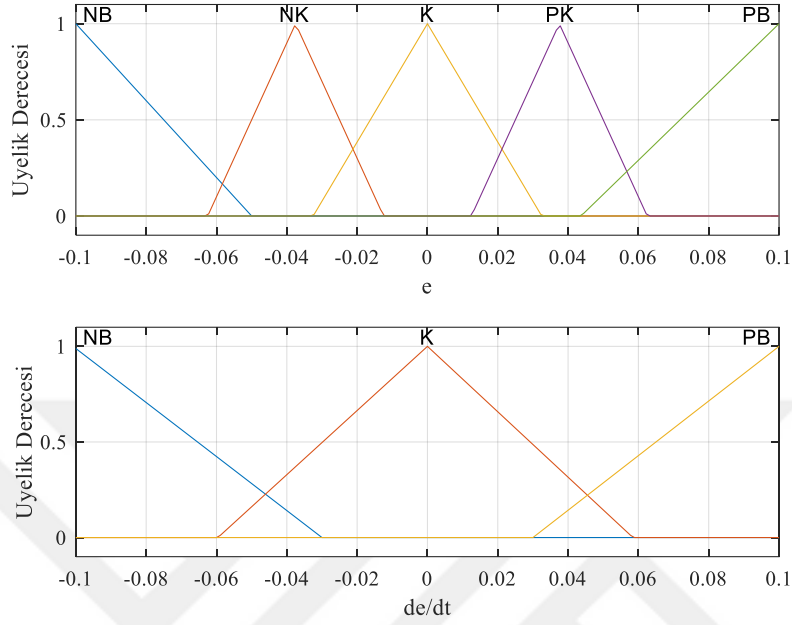
artması gerekir. Böylece uyarlama hızı da artar ve y_p 'yi y_m 'e yakınsatacak denetim işareti hızlı bir şekilde üretilir.

MRAC, sistemin matematik modelinin kesin olarak bilinmediği durumlarda kullanılan, modele dayalı olmayan bir denetleyicidir. Bir önceki paragrafta yapılan tanımlamalar ve verilen örneklerde kullanılan, hızlı, yavaş, büyük, küçük gibi ifadeler de matematik modelin kesin olarak bilinmediği durumlarda kullanılır. Bu gibi söylemler, bulanık kümelerin oluşturulması aşamasındaki süreçlerle uyumaktadır. Şekil 3.6'daki sonuçlar da γ değerinin farklı koşullar için değişkenlik göstermesinin denetim performansını artıracağı yönde bizi cesaretlendirmektedir. Burada sistemin matematik modeli kesin olarak bilinmediğinden ve yapılan test sonuçları, sayısal ifadelerin birbirleriyle ile orantıları, miktarlarının büyük veya küçük olması ile yorumlandığından ötürü de γ 'nın bulanık kurallar ile tespiti uygun görülmektedir.

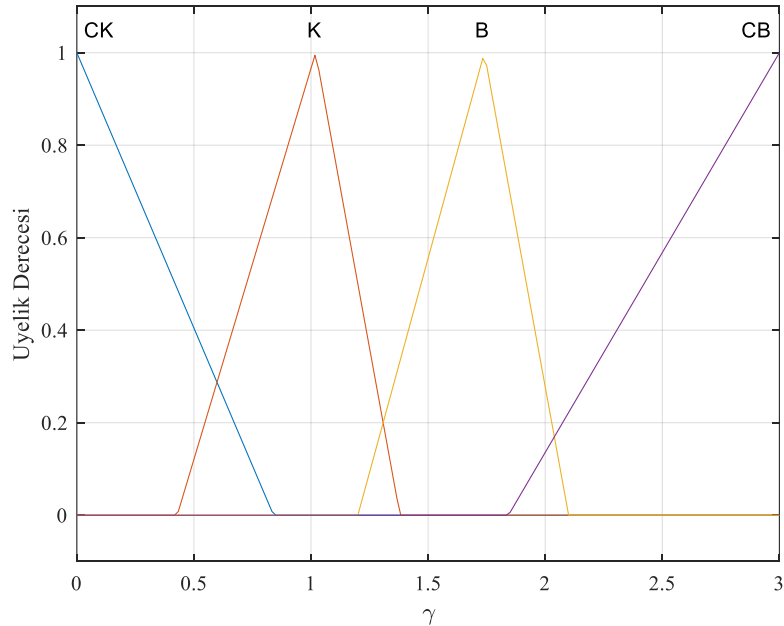
Kritik sönümlü sanal test sisteminde yapılan çalışmalar, uyarlama hızının tespiti için iki önemli parametre olduğunu gösterir. Bunlar y_p ve y_m arasındaki hata ve bu hatanın zamana göre değişim hızıdır. Bu değerler, MRAC'ın bulanık tabanlı kazanç düzenlemesi için bulanık giriş kümelerini oluşturur. Bulanık kümeler, giriş değerlerindeki değişimlere hızlı tepki vermesi bakımından üçgen formunda seçilmektedir. Bu bilgilere göre Bölüm 3.2'de tanımlanan kritik sönümlü sanal test sistemini denetlemek amacıyla tasarlanan MRAC'ın bulanık tabanlı kazanç düzenlemesini yapmak için, Şekil 3.19'daki giriş üyelik fonksiyonları ve Şekil 3.20'deki çıkış üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Bulanık kazanç düzenleme kurallarının birinci girişi y_p ve y_m arasındaki hata, ikinci girişi de bu hatanın zamana göre değişimi olarak ifade edilmektedir.

Hatayı ifade eden giriş üyelik fonksiyonlarında eğer hata değeri, ± 0.032 değerleri arasında ise, üyelik fonksiyonu küçük olarak tanımlanmıştır. Hata değeri, 0.012 ile 0.063 arasında ise üyelik fonksiyonu pozitif küçük olarak tanımlanmıştır. Hata değeri 0.044 değerinden büyükse, üyelik fonksiyonu pozitif büyük olarak tanımlanmıştır. Hatanın -0.012 ile -0.063 arasında olması durumunda üyelik fonksiyonu negatif küçük, hatanın -0.05'den küçük olması durumunda ise üyelik fonksiyonu negatif büyük olarak tanımlanmıştır. Hatanın zamana göre değişimini ifade eden üyelik fonksiyonlarında eğer hatanın zamana göre değişimi ± 0.059 arasında ise üyelik fonksiyonu küçük olarak tanımlanmıştır. Hatanın zamana göre değişimi 0.03'ten büyükse

üyelik fonksiyonu pozitif büyük, -0.03'ten küçükse üyelik fonksiyonu negatif büyük olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.19 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı giriş üyelik fonksiyonları.



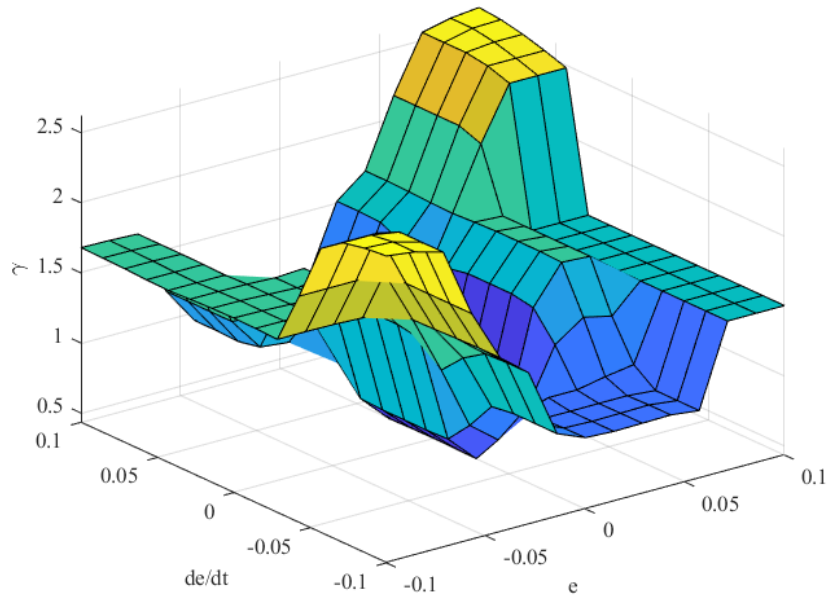
Şekil 3.20 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı çıkış üyelik fonksiyonları.

MRAC'ın uyarılma hızının bulanık tabanlı değişimi için 4 adet çıkış üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Şekil 3.20'deki çıkış üyelik fonksiyonları, γ 'ın 0 ile 0.85 arasındaki değerleri

için çok küçük, 0.42 ile 1.38 arasındaki değerleri için küçük, 1.2 ile 2.1 arasındaki değerleri için büyük ve 1.83'ten büyük değerleri için çok büyük olarak tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları kullanılarak **Çizelge 3.4**'teki kural tablosu oluşturulmuştur. Kural tablosuna göre giriş ve çıkış ilişkisini gösteren bulanık karar grafiği Şekil 3.21'de verilmiştir.

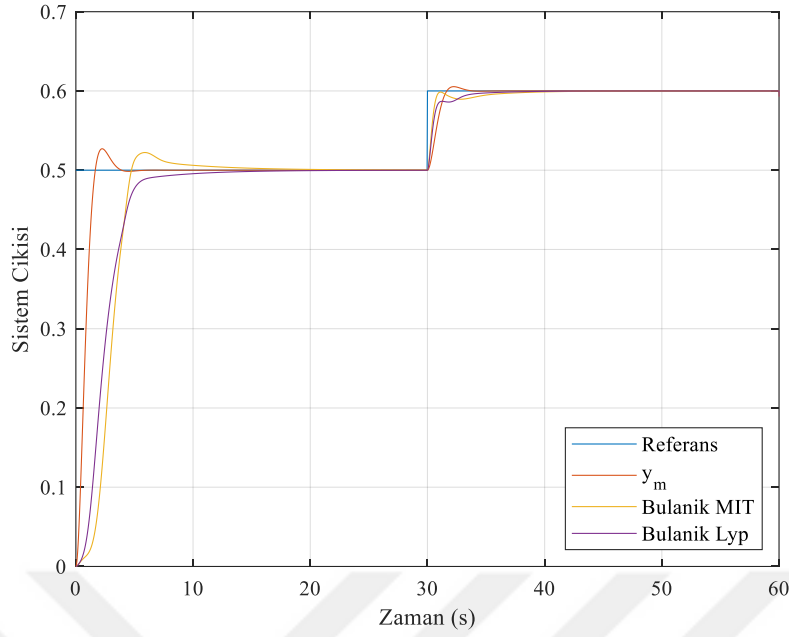
Çizelge 3.4 Bulanık γ düzenlemesi kuralları.

Kural No	e	İşlem	$\frac{de}{dt}$	Sonuç
1	NB	VE	NB	CB
2	PB	VE	PB	CB
3	NK	VE	NB	B
4	NB	VE	PB	B
5	NB	VE	K	B
6	NK	VE	K	B
7	NK	VE	K	K
8	PK	VE	K	K
9	NB	VE	PB	B
10	PB	VE	NB	B
11	NK	VE	PB	K
12	PK	VE	NB	K
13	K	VE	NB	K
14	K	VE	PB	K
15	K	VE	K	CK



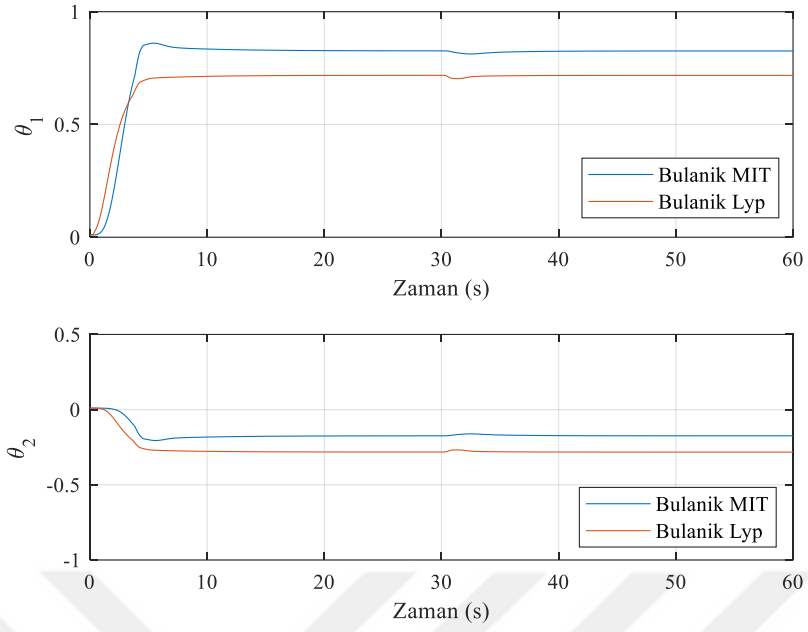
Şekil 3.21 Bulanık γ tespiti karar mekanizması.

Eşitlik (3.10)'da transfer fonksiyonu verilen kritik sönümlü sistemin denetimi, γ uyarlama hızı katsayısının bulanık tabanlı tespit edildiği MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılmıştır. Denetim sonuçları, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25'de görülmektedir. Şekillerdeki verilere göre denetimin başladığı anda referans değerinin 0.5'e yükselmesinin ardından referans model çıkış değerinin 0.5'e doğru yakınsamaya başladığı görülmektedir. Referans model ile sistem çıkışı arasındaki hata artmaya başlayınca bulanık karar alma mekanizması, MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın her ikisinde de γ değerini ani olarak yükseltmiştir. MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'larda denetimin 0.15. saniyesinde γ 1.5'e yükselmiştir. γ değerinin yükselmesi ile θ uyarlaması da hızlanarak y_p 'nin y_m 'e yakınsaması için gerekli olan denetim işaretini üretmiştir. Denetimin 0.39. saniyesinde γ , 2.1 değerine yükselerek uyarlama parametrelerinin birim zamandaki değer değişimini artırmıştır. Bu süre zarfında, referans model çıkışı da giderek artmaktadır. Denetimin 0.42. saniyesinde γ değeri 1.5'e eşitlenerek θ uyarlamasına devam edilmektedir. Bu andan sonra y_p ve y_m arasındaki hatanın da giderek artmaya başlamasıyla θ değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Uyarlama parametreleri denetimin 4.5. saniyesinde ideal değerine yakınsayarak uygun denetim işaretinin üretilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte de denetimin 7.8. saniyesinde MIT, 6.25. saniyesinde de Lyapunov kuralı tabanlı MRAC sistem çıkışını referans giriş değerine yakınsatmıştır. Denetimin başlangıcındaki denetim performansları incelendiğinde, MIT kuralı tabanlı MRAC için yükselme zamanı 2.56 saniye, yerleşme zamanı 7.83 saniye, aşım miktarı %4.46, sistem çıkışındaki hatanın RMS değeri de %14.06 olarak tespit edilmiştir. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde ise yükselme zamanı 3.30 saniye, yerleşme zamanı 6.21 saniye, aşım miktarı %0, sistem çıkışındaki hatanın RMS değeri de %12.032 olarak tespit edilmiştir.

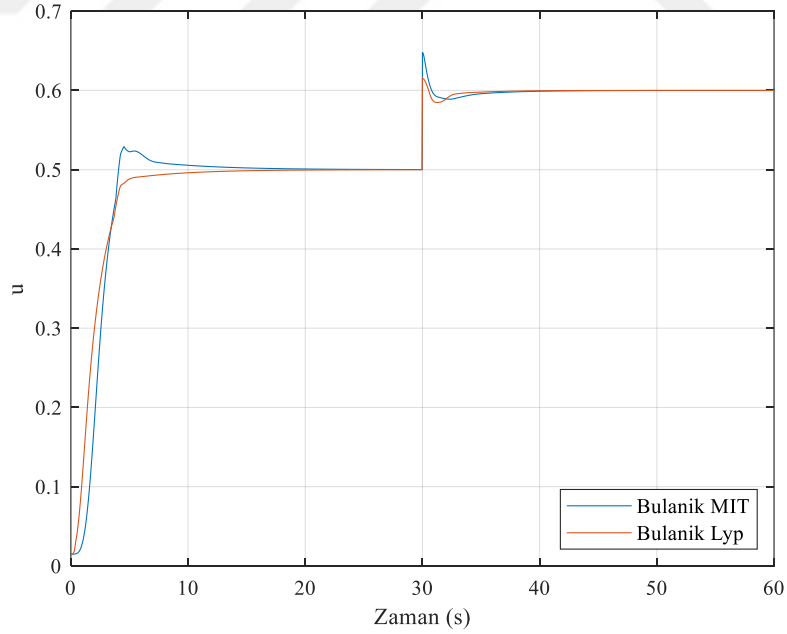


Şekil 3.22 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde sistem çıkışları.

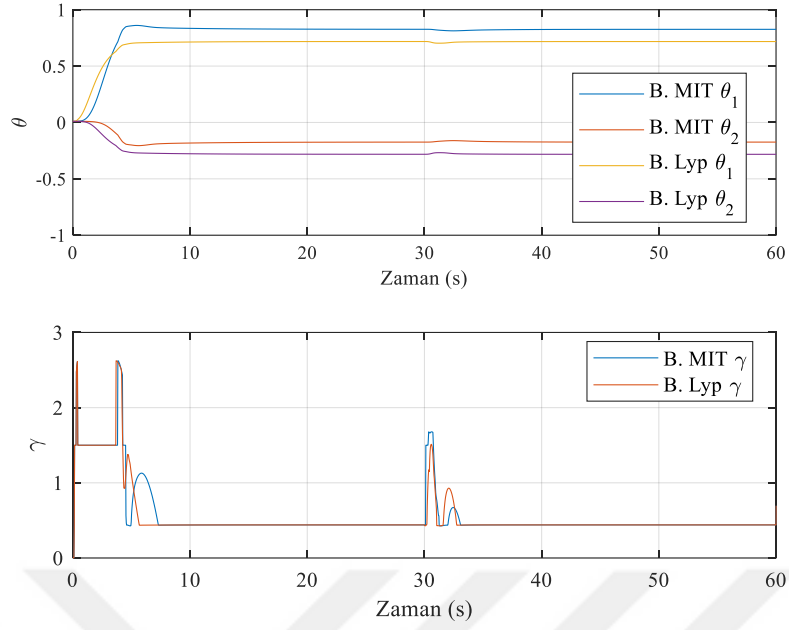
Denetimin 30. saniyesindeki referans giriş işaretinin 0.5'ten 0.6'ya yükseltilmesi neticesinde bulanık karar alma mekanizması, γ değerini MIT kuralı tabanlı MRAC için 0.43'ten 1.67'ye, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 0.43'ten 1.51'e yükseltmiştir. Bu durum uyarılama hızının tekrar artarak sistemi referans girişe yakınsatmaya yönelik denetim işaretinin üretilme sürecini hızlandırmıştır. Denetimin 30. saniyesindeki referans giriş artışı sonrasında, MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde yükselme zamanı 0.60 saniye, yerleşme zamanı 8.21 saniye, aşım %0 ve sistem hatasının RMS değeri %1.01 olarak belirlenmiştir. Bu durumdaki Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde ise yükselme zamanı 2.45 saniye, yerleşme zamanı 5.78 saniye, aşım %0 ve sistem hatasının RMS değeri %1.11 olarak tespit edilmiştir. Her iki MRAC'ta da uyarılama parametreleri 30. saniyeden 32. saniyeye kadar geçen sürede ideal değerine yakınsamıştır.



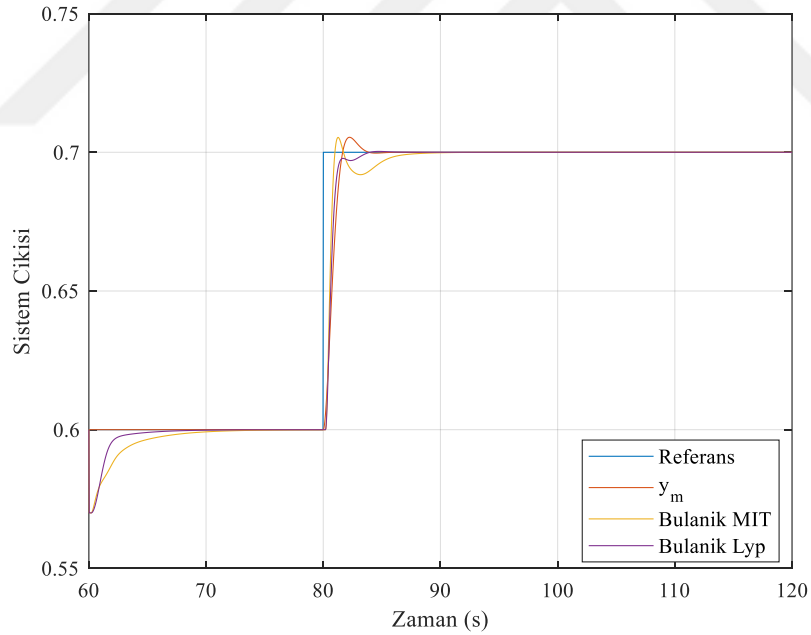
Şekil 3.23 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde θ uyarlaması.



Şekil 3.24 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde denetim işareti.



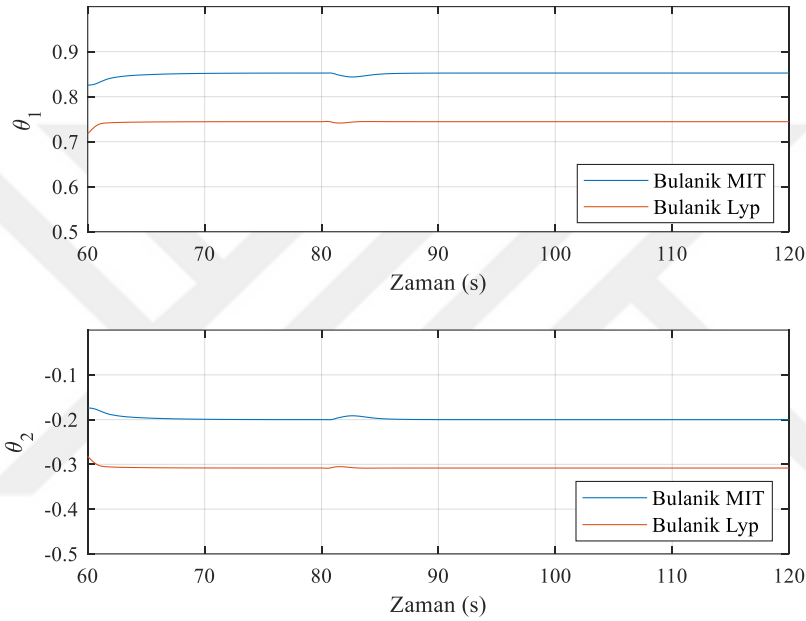
Şekil 3.25 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde γ 'nın θ uyarlaması hızına etkisi.



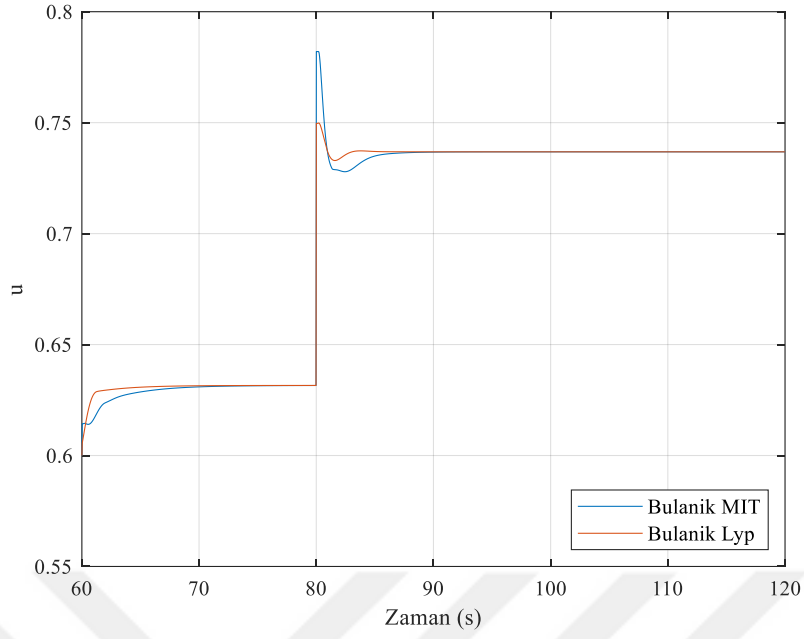
Şekil 3.26 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde sistem çıkışları.

Denetimin 60. saniyesinde sisteme dış bozucu uygulanmasının ardından, artık eski dinamik davranışını sergilemeyen sistemin referans giriş işareti 0.6'dan 0.7'ye yükseltilmiştir. Bu durumda bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetim sonuçları Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da bulunmaktadır. Denetimin 80.

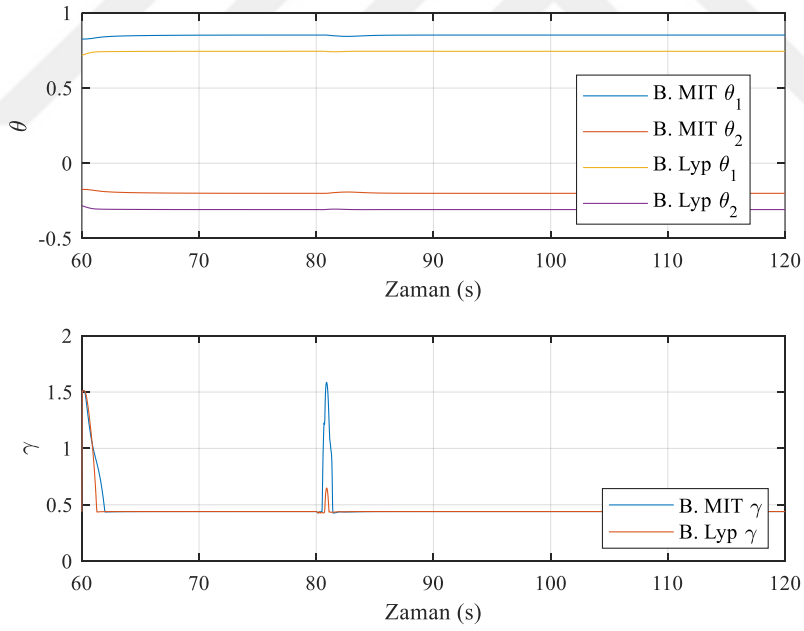
saniyesinde referans model 0.6'dan 0.7'ye yükseldiğinde γ uyarlama hızı katsayısı, MIT kuralı tabanlı MRAC için 80.5. saniyede 0.44'ten 1.59'a yükselmiş, sistemin yakınsamasının ardından 81.43. saniyede tekrar 0.44 değerine düşmüştür. Benzer şekilde Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın γ uyarlama hızı katsayısı değeri de 80.7. saniyede 0.43 değerinden 0.65'e yükselmiş, sistemin yakınsamasının ardından 81.09. saniyede tekrar 0.43 değerine düşmüştür. Uyarlama parametreleri de bu kısa uyarlama hızı artışı süresinde daha hızlı yakınsayarak ideal denetim işareti üretimini sağlamışlardır.



Şekil 3.27 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde θ uyarlaması.

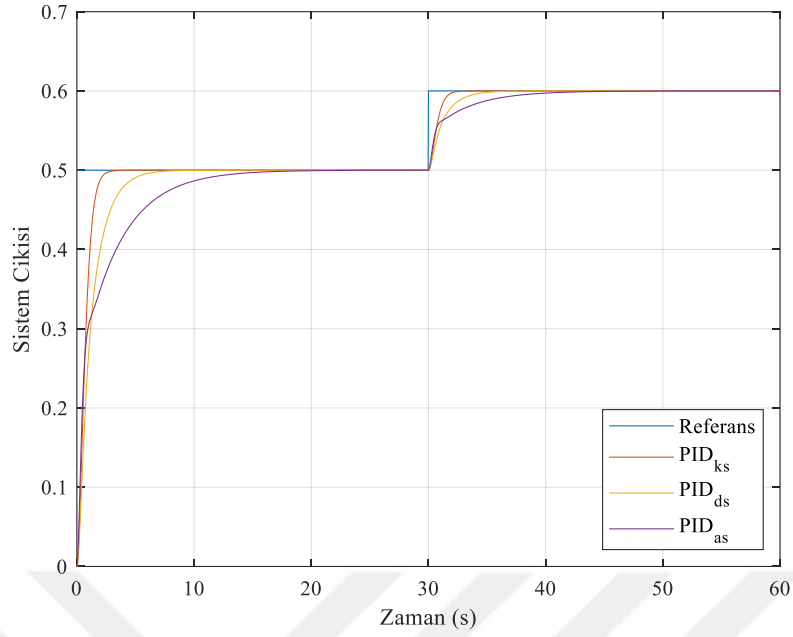


Şekil 3.28 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde denetim işareti.



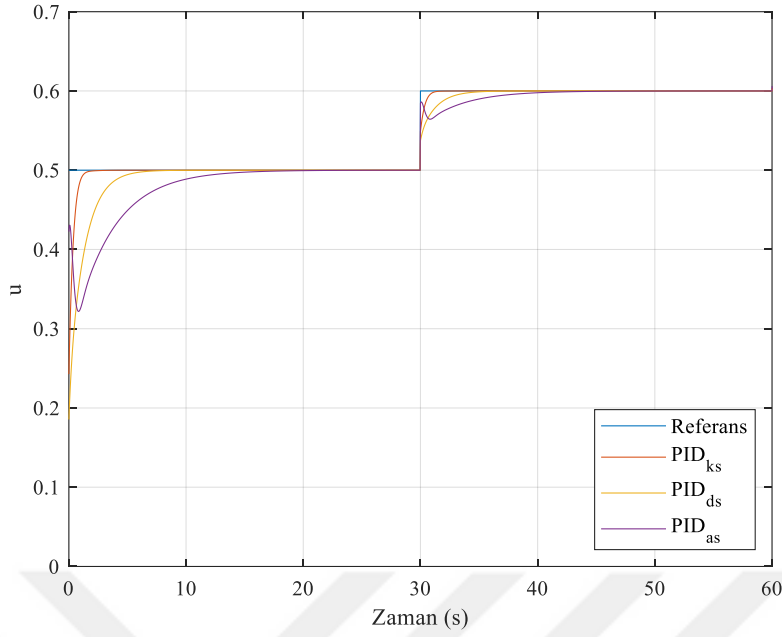
Şekil 3.29 Kritik sönümlü sistemin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminde, dış bozucu bölgesinde γ 'nın θ uyarlama hızına etkisi.

Dış bozucu bölgesindeki bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde yükselme zamanı 0.53 saniye, yerleşme zamanı 5.71 saniye, aşım değeri %5.37 ve sistem hatasının RMS değeri %1.09 olarak tespit edilmiştir. Aynı koşullarda bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde yükselme zamanı 0.78 saniye, yerleşme zamanı 2.97 saniye, aşım değeri %1.14 ve sistem hatasının RMS değeri %1.14 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, MRAC'ın demir üretim süreçlerindeki kullanımı amaçlanmıştır. Endüstriyel tesislerde olduğu gibi demir üretim tesislerinde de PID denetleyiciler sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmanın çıktılarından biri de MRAC'ın demir üretim tesislerinde PID'ye göre denetim performansını karşılaştırmak olduğu için, simülasyon çalışmalarında da bu iki denetleyici yaklaşımının kıyaslaması yapılmıştır. Kıyaslama, Eşitlik (3.10), (3.11) ve (3.12) ile ifade edilen kritik sönümlü, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü sistemlerin, geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetim sonuçları ve PID denetim sonuçları arasında yapılmaktadır. Bu kapsamdaki MRAC denetleyiciler için bir tane referans model belirlenmiştir. Bu referans model ile tasarlanan MRAC'lardan beklenen, her 3 sistemin de aynı denetim isterleri ile denetlenmesini sağlamaktır. Bu sayede, tek bir MRAC tasarımının, sistemin dinamik davranışının değişmesi durumunda nasıl bir denetim sağlayacağı tespit edilmiştir. Bunun aksine her 3 sistem için de ayrı ayrı PID denetleyici tasarımı yapılmıştır. **Çizelge 3.2'**de katsayıları bulunan PID denetleyiciler sadece ilgili oldukları sistemi değil, diğer karakterdeki sistemi de denetlemiştir. Bu sayede, örneğin kritik sönümlü bir sistem için tasarlanmış olan PID denetleyicinin, sistem davranışı, dış etkenler sebebiyle aşırı sönümlü duruma geçtiğinde, aynı sistemdeki denetim performansı hakkında bilgi edinilmiştir. Buna göre kritik sönümlü sistemin 3 farklı karakterdeki PID denetleyici tarafından denetimi neticesinde elde edilen sonuçlar, Şekil 3.30'da bulunmaktadır.



Şekil 3.30 Kritik sönümlü sistemin, kritik sönümlü, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü PID ile denetiminde sistem çıkışları.

Şekil 3.30'daki denetim sonuçlarında, beklendiği gibi kritik sönümlü sistem için tasarlanmış olan PID denetleyicinin en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Denetimin 0. Saniyesinde referans girişin 0'dan 0.5'e yükselmesinin ardından kritik sönümlü sistem için tasarlanan PID denetiminde yükselme zamanı 1.21 saniye, yerleşme zamanı 2.07 saniye, aşım %0 ve sistem hatasının RMS değeri %2.06 olarak tespit edilmiştir. Denetimin 30. Saniyesinde referans giriş işaretinin 0.5'ten 0.6'ya yükseltilmesi ile kritik sönümlü sistem için tasarlanan PID denetiminde, yükselme zamanı 1.21 saniye, yerleşme zamanı 2.07 saniye, aşım %0 ve sistem hatasının RMS değeri %1.29 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.31 Kritik sönümlü sistemin, kritik sönümlü, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü PID ile denetiminde, dış bozucu bölgesi sistem çıkışları.

Şekil 3.31’de sistemin dış bozucu etkisi altına girdikten sonraki süreçte PID ile denetiminden elde edilen veriler bulunmaktadır. Buna göre denetimin 80. Saniyesinde referans giriş işareti 0.6’dan 0.7’ye yükseltildiğinde kritik sönümlü sistem için tasarlanan PID denetiminde, yükselme zamanı 0.75 saniye, yerleşme zamanı 4.63 saniye, aşım %23.81 ve sistem hatasının RMS değeri %1.49 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ların kritik sönümlü sanal test sistemi denetimi neticesinde açığa çıkan denetim performansı parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler, farklı γ değeri değişimi ile birlikte değişmektedir. Şekillerdeki veriler incelendiğinde, kritik sönümlü sistem için ideal γ değer aralığı tespitinin zor olduğu görülmektedir. Bazı parametrelerin minimum değeri γ ’nın 0.7’den küçük olduğu durumlar için oluşurken, bazı parametrelerin minimum değerine yakınsaması için γ ’nın 10 olması gerekmektedir. Uyarılama hızı tespitinde yaşanan bu belirsizlik ile başa çıkmak için, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetleyiciler tasarlanmıştır. Bu denetleyiciler ve üç farklı karakterdeki PID denetleyici ile kritik sönümlü sanal test sisteminin denetimi yapılmıştır. Denetim sonucunda elde edilen denetim performans parametreleri **Çizelge 3.5**’te görülmektedir.

Çizelge 3.5 Kritik sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.

	Bulanık MIT	Bulanık Lyapunov	PID _{ks}	PID _{ds}	PID _{as}
Yükselme Zamanı - 1	2.557	3.300	1.208	2.615	5.485
Yükselme Zamanı - 2	0.604	2.452	1.208	2.615	5.487
Yükselme Zamanı - 3	0.525	0.777	0.750	1.540	4.911
Yerleşme Zamanı - 1	7.826	6.205	2.073	4.914	10.997
Yerleşme Zamanı - 2	8.207	5.785	2.071	4.912	10.997
Yerleşme Zamanı - 3	5.710	2.968	4.629	3.535	10.624
En Yüksek Aşım - 1	4.461	0	0	0	0
En Yüksek Aşım - 2	0	0	0	0	0
En Yüksek Aşım - 3	5.365	0.320	23.805	0	0
Hata RMS - 1	14.06	12.32	4.29	6.43	7.78
Hata RMS - 2	1.01	1.114	1.285	0.858	1.556
Hata RMS - 3	1.093	1.144	1.491	3.628	1.565
u standart sapma - 1	11.89	9.78	2.06	3.26	4.18
u standart sapma - 2	0.552	0.34	0.412	0.547	0.837
u standart sapma - 3	0.603	0.340	0.698	0.680	0.734

Çizelge 3.5'teki veriler, kritik sönümlü sanal test sistemi denetiminin 0 ile 30. Saniyeleri arasını ifade eden birinci bölüm, 30 ile 60. Saniyeler arasını ifade eden ikinci bölüm ve 80 ile 120. Saniyeler arasını ifade eden üçüncü bölüm verilerini içermektedir. Her bölüm için bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, kritik sönümlü sistem için tasarlanmış olan PID denetleyici, düşük sönümlü sistem için tasarlanmış olan PID denetleyici ve aşırı sönümlü sistem için tasarlanmış olan PID denetleyicinin denetim performans parametrelerini içermektedir. Çizelgedeki verilere göre kritik sönümlü sistem için en uygun denetleyiciyi ilk bakışta tespit etmek kolay değildir. Denetim isterleri ile performans parametrelerinin uyumu incelenerek ve performans parametrelerinin birbirleri ile kıyaslanması yapılarak en uygun denetleyici tespit edilebilir. Çizelgedeki veriler yükselme zamanı bakımından incelendiğinde PID_{ks} denetimin her üç bölümünde de denetim isterini karşılamaktadır. Diğer PID'ler denetimin her üç bölümünde de isterleri karşılayamamaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'lar ise denetimin ilk bölümünde uyarılama yeni başladığı için isterleri karşılayamamıştır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, denetimin ikinci ve üçüncü bölümünde, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise denetimin son bölümünde yükselme zamanı isterini karşılamaktadır. Çizelgedeki veriler yerleşme zamanı bakımından

incelendiğinde denetimin ilk iki bölümünde PID_{ks} , denetim isterini karşılamakta, denetimin son bölümünde ise bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetim isterini karşılamaktadır. Diğer denetleyiciler yerleşme zamanı isterinin 3 ila 5 katı oranda yüksek yerleşme zamanı değeri oluşturmuştur. Bütün denetleyiciler denetimin ilk ve ikinci bölümlerinde en yüksek aşım isterini sağlamıştır. Denetimin son bölümünde ise PID_{ks} , %23.81 büyüklüğünde aşım oluşturmuştur. Diğer tüm denetleyiciler, denetim isterini sağlamıştır. Bu ana kadarki incelemeler bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın kritik sönümlü sistemin denetimi için en uygun denetleyici olduğunu işaret etmektedir. Bu denetleyici, RMS hata ve denetim işaretinin standart sapması değerleri ile de diğer denetleyicilerin önüne geçmektedir.

Kritik sönümlü sanal test sisteminde yapılan denetim çalışmasının benzeri, düşük sönümlü ve aşırı sönümlü sistemler için de yapılmıştır. Denetim çalışmaları neticesinde elde edilen veriler **Çizelge 3.6** ve **Çizelge 3.7**'de bulunmaktadır.

Çizelge 3.6 Düşük sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.

	Bulanık MIT	Bulanık Lyapunov	PID_{ks}	PID_{ds}	PID_{as}
Yükselme Zamanı - 1	2.179	2.661	0.958	1.457	4.868
Yükselme Zamanı - 2	0.759	0.924	0.958	1.457	4.871
Yükselme Zamanı - 3	0.729	0.887	0.939	1.223	1.069
Yerleşme Zamanı - 1	6.854	7.530	9.905	5.481	10.884
Yerleşme Zamanı - 2	8.587	5.314	9.903	5.479	10.884
Yerleşme Zamanı - 3	5.999	5.973	39.897	10.497	11.652
En Yüksek Aşım - 1	9.136	0	26.799	1.486	0
En Yüksek Aşım - 2	20.778	15.651	26.8	2.456	0
En Yüksek Aşım - 3	29.085	26.45	67.37	22.33	2.58
Hata RMS - 1	14.594	12.781	8.170	3.652	8.376
Hata RMS - 2	1.339	1.392	1.632	0.729	1.674
Hata RMS - 3	1.383	1.448	3.114	3.673	1.729
u standart sapma - 1	11.657	9.462	3.583	4.748	3.978
u standart sapma - 2	0.830	0.337	0.715	0.835	0.796
u standart sapma - 3	0.829	0.516	3.889	2.754	0.827

Düşük sönümlü sanal test sistemi üzerinde yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan **Çizelge 3.6**'daki veriler, yükselme zamanı bakımından incelendiğinde, PID_{as} haricindeki bütün denetleyicilerin denetim isterini karşıladığı görülmektedir. Veriler yerleşme zamanı

bakımından incelendiğinde PID_{ds} 'nin denetimin ilk iki bölümünde isteri karşıladığı görülmektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, denetimin ikinci ve üçüncü bölümlerinde isteri karşılarken, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, denetimin son bölümünde isteri sağlamaktadır. PID_{as} denetim süresi boyunca en yüksek aşım isterini karşılarken, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC sadece denetimin ilk bölümünde bu isteri karşılamaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, denetimin ilk bölümünde henüz uyarlama parametreleri başlangıç koşulunda olduğu için hata RMS ve denetim işareti standart sapma değerleri bakımından geride kalsa da denetimin ikinci ve üçüncü bölümündeki en başarılı denetleyici olmuştur. Bu incelemelerin ardından düşük sönümlü sistemin denetimi için en uygun denetleyicinin bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.7 Aşırı sönümlü sanal test sistemi denetiminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov ve PID kullanımı sonucunda oluşan denetim performans parametreleri.

	Bulanık MIT	Bulanık Lyapunov	PID_{ks}	PID_{ds}	PID_{as}
Yükselme Zamanı - 1	2.699	2.994	2.169	1.172	1.249
Yükselme Zamanı - 2	1.528	1.7706	2.169	0.915	0.509
Yükselme Zamanı - 3	1.367	1.445	1.949	0.429	0.398
Yerleşme Zamanı - 1	13.689	9.126	11.012	10.753	30.00
Yerleşme Zamanı - 2	8.854	10.046	11.011	14.343	29
Yerleşme Zamanı - 3	8.377	10.201	15.896	30	30
En Yüksek Aşım - 1	18.998	7.720	17.341	43.597	61.98
En Yüksek Aşım - 2	4.759	16.495	17.343	16.804	150
En Yüksek Aşım - 3	14.970	35.891	31.082	171	212
Hata RMS - 1	16.127	14.349	10.635	9.801	16.873
Hata RMS - 2	1.529	1.706	2.126	1.959	11.75
Hata RMS - 3	1.523	1.774	2.179	1.908	25.1
u standart sapma - 1	12.684	9.796	18.31	12.452	9.992
u standart sapma - 2	1.311	1.073	3.653	2.949	1.997
u standart sapma - 3	1.401	1.881	41.29	35.32	2.513

Aşırı sönümlü sanal test sistemi üzerinde yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan **Çizelge 3.7**'deki veriler, yükselme zamanı bakımından incelendiğinde PID_{ds} ve PID_{as} 'nin denetim boyunca isteri sağladığı görülmektedir. Diğer denetleyiciler denetimin ilk bölümünde yavaş kalsa da denetimin ikinci ve üçüncü bölümlerinde isteri sağlamaktadırlar. Denetimin ilk bölümünde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC en iyi

performansı sergilerken, denetimin ikinci ve üçüncü bölgelerinde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC diğerlerinden öne geçmiştir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetimin ilk bölümünde en düşük aşımı oluştururken, ikinci ve üçüncü bölümlerde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC en düşük aşım değerini oluşturmaktadır. Denetimin ilk bölümünde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'lar RMS hata bakımından PID_{ds} 'nin gerisinde kalsa da gerekli uyarlamanın sağlanmasının ardından denetimin ikinci ve üçüncü bölümünde her iki MRAC da PID'lerden daha düşük hata üretmiştir. En küçük denetim işareti standart sapma değeri denetimin birinci ve ikinci bölümlerinde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC tarafından üretilmektedir. Denetimin son bölümünde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, en küçük denetim işareti standart sapma değerini üretmektedir.

Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'deki verilerin incelenmesinin ardından, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın PID denetleyiciler karşısında daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu iki MRAC da arasında değerlendirildiğinde, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın daha iyi denetim performansı ürettiği görülmektedir.

BÖLÜM 4

SERVO VALF TEMELLİ DENEY DÜZENEGİ DENETİM ÇALIŞMALARI

Bölüm 3'te farklı dinamik karakterdeki sanal test sistemlerinin, MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve PID ile denetimi ve yapılan denetleme çalışmaları neticesinde elde edilen verilerin analizleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, denetleyicilerin sanal bir ortamdaki denetim performanslarının karşılaştırılmasına imkan vermektedir. Bu bölümde, MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve PID'nin, fiziksel bir sistemin denetiminde göstereceği performansların değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda servo valf temelli bir deney düzeneği oluşturulmuştur.

4.1 SERVO VALF TEMELLİ DENEY DÜZENEGİ TANIM VE TASARIM İSTERLERİ

Servo valf temelli deney düzeneği, bir pnömatrik valf pozisyon denetim problemi olarak tasarlanmıştır. Pnömatrik valf pozisyon denetim sistemi, Şekil 2.2'deki gibi bir kapalı çevrim denetim sistemi olarak tanımlanabilir. Burada sistem, basınçlı hava ile tahrik olan valf ve valfin tahrik mekanizmasına fiziksel olarak bağılı bir pozisyon sensöründen oluşmaktadır. Valfin tahrik mekanizması, iki tarafı da atmosfere kapalı bir diyaframdır. Diyaframın bir tarafına basınçlı hava uygulanarak valfin açılmasını sağlamaktadır. Diyaframın diğer yüzünde ise basınç etkisine karşı direnç uygulayarak valfi sürekli olarak kapatmaya çalışan üç adet çelik yay bulunmaktadır. Valfin pozisyonu, elektriksel denetim işareti üreten bir denetleyici donanım tarafından yapılmaktadır. Denetleyici donanım tarafından üretilen elektriksel denetim işareti, elektrik işaretini basınca çeviren bir işaret dönüştürücü tarafından basınca çevrilir. Valfin üzerinde montajlı bu çevirici tarafından üretilen basınç, valfin tahrik mekanizmasına uygulanarak valfin istenilen yönde hareket etmesi sağlanır.

Deney düzeneğinde kullanılan valf, demir üretim süreçlerinde, basınç ve akış denetiminde kullanılmaktadır. Hızlı hareket kabiliyeti sayesinde kullanıldığı süreçteki akış ve basınç denetiminde önemli bir rol oynayan valfin, deney düzeneğindeki pozisyon denetimi için üç farklı tipte denetleyici tasarımı yapılmıştır. PID denetleyici ile birlikte, geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı

tabanlı MRAC tasarımı, 0.2 saniye yükselme zamanı, 0.3 saniye yerleşme zamanı ve %5 aşım değerlerine göre yapılmıştır. Pozisyon denetim çalışmasında kullanılan valfin pozisyonu 0-90° arasında değişmektedir. Denetleme çalışmalarında 0-90° aralığı 0-1 arasında ölçeklendirilmiştir. Deney çalışmalarında, valf sistemi ve denetleyici ünitenin çalışmaya hazır olmasının ardından, çalışmanın 20. saniyesinde, valf pozisyonu 0° değerini gösterirken, denetim sistemi pozisyon referansı 0°'den 45°'ye yani, 0'dan 0.5'e yükseltilmiştir. Referans girişte yapılan değişikliğe denetleyicilerin verdiği tepkilere göre oluşan sistem çıkışları kaydedilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.2 SERVO VALF POZİSYONU PID DENETİMİ

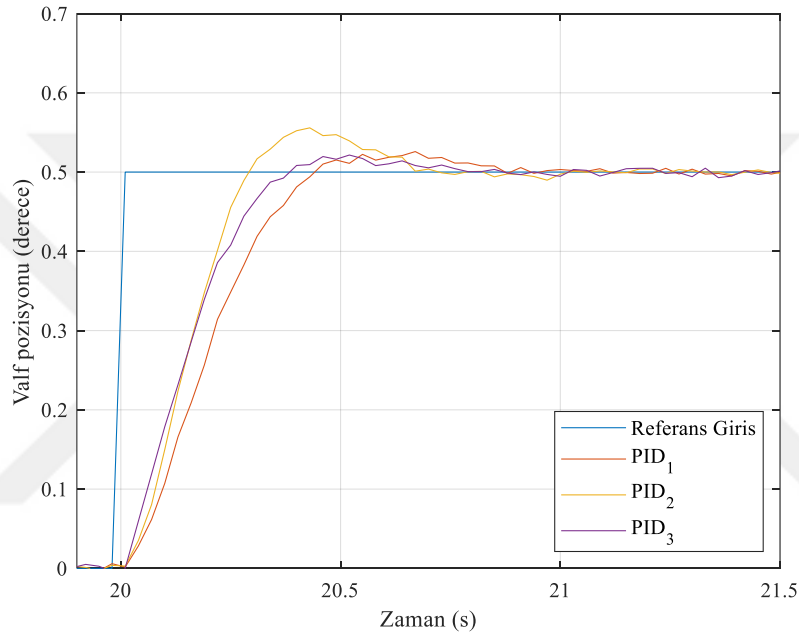
Demir üretim süreçlerindeki PID tasarımı genellikle Ziegler Nichols gibi yaklaşımlara veya tasarımcının o süreçteki tecrübelerine dayalı olarak yapılmaktadır. Bu da tasarlanan denetleyicilerin kişiden kişiye değişiklik göstereceği anlamına gelmektedir. Bir denetim probleminin çözümünde farklı tasarımcılar tarafından geliştirilen denetleyicileri ve bu denetleyicilerin denetim performanslarının MRAC ile kıyaslanabilmesi için, servo valf temelli deney düzeneği pozisyon denetimi için, parametreleri **Çizelge 4.1**'de verilen üç adet farklı karakterde denetleyici tasarımı yapılmıştır. Her denetleyici, referans giriş ve sistem çıkışı arasındaki hataya farklı karakterde tepkiler üretmektedir. Tasarım yapılırken denetleyicinin D katsayısı, sistem çıkışında salınıma neden olduğu için bu değer bütün denetleyicilerde 0 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 Sanal test sistemleri için tasarlanan PID denetleyici parametreleri.

Denetleyici Katsayısı	PID ₁	PID ₂	PID ₃
P	0.095	0.12	0.3
I	5.4419	8	7
D	0	0	0

Servo valf temelli deney sistemi pozisyon denetiminde PID kullanımı neticesinde elde edilen veriler, Şekil 4.1'de bulunmaktadır. Tasarımlarındaki farklılıklarından ötürü üç denetleyici de farklı denetim performansları sergilemektedir. Buna göre PID₂, 0.19 saniye ile diğer PID'lerden daha hızlı yükselme zamanı sağlamaktadır. PID₂ yükselme zamanı bakımından hızlı olsa da bu hız aşım miktarına olumsuz yansımaktadır. Denetleyici hızla azalan sistem hatasına gerekli tepkiyi veremediğinden çıkışta %11,16 aşım meydana gelmektedir. Sistemin en yüksek aşım

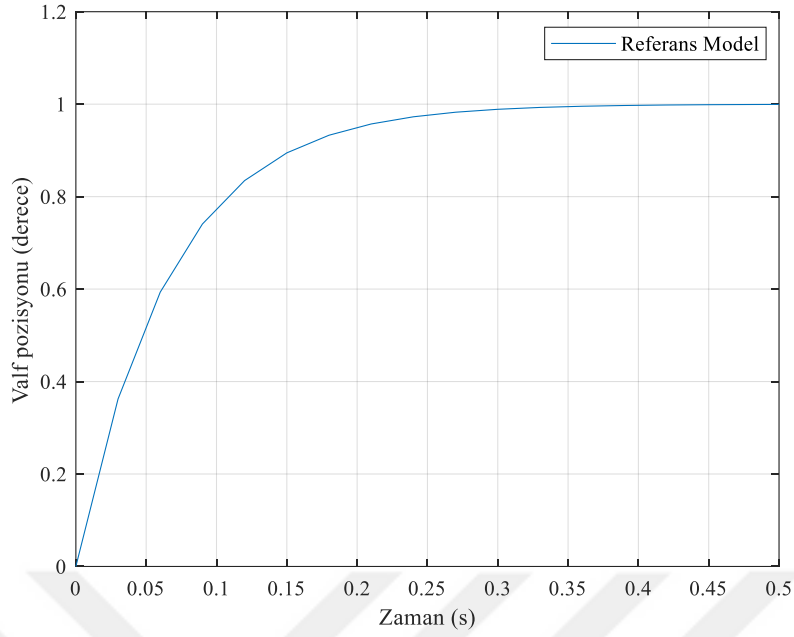
noktasına gelmesinin ardından PID_2 , 0.59 saniyede yerleşme sürecini tamamlayarak denetimi sağlamaktadır. Servo valf pozisyon denetiminde 0.25 saniye ile ikinci en iyi yükselme zamanı değerine sahip olan PID_3 , %4.30 aşım miktarı ve 0.32 saniyelik yerleşme zamanı değerleri ile denetim isterleri için belirlenen limitlere uygun biçimde denetim sağlamaktadır. PID_1 ise yükselme zamanı cinsinden denetim isterlerine uysa da %5.18 aşım değeri oluşturmaktadır. Diğer PID'lere göre daha yavaş denetim sağlayan PID_1 denetimindeki yerleşme zamanı 0.67 saniye ile bu konudaki denetim isterinin %67 fazlası kadardır.



Şekil 4.1 Servo valf pozisyon denetim sistemi PID ile denetiminde sistem çıkışları.

4.3 SERVO VALF POZİSYONU MRAC DENETİMİ

Servo valf temelli deney düzeneğindeki pozisyon denetim probleminin çözümünde MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC kullanımı için tasarlanan referans modelin basamak yanıtı Şekil 4.2'de bulunmaktadır.

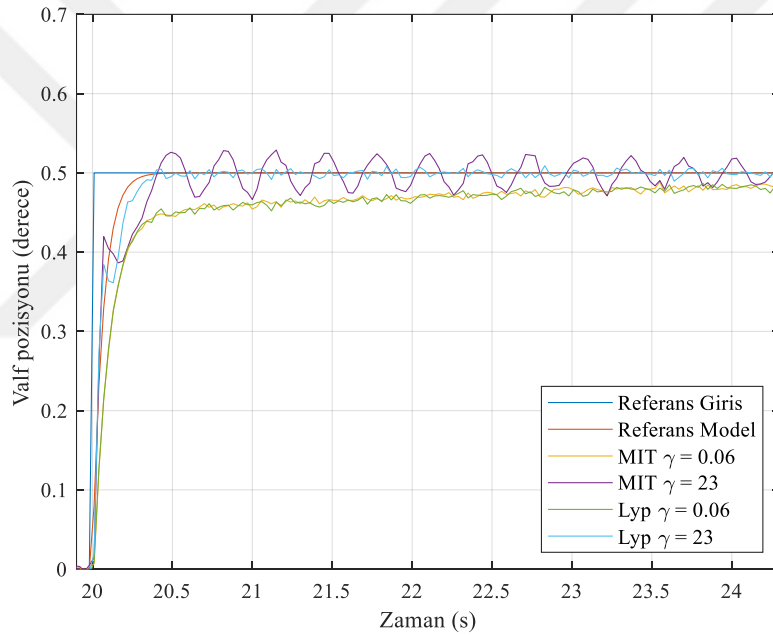


Şekil 4.2 Servo valf pozisyon denetim sistemi MRAC denetiminde kullanılan referans model basamak cevabı.

Basamak yanıtı Şekil 4.2'deki gibi olan referans model kullanılarak tasarlanan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar servo valf pozisyon denetiminde kullanılmıştır. Denetim çalışmalarında kullanılan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar tasarlanırken γ uyarlama hızı katsayısının değeri ilk önce 0.01 olarak seçilmiştir. Ardından sıralı olarak yapılan denetim çalışmalarında γ , 0.01'er artırılarak deney çalışmalarının bitiminde 3000 farklı sonuç elde edilmiştir. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te servo valf pozisyon denetimi çalışmalarından bazılarının sonuçları görülmektedir. Şekillerde, uyarlama hızı yavaş olan MRAC'ları değerlendirmek için γ değeri 0.06, uyarlama hızı yüksek olan MRAC'ları değerlendirmek için de γ değeri 23 olan örnekler yer almaktadır.

Şekil 4.3'te, γ değeri 0.06 seçilerek tasarlanan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların her ikisi ile yapılan denetim neticesinde elde edilen sistem çıkışlarının yerleşme zamanının denetim isterlerini karşılamadığı görülmektedir. MIT kuralı tabanlı MRAC ile yapılan denetim çalışmasında sistem çıkışındaki yakınsama, 3.58 saniyede olurken, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılan denetim sonucundaki yakınsama 4.24 saniyede olmaktadır. Bununla birlikte sistem çıkışları, referans pozisyon işaretinin değişimi ile birlikte değeri artan referans model çıkışına yakınsamakta da sorun yaşamaktadır. Referans model çıkışı 0.15 saniyelik yükselme zamanı değerine sahipken MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar ile yapılan denetim neticesinde oluşan yükselme zamanı verileri 0.53 saniye olup, aşım değerleri de %1'in

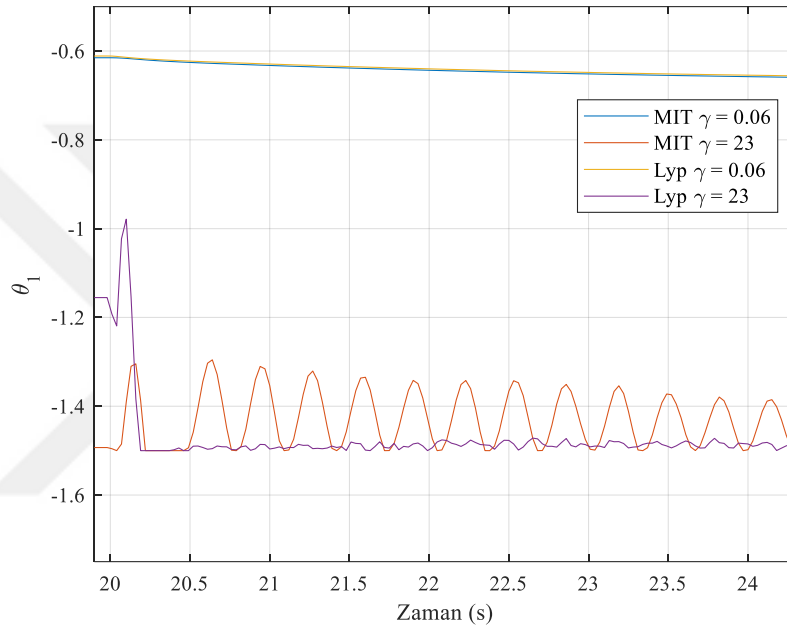
altındadır. γ değerinin 23 gibi büyük bir değer seçilmesi durumunda MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların her ikisi ile yapılan denetimlerin neticesinde elde edilen çıkışlar, 0.2 saniye yükselme zamanı değeri ile γ 'nın 0.06 olduğu duruma göre referans model çıkışına daha çok yakınsamaktadır. Yükselme zamanı bakımından her iki MRAC da birbiri ile aynı performansa sahip olsa da Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, yerleşme zamanı bakımından MIT kuralı tabanlı MRAC'ı geride bırakmaktadır. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetiminde yerleşme zamanı 0.28 saniye iken, MIT kuralı tabanlı MRAC'taki yerleşme zamanı 3.23 saniye olarak gerçekleşmektedir. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC sistem çıkışı, %2 aşım ile denetimi tamamlarken, MIT kuralı tabanlı MRAC'ın, %5.77 aşım ile yükseldikten sonra salınım yaparak aşımı söndürmeye çalıştığı görülmektedir.



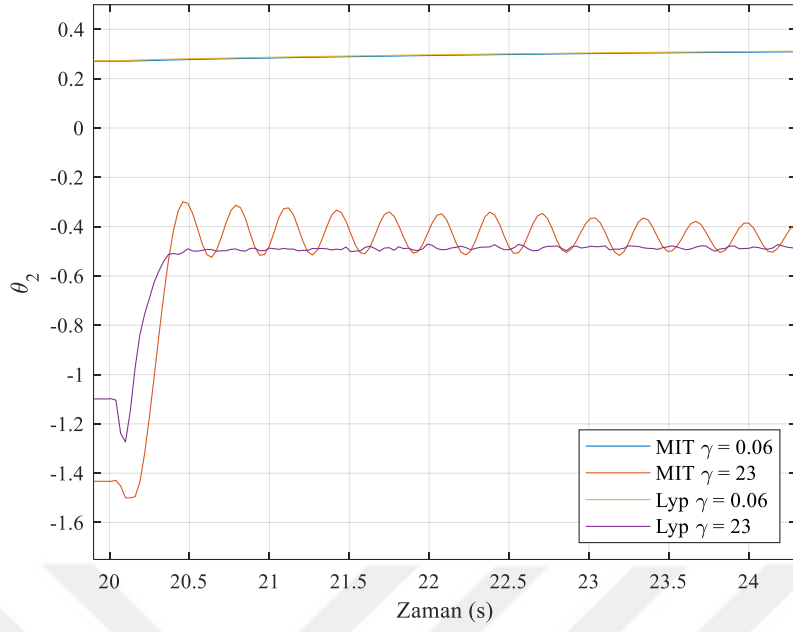
Şekil 4.3 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri ($\gamma = 0.06$ ve $\gamma = 23$).

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te bulunan θ_1 ve θ_2 uyarılma verileri de Şekil 4.3'deki sistem çıkış verileri için yapılan yorumları desteklemektedir. Denetim çalışması esnasında referans giriş işareti değiştiği andan yerleşmenin gerçekleştiği ana kadar geçen sürede, γ değeri 0.06 seçilerek tasarlanan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC uyarılma algoritmaları, θ_1 'i -0.61'den -0.66'ya, θ_2 'yi de 0.27'den 0.31'e düz bir hat boyunca yakınsatmaktadır. Bu uyarılmanın yavaş olması sebebiyle sistem çıkışı da yavaş bir şekilde yükseldikten sonra referans giriş işaretine yakınsamaktadır. Bu durumun aksine, γ 'nın 23 olduğu durumda yapılan denetim çalışmasında Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın θ_1 parametresi 0.2 saniye içerisinde -1.15'ten -1.5'e, θ_2

parametresi de 0.45 saniye içerisinde -1.1'den -0.49'a yakınsamaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC için de θ_1 ve θ_2 parametrelerinin uyarlaması aynı hızda gerçekleşse ideal değerine yakınsamakta zorluk yaşamaktadır. Her iki uyarlama parametresi de sürekli olarak salınım yapmaktadır. Lyapunov kuralı ile hızlı ve salınımsız şekilde uyarlanan θ parametreleri sayesinde sistem çıkışı da hızlı ve salınımsız olarak referans girişe yakınsamaktadır. Bunun aksine MIT kuralı tabanlı MRAC uyarlama parametrelerindeki salınım sistem çıkışına da yansımakta ve yerleşme sonuçlansa da sistem küçük genlikli salınımlara devam etmektedir.



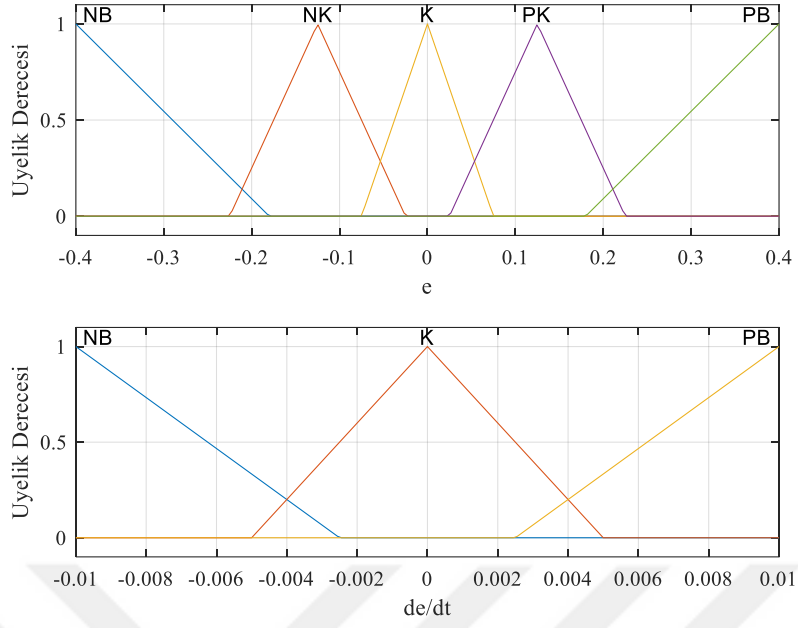
Şekil 4.4 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde θ_1 uyarlaması ($\gamma = 0.06$ ve $\gamma = 23$).



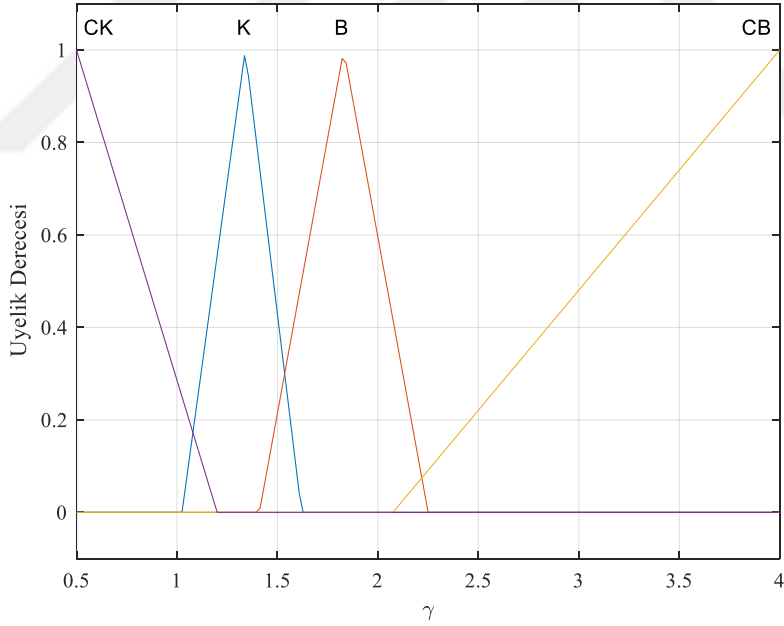
Şekil 4.5 Servo valf pozisyonunun MRAC denetiminde θ_2 uyarlaması ($\gamma = 0.6$ ve $\gamma = 23$).

4.4 SERVO VALF POZİSYONU BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC DENETİMİ

Servo valf temelli deney düzeneğinde geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'larla yapılan denetim çalışmaları, γ değeri tespitinin MRAC tasarımı için önemini vurgulamaktadır. Bölüm 2 ve Bölüm 3'te, demir üretim tesislerinde PID tasarımı yapılırken, denetim problemine konu olan sistem üzerinde birbirini takip eden denemelerin yapıldığı anlatılmaktadır. Denetleyici tasarımı için yapılan denemelerin süreci olumsuz etkileyeceği belirtilerek MRAC'ın bu konuda PID'ye bir alternatif olarak kullanılabileceği önerilmektedir. Servo valf pozisyon denetimi çalışmalarında MRAC tasarımı yapılırken sadece tek bir γ değeri belirlenerek, tasarım sonucu test edilmektedir. MRAC tasarımını daha da kolaylaştırmak, tasarım sırasında sistemde yapılması gereken test miktarını azaltmak ve MRAC performansını artırmak amacıyla Bölüm 3'te bulanık tabanlı kazanç düzenli MRAC kullanımı önerilmektedir. Bu öneriyi fiziksel bir sistem üzerinde test etmek için, servo valf temelli pozisyon denetim sistemine bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC uygulanmıştır. Denetim uygulamalarında kullanılan MRAC bünyesindeki bulanık tabanlı karar alma mekanizması, Şekil 4.6'daki giriş üyelik fonksiyonları ve Şekil 4.7'deki çıkış üyelik fonksiyonlarına göre çalışmaktadır.



Şekil 4.6 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı giriş üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.7 Bulanık tabanlı γ düzenlemesi kuralı çıkış üyelik fonksiyonları.

Bulanık tabanlı kararlar, iki giriş adet işaretine göre alınmaktadır. Giriş işaretlerinden ilki, sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki hata değeridir. Hata değerinin, -0.075 ile 0.075 arasındaki değerleri için oluşturulan üyelik fonksiyonu küçük, 0.022 ile 0.22 arasındaki değerleri için oluşturulan üyelik fonksiyonu pozitif küçük ve 0.18'den büyük değerleri için oluşturulan üyelik fonksiyonu pozitif büyük olarak isimlendirilmektedir. Bulanık tabanlı karar

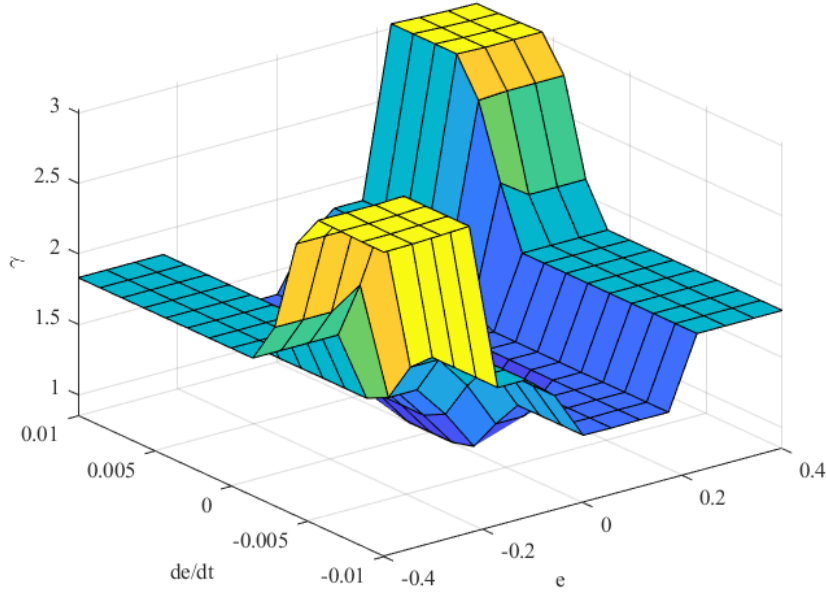
alma mekanizmasının, hatanın pozitif ve negatif olması durumuna göre de değerlendirme yapabilmesi için hatanın sıfırdan küçük olduğu durumlar için de üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Buna göre hatanın -0.022 ile -0.22 arasındaki değerleri için oluşturulan üyelik fonksiyonu negatif küçük, hatanın -0.18'den küçük değerleri için oluşturulan üyelik fonksiyonu ise negatif büyük olarak isimlendirilmektedir. İkinci giriş işareti olan ve hatanın zamana göre değişimini tanımlayan üyelik fonksiyonları, değerin -0.005 ile 0.005 arasında olması durumunda küçük, 0.0024'ten büyük olması durumunda pozitif büyük ve -0.0024'ten küçük olması durumunda negatif büyük olarak tanımlıdır. Tasarlanan MRAC'ın uyarılama hızı olan γ değerini betimleyen çıkış üyelik fonksiyonları, γ 'nın 0 ile 1.2 arasında olduğu durumlar için çok küçük olarak isimlendirilmektedir. γ 'nın 1.025 ile 1.627 arasındaki olduğu durumlar için küçük, 1.39 ile 2.25 arasında olduğu durumlar için büyük ve 2.075 ile 4 arasında olduğu durumlar için çok büyük olarak isimlendirilmektedir.

Çizelge 4.2 Bulanık Kurallar.

Kural No	e	İşlem	$\frac{de}{dt}$	Sonuç
1	NB	VE	NB	CB
2	PB	VE	PB	CB
3	NK	VE	NB	B
4	NB	VE	PB	B
5	NB	VE	K	B
6	NK	VE	K	B
7	NK	VE	K	K
8	PK	VE	K	K
9	NB	VE	PB	B
10	PB	VE	NB	B
11	NK	VE	PB	K
12	PK	VE	NB	K
13	K	VE	NB	K
14	K	VE	PB	K
15	K	VE	K	CK

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'deki üyelik fonksiyonları kullanılarak **Çizelge 4.2**'deki kurallar tanımlanmıştır. Kurallar tasarlanırken, hatanın negatif veya pozitif yönlü büyüklüğü ile hata değişim miktarının pozitif veya negatif yönlü büyüklüğü dikkate alınmıştır. Bu sayede hata ve hatanın değişim miktarının ikisi de negatif veya pozitif yönde büyük değere sahipse, hatanın büyük bir hızla artmaya devam ettiği ve uyarılama hızının mümkün olan en yüksek değere çıkartılması gerektiği belirtilmiştir. Bunun aksine hata ve hatanın değişim miktarının biri pozitif

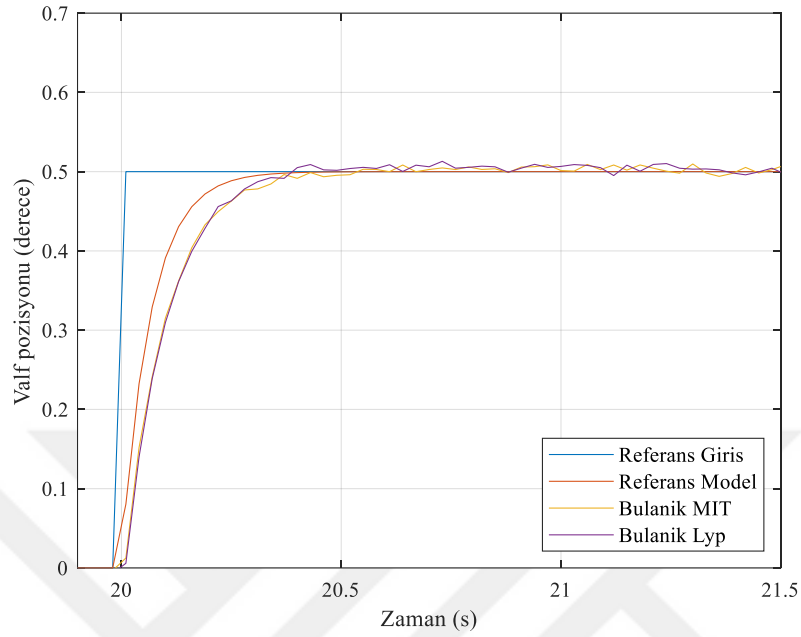
diğeri negatif yönlü ise, denetim sürecinde iyiye gidiş olduğu ve γ değerinin azaltılabileceği kurallara işlenmiştir. Hata ve hatanın küçük olması durumunda tanımlı olan kural ise sistem çıkışındaki dalgalanmaların önüne geçmek için uyarlama hızını küçültecek biçimde tanımlanmıştır. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’deki üyelik fonksiyonları ile Çizelge 4.2’deki kurallar kullanılarak oluşturulan karar mekanizması, Şekil 4.8’deki grafik ile görselleştirilmektedir.



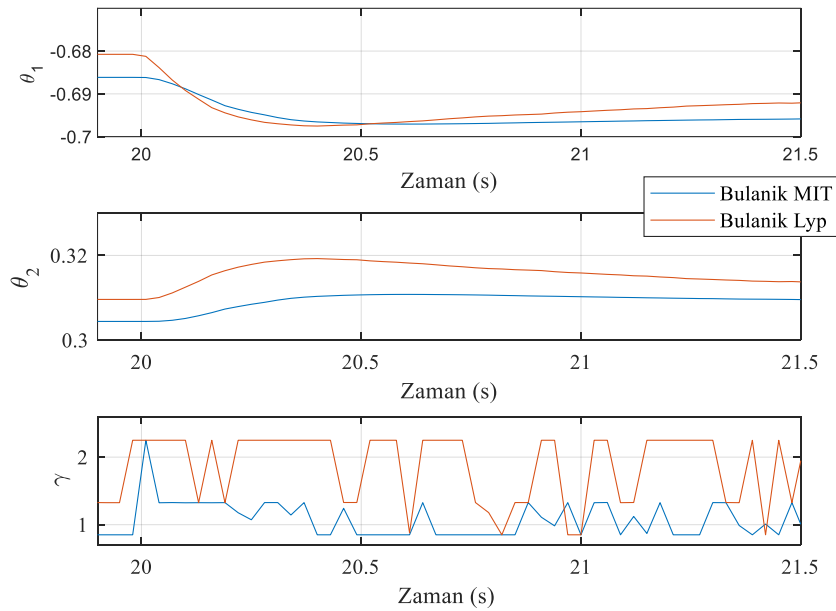
Şekil 4.8 Bulanık γ tespiti karar mekanizması.

Tasarlanan bulanık tabanlı karar alma mekanizması ile oluşturulan MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’lar ile yapılan servo valf pozisyon denetimi neticesinde toplanan veriler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da bulunmaktadır. Şekil 4.9’daki sistem çıkış verilerine göre her iki MRAC da birbirine çok yakın performans parametreleri ile denetimi sağlamaktadır. Oluşan sistem çıkışları referans model çıkışı ile birebir örtüşmese de denetim isterlerini karşılamaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov denetimi ardından oluşan çıkış verileri birbirine çok yakın olsa da bu denetleyicilerin denetim süresi boyunca ürettikleri θ uyarlama parametrelerinin değerleri arasında farklar vardır. Her iki denetleyicinin θ değerlerinin zamana göre değişimi da birbirine benzemektedir. Ancak referans giriş değişimi anında Lyapunov kuralı tabanlı MRAC’ın uyarlama parametrelerinin, daha hızlı uyarlandığı görülmektedir. Bunun sebebi, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için üretilen γ ’nın, MIT kuralı tabanlı MRAC için üretilen γ ’dan büyük olmasıdır. Her iki denetleyici için de sistem çıkış işaretleri birbirine yakın olsa da bulanık tabanlı kazanç düzenleme süreçlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.

Bunun sebebinin, sisteme etki eden dış bozucuların ürettiği küçük değişimler olduğu düşünülmektedir.



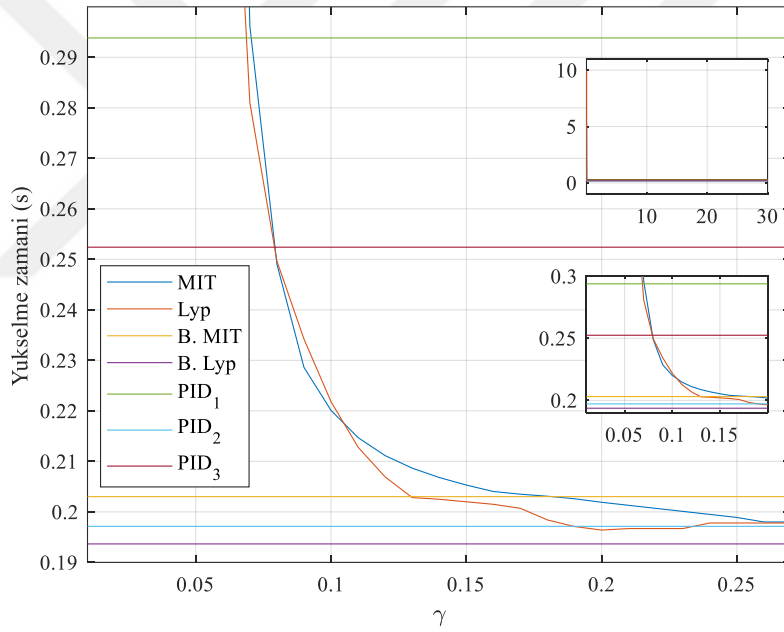
Şekil 4.9 Servo valf pozisyonunun bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetiminde sistem çıkış işaretleri.



Şekil 4.10 Servo valf pozisyonunun bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetiminde γ değerine göre θ_1 ve θ_2 uyarlaması.

4.5 SERVO VALF POZİSYON DENETİM ÇALIŞMALARI SONUÇLARI

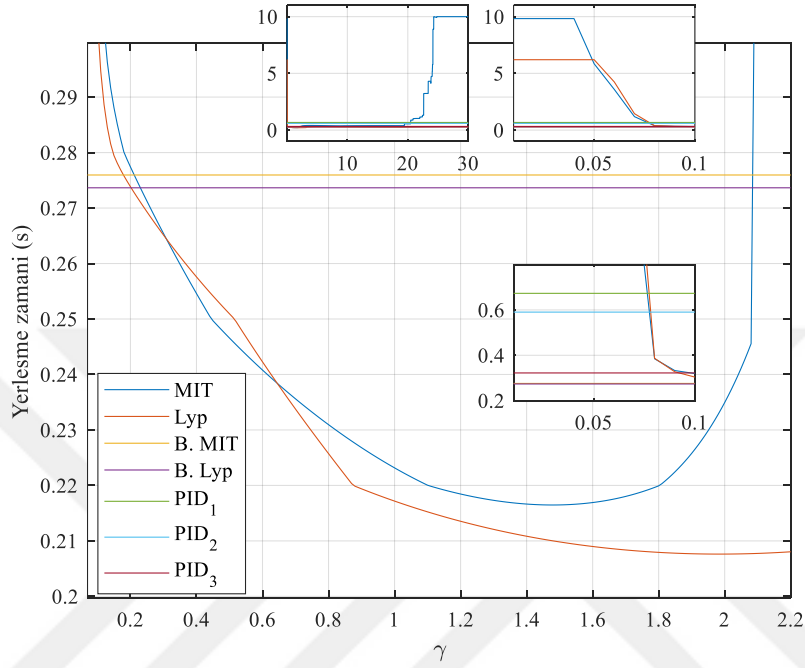
Servo valf denetim çalışmaları neticesinde oluşan sistem çıkışları, denetim performans parametreleri bakımından değerlendirilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11'deki yükselme zamanı verileri, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın 0.194 saniye ile en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. PID₂ de 0.197 saniyelik yükselme zamanı değeri ile denetim isterleri sağlarken, PID₁, PID₃ ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC sırasıyla 0.294, 0.252 ve 0.203 saniye ile denetim isterlerini sağlayamamaktadır. Bunların dışında geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.23'ten büyük değerleri için, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise γ 'nın 0.15'ten büyük değerleri için denetim isterlerini karşılamaktadır.



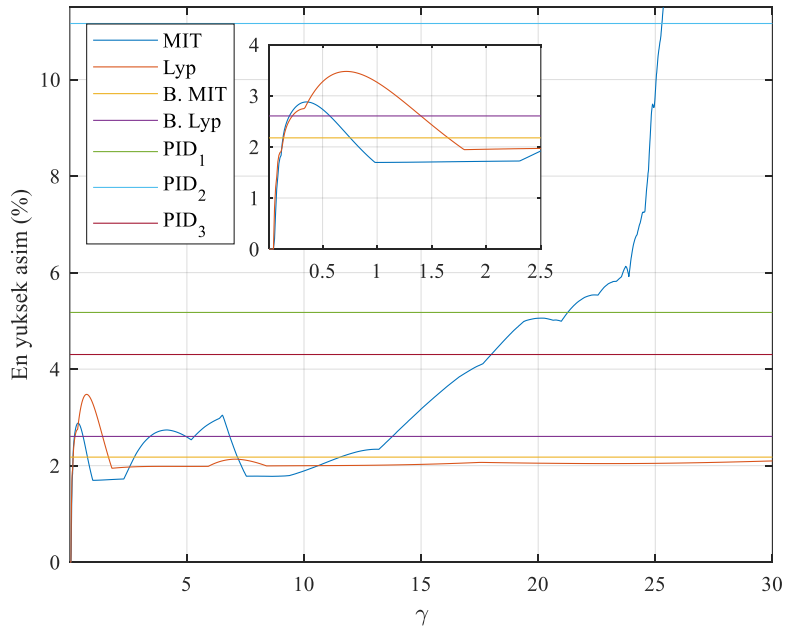
Şekil 4.11 Servo valf pozisyon denetimi yükselme zamanları.

Şekil 4.12'deki yerleşme zamanı verilerine göre bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetimleri, sırasıyla 0.276 ve 0.274 saniye ile denetim isterlerini sağlamaktadır. Uyarılama hızı sabit geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.13 ile 2.08 arasında seçilmesi durumunda, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise γ 'nın 0.11'den büyük seçilmesi durumunda denetim isterlerini sağlamaktadır. Geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 2.08'den büyük değerlerinde sistemi salınıma soktuğu için yerleşme zamanı hızla artmakta ve γ değerinin 24'ten büyük olması durumunda ise deney çalışması süresince

yerleşmeyi tamamlayamamaktadır. PID_1 , PID_2 ve PID_3 'ün denetiminde oluşan yerleşme zamanı verileri sırasıyla 0.673, 0.590 ve 0.322 saniye olarak gerçekleşmiştir. PID denetleyiciler ile yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan yerleşme zamanı değerlerinin hiçbirisi denetim isterlerini sağlayamamaktadır.

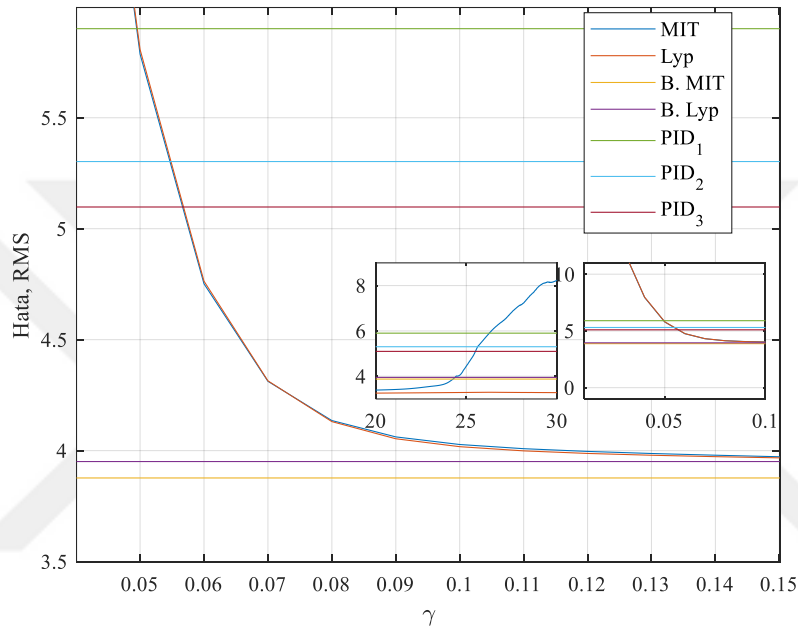


Şekil 4.12 Servo valf pozisyon denetimi yerleşme zamanları.



Şekil 4.13 Servo valf pozisyon denetimi aşım değerleri.

Şekil 4.13'teki aşım değerlerine göre bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar %2.177 ve %2.606 ile denetim isterini karşılamaktadır. Geleneksel Lyapunov kuralı tabanlı MRAC γ 'nın 0.01 ile 30 arasındaki bütün değerleri için, MIT kuralı tabanlı MRAC da γ 'nın 0.01 ile 19.43 arasındaki değerleri için %5'lik en yüksek aşım isterini karşılamaktadır. PID₃, %4.303 değeri ile limitler dahilinde kalmakta ancak PID₁ ve PID₂, %5.175 ve %11.162 değeri ile limit dışına çıkmaktadır.

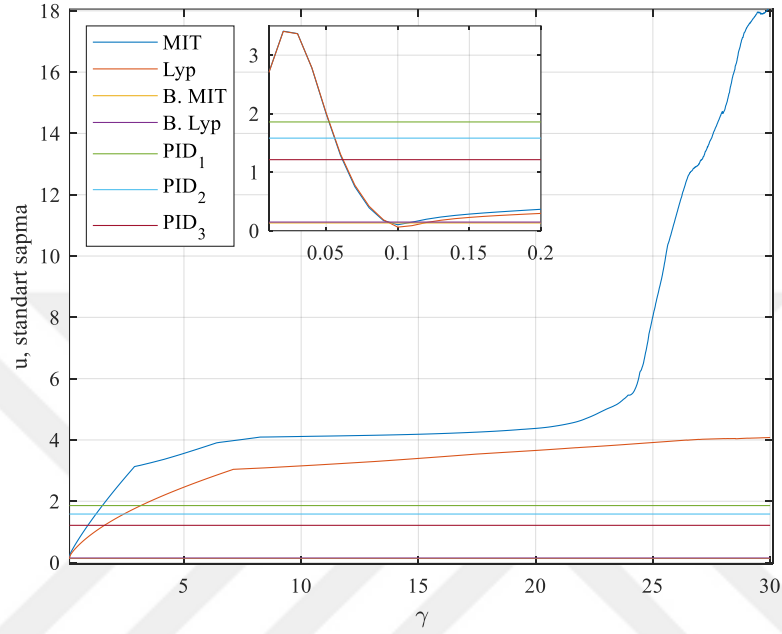


Şekil 4.14 Servo valf pozisyon denetimi RMS hata değerleri.

Şekil 4.14'teki RMS hata değerlerine göre bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan sistem hatasının RMS değerleri %3.877 ve %3.951 ile diğer denetleyicilerden düşüktür. Geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta, γ değerinin 0.11'i geçmesi ile oluşan sistem hatasının RMS değeri %4'ün altına inmektedir. γ değeri daha da artırılarak 19'u geçtiğinde ise MIT kuralı tabanlı MRAC denetimi neticesinde oluşan sistem hatası RMS değeri %4'ü tekrar aşarak %10'a kadar yükselmektedir.

Şekil 4.15'te denetleyicilerin ürettikleri denetim işareti standart sapma değerleri bulunmaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar %0.123 ve %0.147 değerleri ile diğer denetleyicileri geride bırakmaktadır. PID₁, PID₂ ve PID₃ denetimi neticesinde oluşan standart sapma miktarları ise sırasıyla %1.859, %1.583 ve %1.214 değerleri

ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ların gerisinde kalmaktadır. Geleneksel Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.07 ile 1.67 değerleri arasında olması durumunda, MIT kuralı tabanlı MRAC ise γ 'nın 0.07 ile 0.89 değerleri arasında olması durumlarında PID denetleyicilerden daha iyi sonuç üretmektedir.



Şekil 4.15 Servo valf pozisyon denetimi denetim işareti standart sapma değeri



BÖLÜM 5

DEMİR ÜRETİM SÜREÇLERİNDE BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC UYGULAMASI

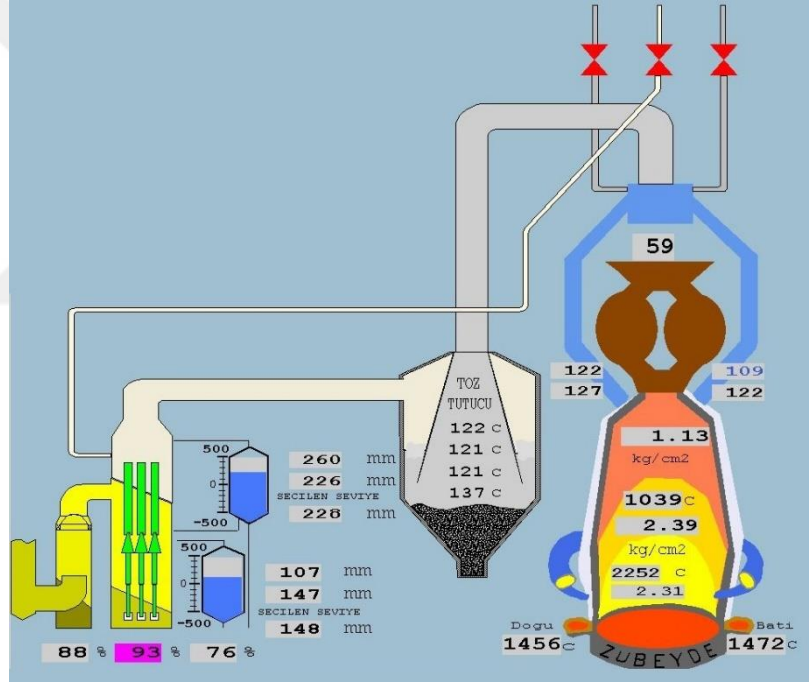
Bölüm 3 ve Bölüm 4’te yapılan denetim çalışmalarında MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve geleneksel PID denetleyicilerin performansları kıyaslanmaktadır. MRAC uyarlama algoritmasındaki γ uyarlama hızı değişiminin, θ_1 ve θ_2 uyarlama parametrelerinin uyarlama hızı üzerindeki etkileri gözlenmektedir. Bölüm 5’te, PID, MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC’ın endüstriyel tesislerde kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların sonuçları bulunmaktadır. Yapılan denetim çalışmalarında, bu tez çalışmasına konu olan demir üretim süreçleri içerisinde seçilen, yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi problemi kullanılmıştır. Günümüzde yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi, otomasyon sistemlerinin yazılım kütüphanesinde bulunan PID denetleyiciler ile yapılmaktadır. Bu çalışmanın çıktılarından birisi de bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC’ın, demir üretim süreçlerindeki denetim problemlerinin çözümündeki başarısının geleneksel PID ile kıyaslanmasıdır. Yapılan denetim çalışmaları bu anlamda değerlendirilerek birbirleriyle kıyaslanmaktadır.

5.1 YÜKSEK FIRIN VE GAZ TEMİZLEME TANK SİSTEMİ TANITIMI

Şekil 5.1’de şematik olarak genel görünümü verilen yüksek fırın, demir cevherindeki demirin indirgenmesini sağlayan kimyasal bir reaktördür. Yüksek fırın içerisindeki kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesi için ısı gereklidir. Bu ısı, fırın içerisine gönderilen kok kömürü, enjeksiyon kömürü ve sıcak hava tarafından karşılanır. Bir fan tarafından basınçlandırılarak sobaya gönderilen 150-200°C sıcaklığındaki hava, önceden ısıtılmış olan sobanın içinden geçirilir. Basınçlı havanın sıcaklığı soba çıkışında 1200°C civarına yakınsar. Sıcak hava, fırının taban kısmına yakın bir bölümde bulunan ve tüyer olarak isimlendirilen nozullardan fırın içerisine gönderilir. Sıcak hava Şekil 5.1’de şematik olarak genel görünümü verilen yüksek fırın içerisinde yükselirken, fırın içerisindeki hammaddelerle kimyasal tepkimelere girer. Fırın içerisinde gerçekleşen tepkimelerin neticesinde sıcak hava, CO ve CO₂ bakımından zengin olan

yüksek fırın gazına dönüşür. Yüksek fırın gazı, fırın içerisine katı hammaddelerin küçük parçacıklarının ve tozlarının bir kısmını da bünyesine katarak yüksek fırını terk eder.

Yüksek fırın üretim sürecinin atığı olan yüksek fırın gazı, demir üretim süreçlerinin farklı bölümlerinde kullanılır. Kimyasal içeriği yaklaşık %20 oranında CO olan yüksek fırın gazı, oksijen ile tekrar tepkimeye sokularak, yüksek fırın sobası ve kok fabrikası gibi demir üretim süreçlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Yüksek fırından 1.2 – 1.8kg/cm² basınç ile çıkan yüksek fırın gazının, gaz depolama birimine gelmeden önce bir türbin çevirerek elektrik üretmesi de mümkündür. Dünyadaki birçok tesis, bu şekilde elektrik üretimi de yapmaktadır. Yüksek fırın gazının bu şekilde kullanılması için içeriğindeki tozlardan arındırılması ve temizlenmesi gerekmektedir.



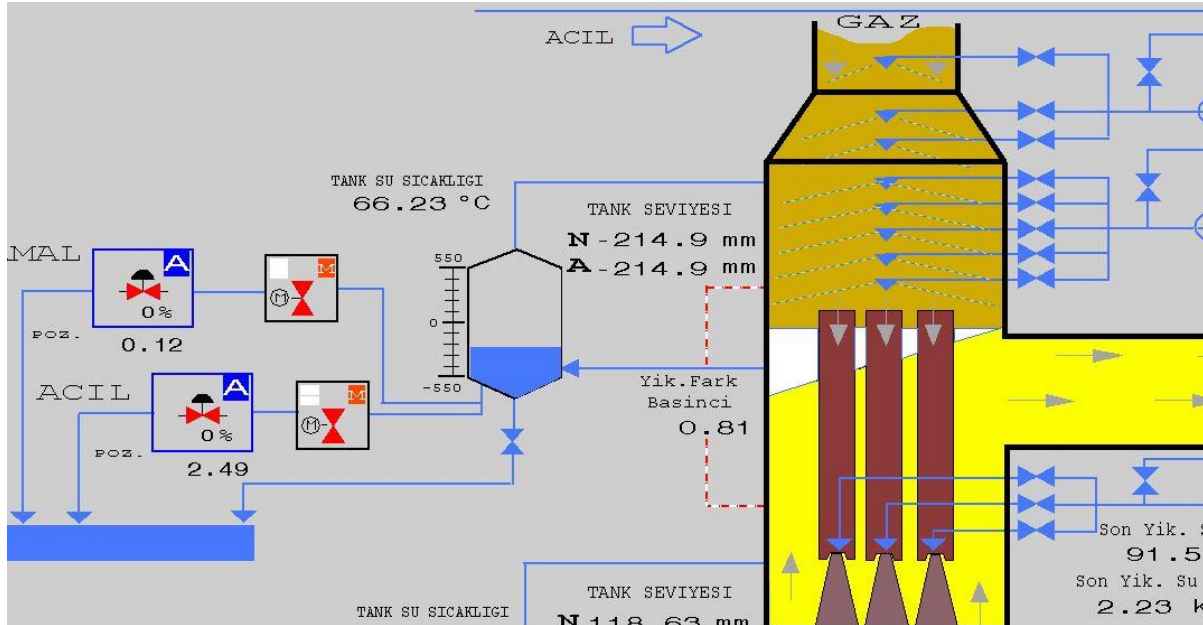
Şekil 5.1 Yüksek fırın genel görünümü.

Yüksek fırın gazı, fırına bir boru hattı ile bağlı olan gaz temizleme tesisinde yıkanır ve basıncı düşürülür. Gazın temizlenmesi 3 aşamada gerçekleşmektedir. Öncelikle toz tutucu bir siklona giren gaz, burada büyük parçacıklarını bırakır. Büyük oranda demir tozu da içeren bu parçacıklar, demir içeriği düşük olan demir cevherine kimyasal olarak bağlanarak daha verimli cevher elde etmek için sinterleme ve peletleme tesislerine gönderilir. Toz tutucu çıkışındaki yüksek fırın gazı basıncı hala yüksek fırın tepesindeki gaz basıncı ile aynı değerdedir. Yüksek fırın içerisindeki reaksiyonların gerçekleşebilmesi için, yüksek fırın tepesindeki gaz basıncının

denetim isterlerine uygun bir değerde olması gerekir. Gaz basıncı, toz tutucunun devamında bulunan gaz yıkama sisteminde ve yıkama sistemi sonrasındaki türbin ile yapılır.

Gaz yıkama sisteminde, yüksek fırın gazının geri dönüşüm amaçlı kullanımını sağlamak için gaz temizleme işlemi yapılır. Yıkayıcı giriş bölgesinde gazın üzerine su spreyi ile yıkama uygulaması yapılır. Su spreyi ile yıkanan gaz, bünyesindeki tozlardan arınır. Yıkama işleminin ardından gaz basıncı yüksek fırın üretim süreci için uygun değere düşürülür. Basıncı düşürülerek yıkanan yüksek fırın gazı, gaz yıkama sisteminin son bölümünde kurutucu ünitesine girer ve içeriğindeki nem uzaklaştırılır. Gaz yıkama sisteminden çıkan yüksek fırın gazı, demir üretim süreçlerinde yakıt olarak, türbin çevirerek elektrik üretici basınç kaynağı olarak kullanıma hazırdır.

Yüksek fırın gazı temizlik işlemi, Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilen atmosfere kapalı basınçlı bir ortamda yapılmaktadır. Yüksek fırın tepe basıncına sahip ortamda gaz üzerine sprey halinde su uygulanır. Böylece suyun gaz içeriğindeki katı parçacıkları temizlemesi sağlanır. Kapalı ortamda yapılan yıkama işlemi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Kapalı bir ortama sürekli olarak su eklenmektedir ve bu suyun, yüksek fırın gazı basıncını etkilemeden, atmosfere açık bir ortama tahliyesinin yapılması gerekmektedir. Bunun için gaz yıkayıcı sisteminin yanında bir tahliye tankı bulunmaktadır. Tankın tabanında bulunan boru hattı, gaz yıkayıcı içerisindeki, yüksek fırın gazı içeriğindeki parçacıkları da bünyesine katmış olan çamurlu suyun tanka dolmasını sağlamaktadır. Tankın tepesinde bulunan boru hattı da tankın boş kalan kısmındaki basıncın, yüksek fırın tepe basıncı ile eşitlenmesini sağlamaktadır. Tankın atmosfere açık kısmında da iki adet valf bulunmaktadır. Elektrohidrolik veya pnömatik olarak tahrik edilen oransal denetim valflerinin görevi, tanktaki su seviyesini denetim isterlerine uygun bir değerde tutarak, tanktaki suyu boşaltmaktır.



Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim probleminde yaşanan sorunlar, yüksek fırın üretim sürecini tehlikeye sokar. Eğer tank içerisindeki su tamamen boşalırsa, yıkama suyunun bulunduğu ortamdaki yüksek fırın gazı atmosfere salınır. Bu durum yüksek fırın sahasında bulunan personellerin gazdan zehirlenmesine sebep olabilir. Gazın bir ısı kaynağı ile karşılaşması halinde de patlama ya da parlama sonucu bir iş kazası meydana gelebilir. Diğer taraftan, eğer tank içerisindeki su tahliye edilemeyip, tank tamamen dolarsa, tanktan taşan su, yüksek fırın gazı boru hattı içerisine dolar. Bu durumda yüksek fırın gazı boru hattının tıkanması sebebiyle yüksek fırın üretim süreci olumsuz yönde etkilenir. Boru hattında su birikmesi, boru ağırlığının artmasına sebep olur. Aşırı ağırlık, boru hattı taşıyıcı elemanlarının zarar görmesine ve boru hattının yıkılmasına kadar gidebilecek birçok olumsuzluğun sebebi olur.

Günümüzde yüksek fırınlar, PLC veya DCS temelli otomasyon sistemleri ile denetlenmektedir. Gaz yıkayıcı tankı su seviyesi gibi oransal denetime ihtiyaç duyan denetim problemleri, otomasyon sistemlerinin kütüphanelerinde bulunan PID algoritmaları veya çok sayıda üreticiden tedarik edilebilen PID denetim donanımları ile yapılmaktadır. Yıkayıcı tankı seviye denetiminde yaşanabilecek olumsuzlukların önüne geçmek ve bu ünitenin yüksek fırın sürecinde oluşturma ihtimali olan riskleri düşürmek için yüksek fırın gazı yıkayıcı tank seviye denetimi, otomasyon sistemi kütüphanesinde bulunan PID algoritması ile denetlenen iki adet oransal valf ile yapılmaktadır. Bu valflerden biri seviye denetimini sağlamaya çalışırken diğeri hazır durumda beklemektedir. Denetimi sağlamaya çalışan valf normal valf, çalışmaya hazır

bekleyen valf ise acil valf olarak isimlendirilebilir. Denetim esnasında tank seviyesinin çok yükselmesi durumunda, acil valf devreye girerek seviye denetiminde normal valfe yardımcı olmaktadır.

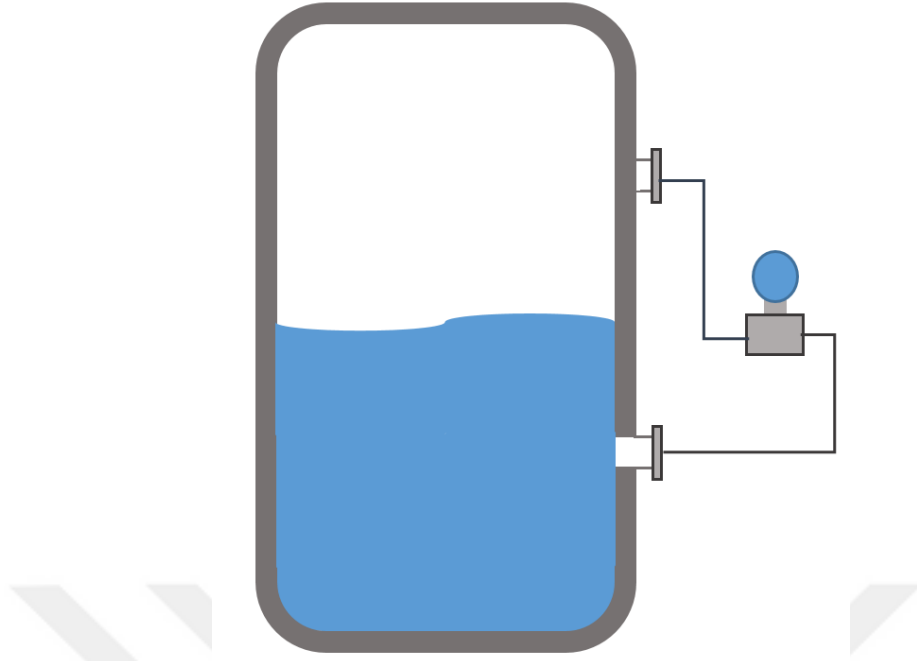
Gaz yıkayıcı tankı su tahliye valflerinin PID denetleyici parametreleri, tecrübeye dayalı olarak belirlenmektedir. Burada tasarımcı, parametrelerde değişiklikler yapar ve sistemin bu değişimlere verdiği tepkiyi inceler. Bu parametre belirleme ve sistem tepkisi inceleme süreci, sistem çıkışı denetim isterlerini sağlayıncaya kadar devam eder.

Gaz yıkayıcı tankı seviyesi denetim probleminde birçok bozucu bulunmaktadır. Su sprej nozullarında oluşan daralma veya tıkanmalar, tanka giren anlık su akış miktarını değiştirir. Gaz yıkayıcı tankı içinde biriken çamurlu suyun, tanka boşalmasını sağlayan boru hattının çapının, zamanla toz ve çamur yapışması sebebiyle daralması veya boru hattı içinde çamur birikmesi su tahliye davranışını değiştirir. Gaz yıkayıcı tankının üst tarafı, yüksek fırın tepesine direkt olarak bağlıdır ve bu kısımdaki basınç yüksek fırın tepe basıncına eşittir. Yüksek fırın basıncında yaşanan dalgalanmalar da tanktan su tahliyesi dinamiğini değiştirir.

Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim problemindeki dış bozucuların sisteme etkileri ve ortam şartları sebebiyle sistem dinamiklerinin değişmesi, PID performansını düşürür. Bu durumda ya tekrar Ziegler Nichols gibi yaklaşımlarla yeni bir PID tasarımı yapılmalıdır ya da mevcut PID parametrelerinde sistemdeki tecrübelerle dayanarak değişiklikler yapılmalı ve denetleyici performansı artırılmalıdır.

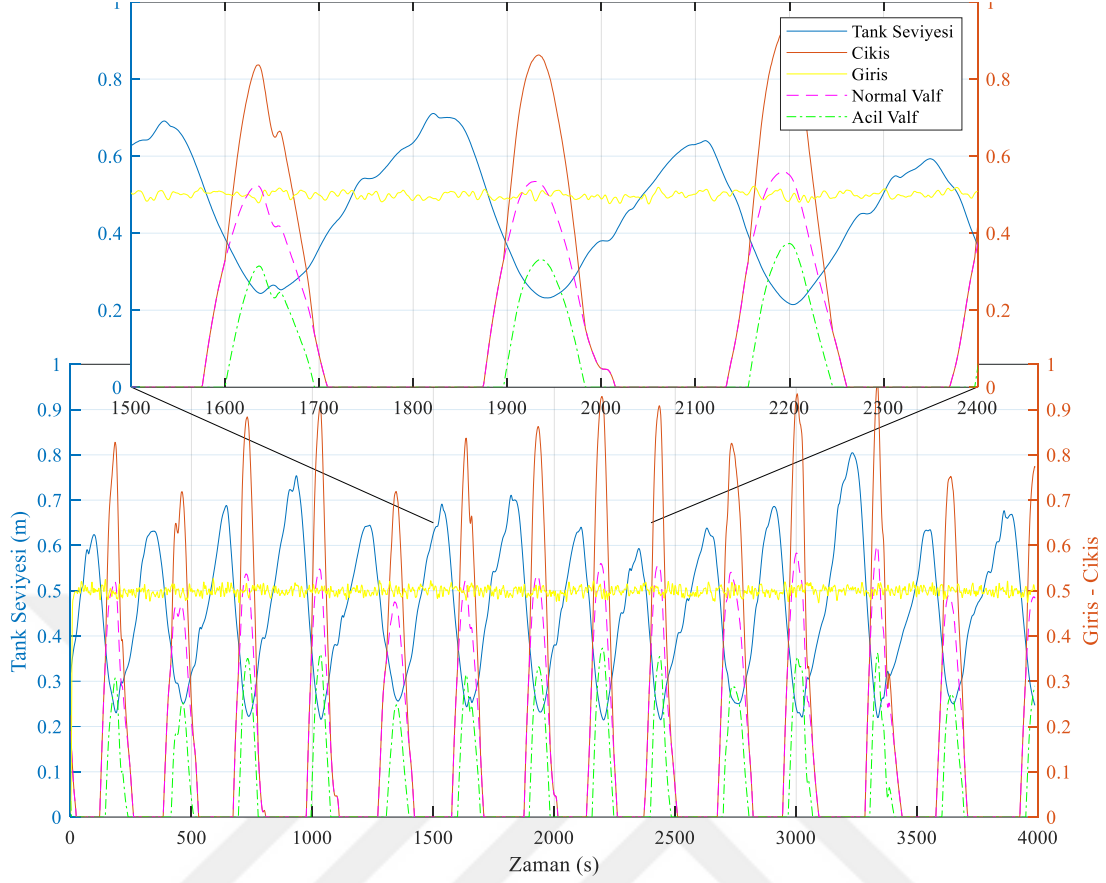
5.2 GAZ YIKAYICI TANKI SEVİYE DENETİM SİSTEMİ

Bölüm 3 ve Bölüm 4'te MRAC, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve klasik PID sanal test sistemleri ve servo valf temelli deney düzeneği denetiminde kullanılmaktadır. Denetim sonuçları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılarak sonuçları değerlendirilmektedir. Bölüm 5'te benzer çalışma yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviye denetim problemi üzerinde yapılmaktadır.



Şekil 5.3 Yıkayıcı tankı seviye ölçüm sistemi.

Gaz yıkayıcı tankı seviye denetiminin MRAC ve PID ile yapılması için bir yüksek fırından alınan veriler ve tesiste yapılan incelemeler ışığında, sistem modellemesi yapılmıştır. Gaz yıkayıcı tankı, 3 metre yüksekliğinde, 2 metre çapına silindirik bir tanktır. Tankın seviye ölçümü, Şekil 5.3'deki gibi fark basınç ölçen bir donanım ile yapılmaktadır. Tankın boşalma ve taşma ihtimalini azaltmak için, seviye ölçümü tankın orta kısmındaki 1 metrelik bölgede yapılmaktadır. Yani otomasyon sistemi, tank seviyesini 1 metre olarak görmekte ve bu 1 metrelik kısımda seviyeyi denetlemeye çalışmaktadır. Tank DCS'e göre 0 metrenin altına inse dahi 1 metrelik bir kısım hala dolu olacaktır. Seviye denetim probleminin kritik olması ve dış bozucu etkisinin denetimi zorlaştırması sebebiyle böyle bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 5.4 Yüksek fırından alınan gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi verileri.

Gaz yıkayıcı tankı seviyesini denetleyen otomasyon sisteminden, denetim işareti ve tank seviyesi geribesleme işareti verileri 1 saniyelik periyotla toplanmıştır. Şekil 5.4'te gösterilen bu veriler ile sistem tanımlama yaklaşımları kullanılarak seviye denetim probleminin modeli oluşturulmuştur. Modelleme yaparken verilerle birlikte otomasyon yazılımındaki algoritmalar da incelenerek bazı yaklaşımlar yapılmıştır. Gaz yıkayıcı sistemi seviye denetimi, otomasyon sisteminde 0.1 saniyelik program döngüsünde çalışan PID ile yapılmaktadır. Denetleyici, seviye geribesleme işaretini 0.5 saniye gecikme ile almaktadır. Denetleyicinin ürettiği denetim işareti, valf tarafından 0.5 saniye gecikme ile alınmaktadır. Valfin hareketi, 5 saniye gecikme ile sisteme etki etmektedir. Bu yaklaşımlar ve sistemden toplanan veriler kullanılarak tasarlanan gaz yıkayıcı tankı seviye denetim sisteminin Matlab Simulink modeli, Şekil 5.5'te görülmektedir. Modelde gerçek yüksek fırında olduğu gibi, gaz yıkama tankı seviyesinin otomasyon sistemi tarafından algılanmasında yaşanan gecikme, denetim işaretine göre hareket ederek tanktaki suyu boşaltan valf dinamiklerindeki gecikme, tanka giren su akışı ve su akışındaki ani değişim ile sistem davranışını bozan bozucu etki bulunmaktadır.

5.3 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ PID DENETİMİ

Bu çalışmada, bir endüstriyel tesisteki denetim probleminin çözülmesi amaçlanmaktadır. Bir endüstriyel tesiste denetimi yapılan sistemin matematiksel modeli kesin olarak bilinmemektedir. Bu nedenle endüstriyel tesislerde PID denetleyicilerin parametreleri Ziegler Nichols gibi yöntemlerle veya deneme yanılmalarla belirlenmektedir. Bu çalışmaya konu olan yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviye denetim probleminin çözümünde de PID denetleyici, Ziegler Nichols yöntemi ve ardından yapılan denemelerle tasarlanmaktadır.

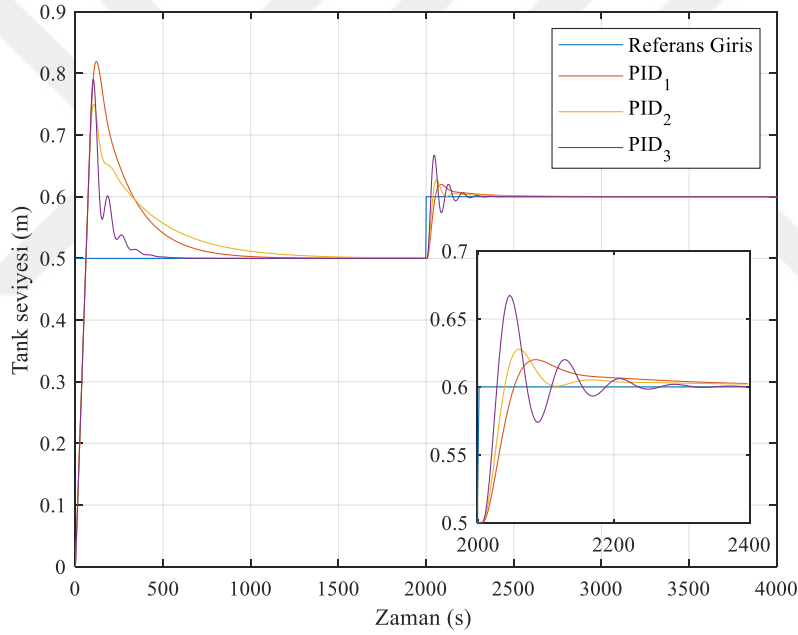
Bölüm 3 ve Bölüm 4'te yapılan denetim çalışmalarında, PID, MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC kullanılarak, denetim performansları birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Benzer şekilde Bölüm 5'te tanımlanan yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi probleminin çözümünde de bu denetleyiciler kullanılmaktadır. MRAC ve PID arasındaki karşılaştırmayı, bir endüstriyel tesiste çalışmakta olan PID denetleyici parametreleri, denetlenen sistemin matematiksel modeli kesin olarak bilinmediği için tam ideal değerinde olmaz. Bu tesislerdeki PID tasarımı, Ziegler Nichols gibi yöntemlerle yaklaşık olarak yapılır. Bu yöntemler ile tasarımı yapılan denetleyicilerin tepkileri, tasarım sonrasında süreçte yaşanan değişiklikler nedeniyle, denetim performanslarını kaybedebilirler. Böyle bir durum olduğunda PID parametreleri deneme yanılma yöntemleri ile değiştirilerek denetleyici parametreleri tekrar belirlenir. Demir üretim süreçlerindeki donanımlar, aşındırıcı maddeler, yüksek genlikli sıcaklık değişimleri, toz ve çamur birikmesi gibi birçok bozucuya maruz kalmaktadır. Bu sebeple demir üretim süreçleri için tasarlanan bir PID'nin denetim performansı zamanla düşer. Denetim isterlerinin sağlanamaması sebebiyle denetleyicide parametre değişikliği ihtiyacı oluşur. Böylesi durumlarda tasarımcılar, parametrelerde değişiklikler yaptıktan sonra yeni denetleyiciyi test eder. Denetleyicinin yeni durumu, denetim isterlerini sağlayana kadar bu deneme yanılma tabanlı tasarım süreci devam eder. Bu aşamadaki işlemler, denetleyiciyi tasarlayan ve süreci yöneten kişilere bağlıdır. Yani yeni tasarımı değişen denetleyicinin parametreleri kişiden kişiye değişebilir. Bölüm 5'te yapılacak denetim çalışmalarının, demir üretim tesislerinde yapılan çalışmaları daha iyi betimleyebilmesi için MRAC denetleyiciler tek bir PID ile değil, farklı parametrelere ve davranışlara sahip üç ayrı PID denetleyici ile kıyaslanmaktadır. Bu amaçla tasarlanan PID₁, PID₂ ve PID₃'ün parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim problemi, gecikmelerin olduğu yavaş bir süreçtir. Denetleyici çıkışındaki ani değişiklikler, sistemi

salınıma götüreceği için, tasarlanan denetleyicilerin hepsinde türev katsayısı D'nin değeri 0 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 Tank sistemi denetimi için tasarlanan PID denetleyici parametreleri.

Denetleyici Katsayısı	PID ₁	PID ₂	PID ₃
P	2	3	5
I	0.009	0.009	0.05
D	0	0	0

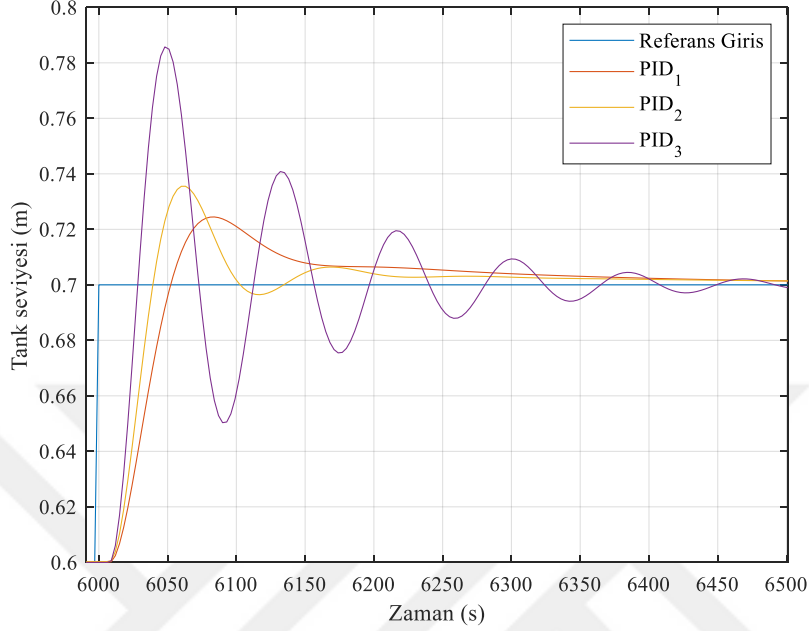
Çizelge 5.1’de parametreleri bulunan PID’ler ile gaz yıkayıcı tank seviye denetim çalışmaları neticesinde elde edilen sonuçlar, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de bulunmaktadır.



Şekil 5.6 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde PID denetimi sistem çıkışları.

Denetimin ilk anında referans değerinin artışından sonra, denetleyicilerin 48 saniyelik yükselme zamanı üretecek şekilde sürece etki ettiği görülmektedir. Hızlı yükselme zamanının ardından her iç denetleyici de %50 ile %63 arasında değişen miktarlarda aşım neden olmaktadır. Aşımın ardından tepki süresi diğer denetleyicilere göre daha hızlı olan PID₃, 370 saniyelik yerleşme zamanı değeri ile öne çıkmaktadır. Sırasıyla PID₁ ve PID₂, 767 ve 1044 saniyelik yerleşme zamanı değeri ile yavaş sayılabilecek bir sürede denetimi sağlamaktadır. Denetim çalışmasının ikinci bölümünde referans seviye değeri 0.5 metreden 0.6 metreye çıkartıldığında, PID₃, 14 saniye ve 228 saniye değerleri ile diğer denetleyicilerin yaklaşık yarısı kadar yükselme ve

yerleşme zamanı değerleri ile denetimi sağlamaya çalışsa da %67'lik değer ile diğer denetleyicilerin 3 katı büyüklüğünde aşım neden olmaktadır.

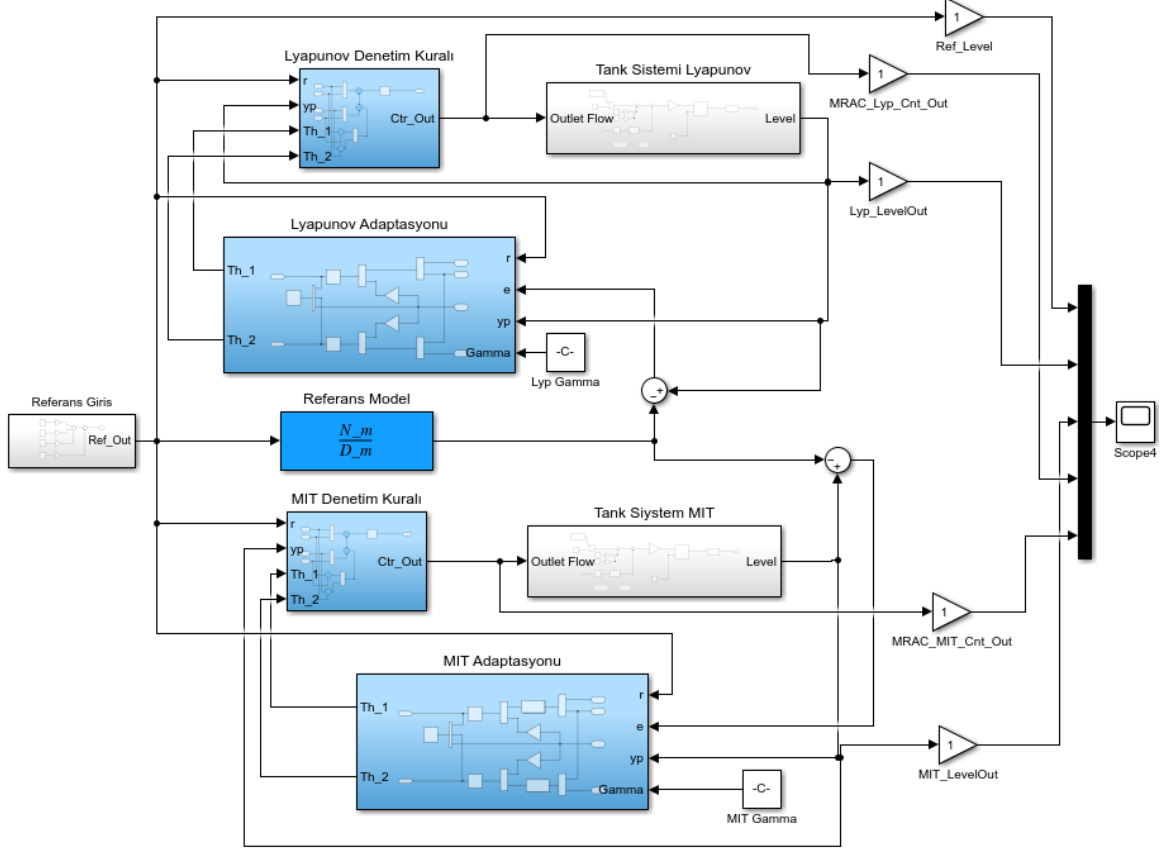


Şekil 5.7 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde PID denetimi sistem çıkışları

Denetimin son kısmında seviye denetim sistemi, tanka giren anlık su akışı değerindeki değişim ve geribesleme işaretindeki 2 saniyelik gecikme ile bozulmaya uğramış durumdadır. Denetimin 6000. saniyede referans giriş işareti 0.6'dan 0.7'ye yükseltildiğinde PID₃ yine hızlı tepkisi ile diğer denetleyicilerin yaklaşık yarısı kadar yükselme zamanı değeri ile öne çıkmaktadır. PID₃'ün hızlı tepkisi bu sefer en yüksek aşım değerinin %85'e kadar çıkmasına neden olmaktadır. Oluşan bu yüksek değerli aşım sebebiyle PID₃, ikinci bölümdeki yerleşme zamanı değerinin iki katı sürede denetimi sağlamaktadır. PID₁ ve PID₂'nin de seviye denetim sistemindeki bozucu etkisinden etkilendiği tespit edilmiştir. Buna göre her iki denetleyicinin yükselme zamanı değerleri %10 düşmekte, yerleşme zamanı değerleri sırasıyla %0.4 ve %2.7 düşmektedir. Bu değerlerdeki iyileşmeye karşın PID₁ ve PID₂'nin son bölümde ürettiği aşım miktarları sırasıyla %22 ve %28 oranlarında artmaktadır.

5.4 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ MRAC DENETİMİ

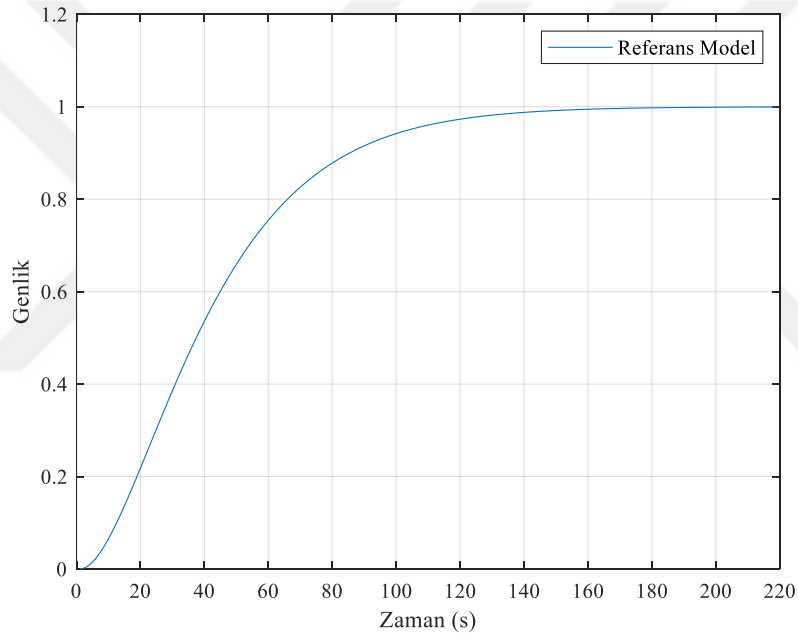
Gaz yıkayıcı tankı seviye denetiminin MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılması için, Eşitlik (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.7)'de verilen MIT ve Lyapunov tabanlı MRAC uyarlama kuralları ile Eşitlik (3.2)'de verilen denetim kuralı kullanılarak denetleyici yapıları oluşturulmuştur. MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar Şekil 5.8'de bulunmaktadır. Şekilde bulunan iki denetleyici de aynı referans giriş işaretini ve aynı referans modeli kullanmaktadır. Şekil 5.9'da basamak cevabı bulunan referans model, yüksek fırın otomasyon sisteminde alınan verilere ve yüksek fırın işletme tecrübesine dayalı olarak tasarlanmıştır. Buna göre oluşturulan referans modelin yükselme zamanı 41.9 saniye, yerleşme zamanı 72.9 saniye, aşım miktarı ise %0'dır.



Şekil 5.8 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi MRAC test düzeneği tasarımı.

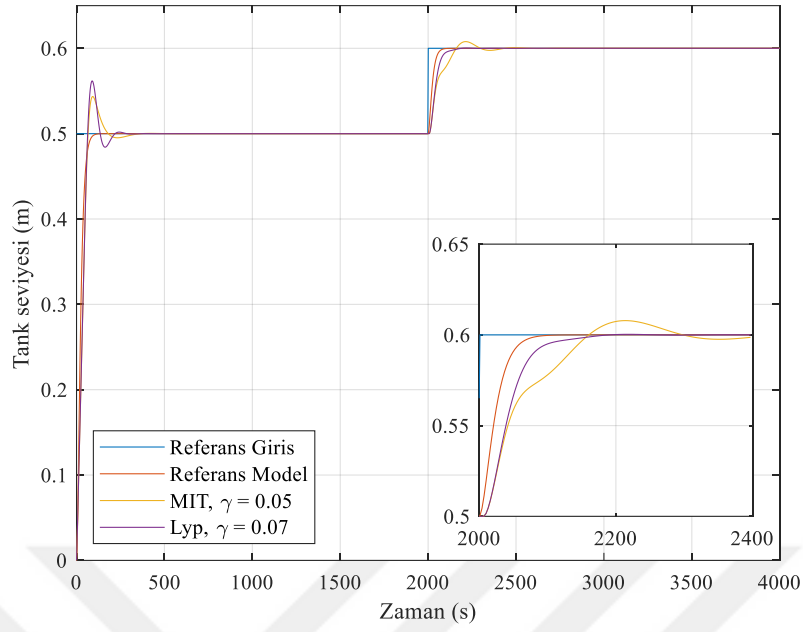
Bölüm 3'te, γ uyarlama hızı katsayısının, MRAC tasarımı için kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir. MRAC tasarımı yapılırken γ , aynı endüstriyel tesislerdeki PID tasarımında olduğu gibi sistemde yapılan denemeler neticesinde belirlenir. Bu çalışmada gaz yıkayıcı tankı seviye denetim sisteminde, γ 'nın değeri 0.001'den başlayıp 0.001'er adımlarla artırılarak, 0.01

ile 1 arasındaki değerleri için MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar tasarlanmıştır. Yapılan denetim çalışmaları neticesinde elde edilen verilere MIT kuralı tabanlı MRAC için en uygun γ değeri 0.05, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için en uygun γ değeri 0.07 olarak tespit edilmiştir. γ 'nın değeri daha da düşürüldüğünde, θ 'ların uyarlama hızları düştüğünden, özellikle denetimin ilk anındaki yükselme ve yerleşme zamanlarının, işletme isterlerine kıyasla çok büyük değerlere yakınsadığı gözlemlenmiştir. γ 'değeri büyütüldüğünde ise θ uyarlama hızı arttığından, denetleyicinin ürettiği denetim işaretinin birim zamandaki değişimi daha büyük olmaktadır. Bu sebeple her iki denetleyici için de γ değerinin daha büyük değerlerinde sistem çıkışı salınıma girmektedir.

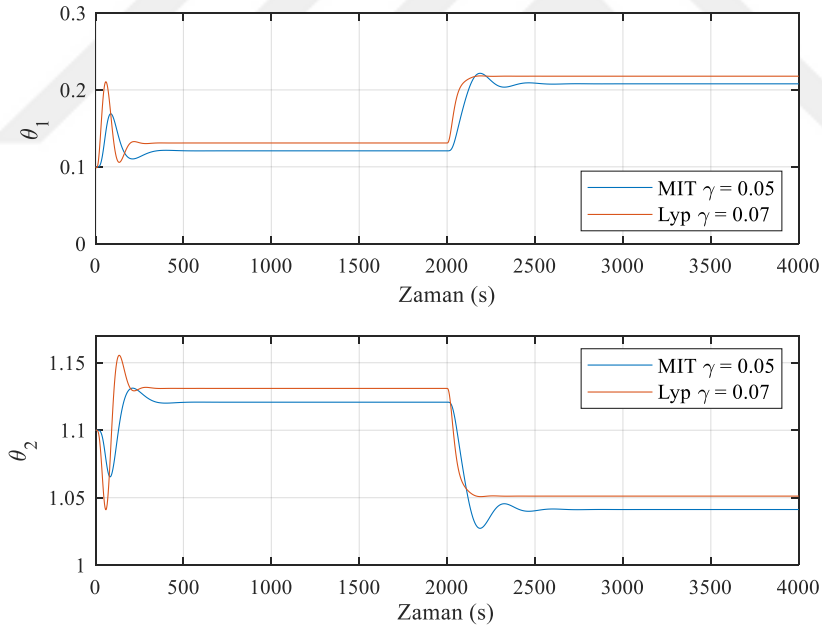


Şekil 5.9 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi MRAC tasarımı, referans model basamak cevabı.

Şekil 5.8'de görülen gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi test sisteminin MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile denetiminin ardından elde edilen veriler, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te bulunmaktadır. Şekil 5.10'daki verilere göre denetimin ilk anında referans değer artışından sonra, denetleyicilerin 49 saniyelik yükselme zamanı üretecek şekilde sürece etki ettiği görülmektedir. Her iki MRAC ile yapılan denetimin ardından, PID denetleyicilerle aynı yükselme zamanı değeri elde edilse de, oluşan yerleşme zamanı değerleri PID denetimindekilerden daha düşüktür.



Şekil 5.10 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde MRAC denetimi sistem çıkışları



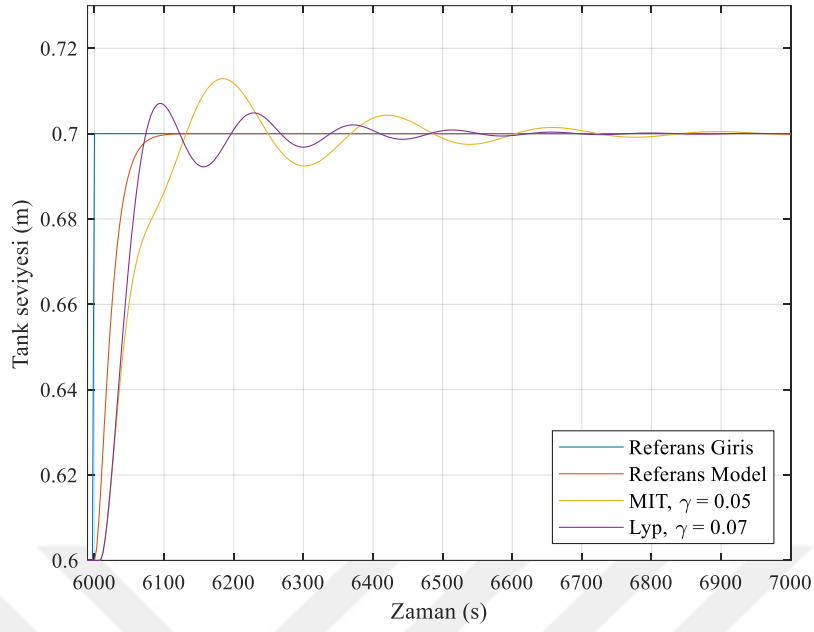
Şekil 5.11 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde MRAC uyarılama parametreleri.

Şekil 5.11’de, denetimin ilk anından başlayan θ uyarılama parametrelerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Denetimin ilk anında boş olan tanktaki referans seviye işareti 0 metreden 0.5 metreye yükseltildiğinde, referans model çıkış işareti y_m ile sistem çıkışı işareti y_p arasındaki hata aniden yükselir. Bu durumda, θ uyarılama parametreleri, MIT ve Lyapunov kurallarına göre ve γ uyarılama hızı katsayısı değeri ile orantılı bir hızda değişmeye başlar.

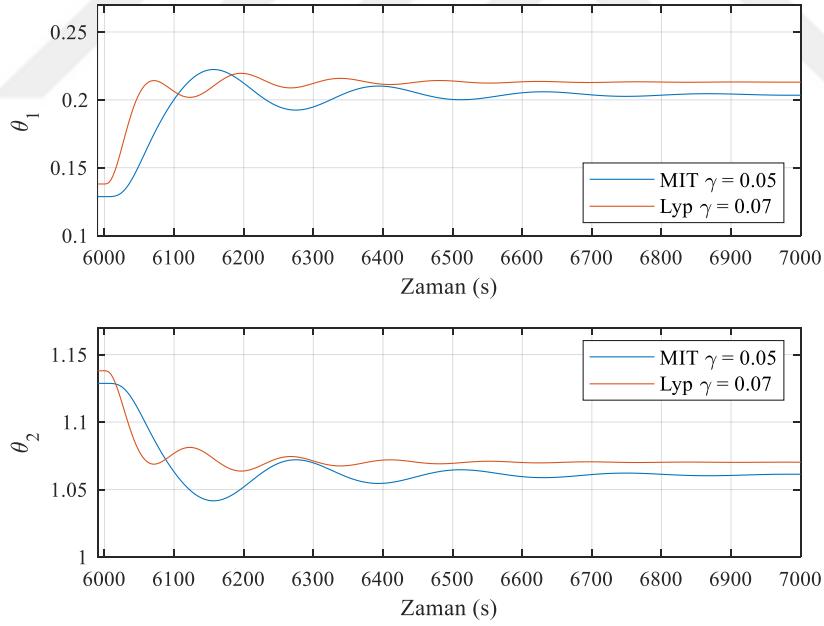
Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılan denetimde tank seviyesi, referans seviye ve referans model çıkış işaretine 288. saniyede eşitlenmektedir. MRAC uyarlama algoritması, referans model çıkışı ile sistem çıkışı arasındaki hatayı minimize edecek olan denetim işaretini oluşturan uyarlama parametrelerini üretmeyi sağlar. Bu tanım gereği Lyapunov kuralı tabanlı MRAC denetimindeki uyarlama parametreleri y_m ile y_p arasında hata olduğu 0. saniyede uyarlanmaya başlar. Uyarlama parametrelerinin değer değişimi, hata değerinin 0'a yakınsadığı 288. saniyeye kadar devam etmektedir. Aynı durum MIT kuralı tabanlı MRAC'ta 0 ile 236. saniyeler arasında gerçekleşmektedir.

Denetimin ikinci bölümünde referans seviye işareti 0.5 metreden 0.6 metreye artırıldığında, referans model çıkışı değişerek 2100. saniyede 0.6 metre değerine yakınsar. MIT kuralı tabanlı MRAC, 115 saniyelik yükselme zamanı, 378 saniyelik yerleşme zamanı ve %7.8 aşım değeri ile denetimi sağlar. Bu bölümde Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, MIT kuralı tabanlı MRAC'a göre daha başarılı hareket eder ve 62 saniyelik yükselme zamanı, 143 saniyelik yerleşme zamanı ve %0.3 aşım değeri ile seviye denetimini sağlar. Denetimin ikinci bölümünde referans giriş işaretinin değişimi ardından referans model çıkışı ile tank seviyesi arasındaki hata tekrar artar. Bu andan itibaren her iki MRAC'ın uyarlama parametreleri hatayı minimize edecek θ uyarlama parametrelerini üretmeye çalışır. Denetimin 2000. saniyesinde başlayan θ değişimi, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 2208. saniyede, MIT kuralı tabanlı MRAC için 2538. saniyede sona erer.

Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim çalışmasının bozucu uygulanmış bölümü olan üçüncü kısımda referans seviye 0.6 metreden 0.7 metreye yükselmektedir. MIT kuralı tabanlı MRAC, 90 saniyelik yükselme zamanı, 564 saniyelik yerleşme zamanı ve %12 aşım miktarı ile seviye denetimini sağlamaktadır. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, denetimin üçüncü bölümünde de MIT kuralı tabanlı MRAC'a göre daha iyi performans göstererek seviye denetimini, 44 saniyelik yükselme zamanı, 375 saniyelik yerleşme zamanı ve %7 aşım ile sağlar. Denetimin üçüncü bölümünde de referans değişimi ardından referans modelin çıkış işaretinin değişmesi ile θ uyarlama parametrelerinin değeri tekrar değişmeye başlar. MIT kuralı tabanlı MRAC, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'a göre 189 saniye daha uzun yerleşme zamanı değeri oluşturmaktadır. Bununla orantılı olarak, MIT kuralı tabanlı MRAC'taki θ uyarlaması da Lyapunov kuralı tabanlı MRAC θ uyarlamasından yaklaşık 189 saniye daha uzun sürmektedir.



Şekil 5.12 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde MRAC denetimi sistem çıkışları.



Şekil 5.13 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, dış bozucu bölgesinde MRAC uyarılma parametreleri.

Çizelge 5.2, gaz yıkayıcı tank seviyesinin MRAC ile denetimi neticesinde elde edilen verilerin bir kısmını içermektedir. Veriler, γ uyarılma hızı katsayısının MRAC performansına etkilerini gösterecek şekilde seçilmiştir. Çizelgedeki verilere göre, γ 'nın 0.002 gibi küçük değerlerinde yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerleri, γ 'nın 0.02 ile 0.08 arasında olduğu

durumlardakine göre daha büyüktür. Çünkü γ 'nın küçük değerleri için uyarlama yavaştır ve θ uyarlaması ile hatayı minimize edecek olan denetim işaretini elde etmek uzun zaman almaktadır. Buna karşılık γ değerinin artması ile θ uyarlaması ile birlikte denetim işaretinin birim zamandaki değişimi de hızlanmakta ve sistem salınıma girmektedir. Çizelgedeki veriler, gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi probleminde geleneksel MRAC kullanımı, Bölüm 2'de anlatıldığı gibi bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC kullanımının gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 5.2 Gaz yıkayıcı tankı seviye denetim çalışmasında MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC kullanımı sonucunda 2000 ile 4000. saniyeleri arasında oluşan denetim performans parametreleri.

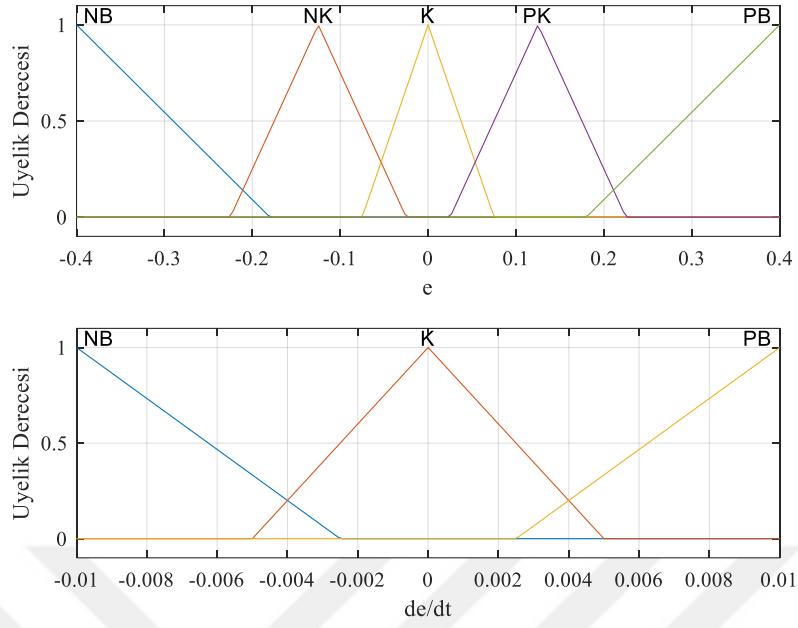
γ	Yükselme Zamanı		Yerleşme Zamanı		En Yüksek Aşım (%)		RMS Hata (%)	
	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov	MIT	Lyapunov
0.002	2373	2384	2371	2425	0	0	2.67	2.65
0.02	230	239	392	465	0	0	1.34	1.31
0.04	133	130	302	215	4.39	0	1.23	1.18
0.08	85.9	56.1	766	96.9	16.55	0.45	1.21	1.10
0.12	68.16	46.82	2400	368	43	7.47	2.74	1.08

5.5 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ BULANIK TABANLI KAZANÇ DÜZENLEMELİ MRAC DENETİMİ

Gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi için MIT veya Lyapunov kuralı tabanlı MRAC tasarlamak için öncelikle sistemin çalışması hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Buna göre yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en yüksek aşım değeri gibi denetim isterleri tespit edilir. İsterlerin belirlenmesinin ardından bu isterleri sağlayan bir referans model belirlenerek MRAC tasarımının bir kısmı tamamlanır. MRAC tasarımını tamamlamak için γ uyarlama hızı katsayısı değerinin de belirlenmesi gerekmektedir. **Çizelge 5.2**'deki verilere göre γ 0.12 olduğunda, her iki MRAC da en hızlı yükselme zamanı değerini üretmektedir. En iyi yerleşme zamanını elde etmek için, MIT kuralı tabanlı MRAC'ın γ değeri 0.04, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için γ değeri 0.08 olmalıdır. En düşük aşım değerini elde etmek için ise her iki denetleyicinin γ değerlerinin 0.002 veya 0.02 olması gereklidir. Bu bilgiler, MRAC tasarımında ideal γ değeri tespitinin zor olduğunu göstermektedir. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'deki veriler incelendiğinde, MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların denetimin her üç bölümünde de birbirinden farklı denetim performansı değerleri ürettiği görülmektedir. Örneğin denetimin

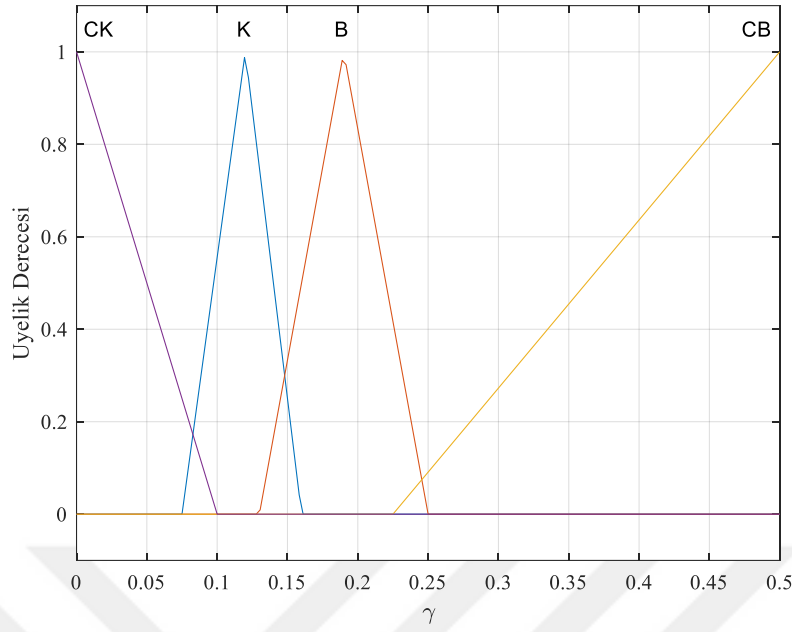
birinci bölümünde MIT kuralı tabanlı MRAC için aynı γ değeri için yerleşme zamanı 256 saniye iken, denetimin ikinci bölümünde yerleşme zamanı 567 saniye olmaktadır. Bu durum Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için de geçerlidir. Aslında gaz yıkayıcı tankı seviye denetim çalışma ortamının her üç zaman bölümü de denetleyiciler için farklı koşullar içermektedir. Denetim çalışmasının birinci bölümünde, henüz MRAC uyarlama algoritmaları yakınsamaya başlamamış ve sistem hakkında bilgi sahibi değildir. Bu aşamada θ 'ların uyarlaması ve ideal değerlerine yakınsaması için zamana ihtiyaç vardır. Denetimin ikinci kısmında referans seviye işareti değişmekte ve tank sistemi için belirli bir değere yakınsamış olan θ 'lar bir önceki ideal durumdan yeni ideal duruma yakınsamaya çalışmaktadır. Denetimin üçüncü bölümünde ise dış bozucu etkisinde olan ve θ 'ları önceki bölümlerden daha farklı bir yere yakınsamış olan MRAC'lar, referans giriş işaretinin değişimi ile θ 'larını yeni hedefe yakınsatmaya çalışır. Denetimin her üç aşamasında, mevcut θ 'ların ideal θ 'lara yakınsaması için gerek süre birbirinden farklıdır. Bu da her üç bölgede de denetim performansında farklılıklar olacağını göstermektedir.

Burada tanımlanan yakınsama problemlerinin önüne geçmek için denetimin her anında, sistemde oluşan her farklı koşul için farklı γ uyarlama hızı katsayısı tespiti gerekmektedir. Bu çalışmada, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımı ile denetleyici performansının artırılması önerilmektedir. Buna göre gaz yıkayıcı tank seviyesi denetimini bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ile yapmak için Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'teki giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Bulanık tabanlı kazanç düzenleme, iki tane giriş işaretine sahiptir. Bu işaretler referans model ile sistem çıkışı arasındaki hata ve bu hatanın zamana göre değişim değerleridir.



Şekil 5.14 Gaz yakayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımında kullanılan bulanık kural giriş üyelik fonksiyonları.

Hatayı ifade eden giriş üyelik fonksiyonlarında eğer hata değeri, ± 0.075 değerleri arasında ise, üyelik fonksiyonu küçük olarak tanımlıdır. Hata değeri, 0.022 ile 0.22 arasında ise üyelik fonksiyonu pozitif küçük olarak tanımlıdır. Hata değeri 0.18 değerinden büyükse, üyelik fonksiyonu pozitif büyük olarak tanımlıdır. Hatanın -0.022 ile -0.22 arasında olması durumunda üyelik fonksiyonu negatif küçük, hatanın -0.18'den küçük olması durumunda ise üyelik fonksiyonu negatif büyük olarak tanımlıdır. Hatanın zamana göre değişimini ifade eden üyelik fonksiyonlarında eğer hatanın zamana göre değişimi ± 0.005 arasında ise üyelik fonksiyonu küçük olarak tanımlıdır. Hatanın zamana göre değişimi 0.0025'ten büyükse üyelik fonksiyonu pozitif büyük, -0.0025'ten küçükse üyelik fonksiyonu negatif büyük olarak tanımlıdır. MRAC'ın uyarılama hızının bulanık tabanlı kazanç düzenlemesi için 4 adet çıkış üyelik fonksiyonu tanımlıdır. Şekil 5.15'te görülen çıkış üyelik fonksiyonları, γ 'ın 0 ile 0.1 arasındaki değerleri için çok küçük, 0.075 ile 0.16 arasındaki değerleri için küçük, 0.13 ile 0.25 arasındaki değerleri için büyük ve 0.225'ten büyük değerleri için çok büyük olarak tanımlıdır.



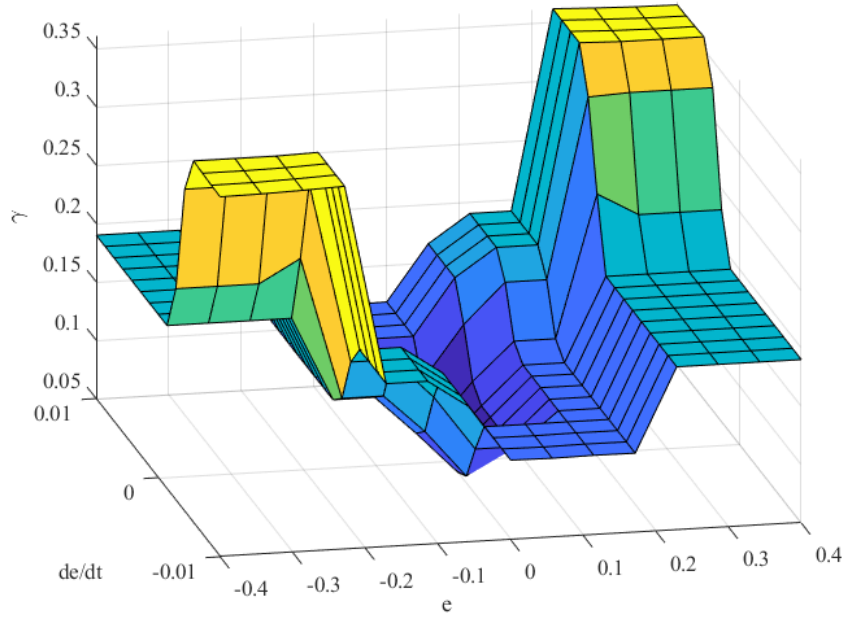
Şekil 5.15 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımında kullanılan bulanık kural çıkış üyeliği fonksiyonları.

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te görülen giriş ve çıkış üyeliği fonksiyonları, **Çizelge 5.3**'teki kurallar ile değerlendirilmektedir. Kurallar neticesinde oluşan sonuçlar, endüstride kendisine kullanım alanı bulan Mamdani çıkarım yöntemi ile değerlendirildikten sonra, ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile çıkış işareti elde edilmektedir. Kuralları oluştururken, sistemin denetimi hakkında tecrübeye sahip olmak gerekmektedir. Sistem üzerindeki tecrübeler ile o sistemdeki hatanın ve hatanın zamana göre davranışının değerlendirmesi yapılarak kurallar belirlenir. Örneğin gaz yıkayıcı tank seviyesi denetim sisteminde hatanın pozitif büyük olması durumunda, hatanın zamana göre değişimi de pozitif büyük değere sahipse, zaten değeri büyük olan hatanın hızla artmaya devam ettiği anlaşılır. Bu durumda uyarılamanın hızlanarak, uygun denetim işaretini hızlıca üretmesi gerekmektedir. Denetim işaretinin sisteme etkisinin ardından hata değeri pozitif büyük durumdan küçük duruma geçtiğinde hatanın artış hızının azaldığı anlaşılır ve γ 'nın değeri düşürülerek uyarılama yavaşlatılır. Eğer bu durumda da γ değeri çok büyük seçilirse, uyarılama hızla artmaya devam eder ve ataleti azalmış olan hata artış hızı zamanla negatif değerlere yakınsar ve hata değeri azalmaya başlar. Böylesi bir durum sistem çıkışını salınıma sokar. Salınımı engellemek için, hatanın ve hatanın zamana göre değişiminin küçük olduğu durumlarda γ 'yı küçültmek gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında oluşturulan kural tablosu **Çizelge 5.3**'te bulunmaktadır.

Çizelge 5.3 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık kurallar.

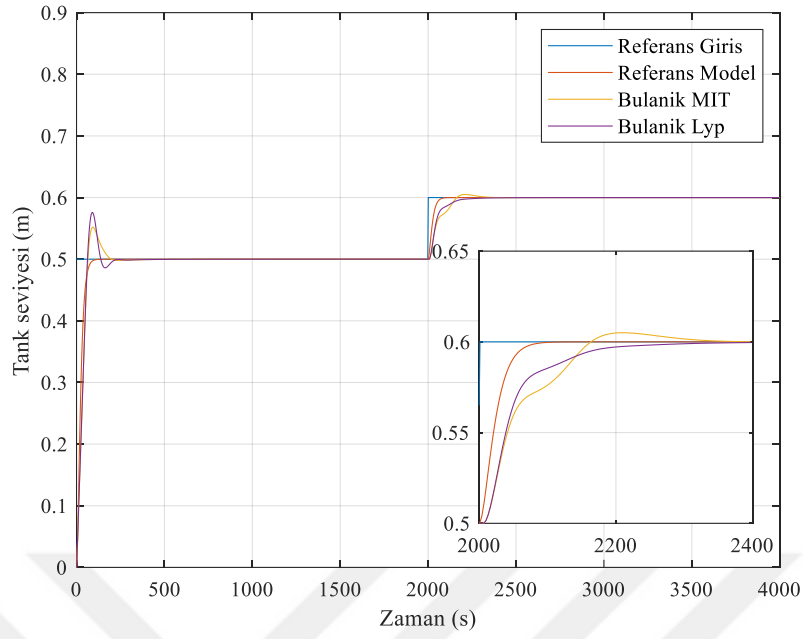
Kural No	e	İşlem	$\frac{de}{dt}$	Sonuç
1	NB	VE	NB	CB
2	PB	VE	PB	CB
3	NK	VE	NB	B
4	NP	VE	PB	B
5	NB	VE	K	B
6	NP	VE	K	B
7	NK	VE	K	K
8	PK	VE	K	K
9	NB	VE	PB	B
10	PB	VE	NB	B
11	NK	VE	PB	K
12	PK	VE	NB	K
13	K	VE	NB	K
14	K	VE	PB	K
15	K	VE	K	CK

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'teki üyelik fonksiyonları, Çizelge 5.3'teki kurallar ile değerlendirildiğinde Şekil 5.16'daki karar yüzey grafiği elde edilmektedir. Yüzey grafiğinde, hata ve hatanın zamana göre değişimi değerlerin küçük olması durumunda γ değerinin de çok küçük olarak seçildiği görülmektedir. Buna ek olarak, hata ve hatanın zamana göre değişimi pozitif büyük olduğunda ve γ , bulanık kurallarda tanımlı en büyük değere yakınsamaktadır. Aynı durum hata ve hatanın zamana göre değişiminin negatif büyük olduğunda da geçerlidir. Bunun dışında hatanın pozitif küçük ve negatif küçük olma durumları da kendi içlerinde hatanın zamana göre değişimi verilerine göre değerlendirilmektedir.



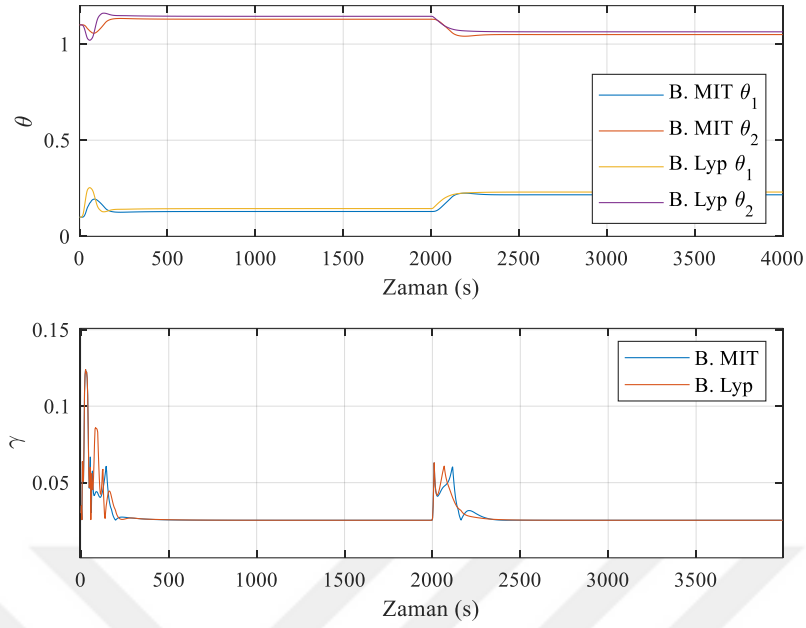
Şekil 5.16 Gaz yakayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC tasarımı bulanık tabanlı kural mekanizması.

Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve **Çizelge 5.3**'te tanımlanan bulanık karar alma mekanizması kullanılarak, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan MRAC'lar, gaz yakayıcı tank seviye denetim sisteminde kullanılmıştır. Yapılan denetim çalışmaları neticesinde elde edilen veriler, Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de bulunmaktadır. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'deki veriler, denetim çalışmasının ilk iki bölümünü göstermektedir. Denetimin başladığı 0 saniye anında, referans seviye değerinin değişmesi ile referans model, referans seviyeye yakınsamaya başlar. Bu durumda sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki hata artmaya başlar. Hatanın ve hatanın zamana göre değişiminin artması ile γ değeri artar. Uyarılama hızındaki artış ile birlikte uyarılama süreci başlayan θ 'lar, her iki denetleyici için de kalıcı durum hatasının sonlandığı 400. saniyeye kadar ideal değere yakınsamaya çalışır. Bu aşamada bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, 49 saniyelik yükselme zamanı, 164 saniyelik yerleşme zamanı ve %10 aşım miktarı ile denetimi sağlamaktadır. Denetimin ilk bölümünde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 48 saniyelik yükselme zamanı, 183 saniyelik yerleşme zamanı, %15 aşım miktarı ile denetimi sağlamaktadır.



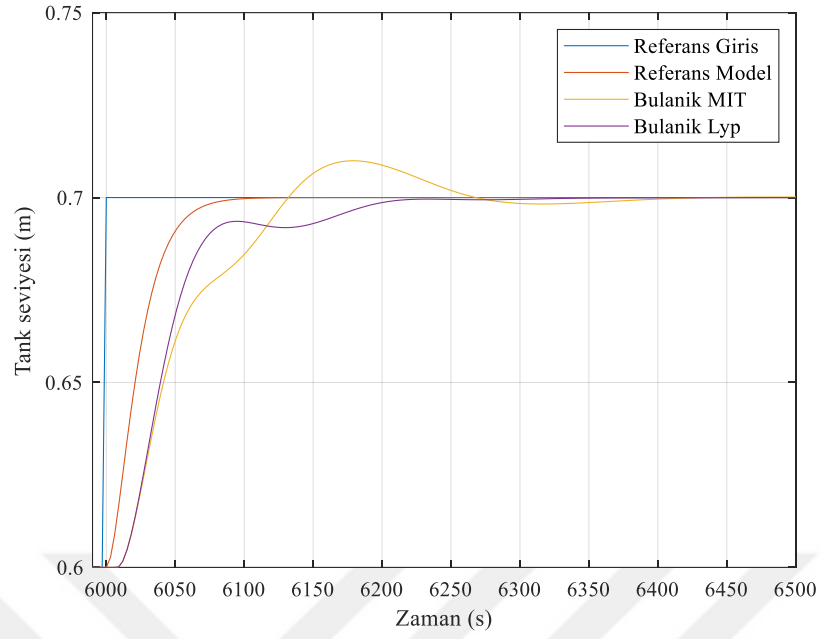
Şekil 5.17 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi sistem çıkışları.

Denetimin ikinci bölümünde, referans seviye değerinin 0.5 metreden 0.6 metreye yükseltilmesi ile hatanın minimum olduğu durumda değeri 0.0254 olan γ , referans model çıkışının artması sebebiyle yükselen hata ve hatanın zamana göre değişim hızı değerine bağlı olarak artarak her iki denetleyici için de 0.06 değerine kadar yükselir. γ 'nın artışı ile hızlanan uyarılama sayesinde üretilen denetim işareti sürece, hatayı düşürücü yönde etki eder ve MRAC'lar denetimi sağlar. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC denetimin ikinci zaman bölgesinde, 119 saniyelik yükselme zamanı, 289 saniyelik yerleşme zamanı ve %5 aşım ile denetimi sağlarken, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 112 saniyelik yükselme zamanı, 203 saniyelik yerleşme zamanı ve %0 aşım ile denetimi sağlamaktadır.

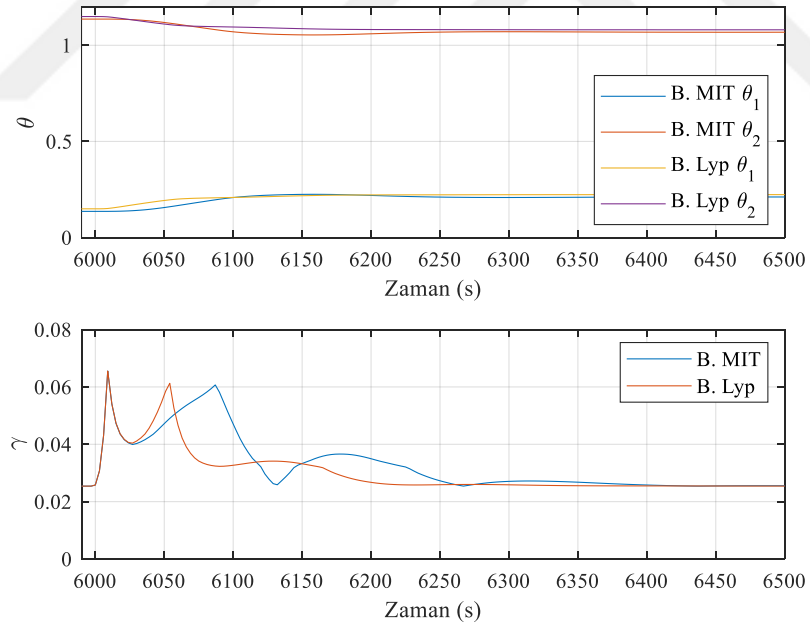


Şekil 5.18 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi γ ve θ değişimleri.

Gaz yıkayıcı tank seviyesi denetiminin, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ile yapılmasının ardından elde edilen veriler Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de bulunmaktadır. Referans seviye değerinin, denetimin 6000. saniyesinde 0.6’dan 0.7’ye yükseltilmesi ile artmaya başlayan hata değeri sebebiyle kalıcı durum hatasının minimum olduğu durumda 0.0254 olan γ değeri, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC için 0.061, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 0.066 değerine kadar yükselir. γ değerinin yükselmesi ile uyarlama hızı artan uyarlama parametreleri, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC için 6300. saniyeye, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için 6100. saniyeye kadar devam etmektedir. Uyarlama, her iki denetleyici için de kalıcı durum hatalarının minimuma indiği anlara denk gelmektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, denetim çalışmasının üçüncü bölümünde 93 saniyelik yükselme zamanı, 249 saniyelik yerleşme zamanı ve %10 aşım miktarı ile denetimi sağlamaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, denetim çalışmasının üçüncü bölümünde 55 saniyelik yükselme zamanı, 191 saniyelik yerleşme zamanı, %0 aşım ile denetimi sağlamıştır.



Şekil 5.19 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi, dış bozucu bölgesi sistem çıkışları.



Şekil 5.20 Gaz yıkayıcı tank seviye denetim probleminde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi, dış bozucu bölgesi γ ve θ değişimleri.

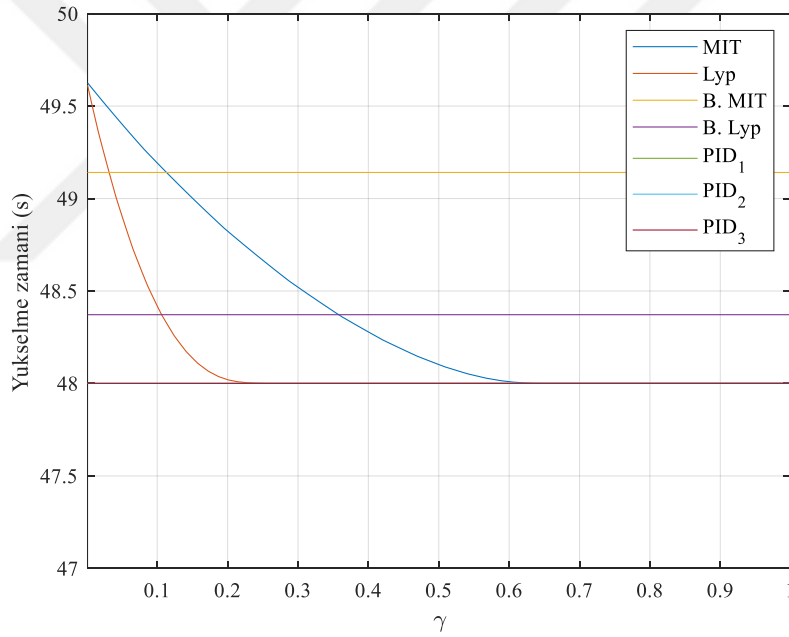
5.6 GAZ YIKAYICI TANK SEVİYESİ DENETİM ÇALIŞMALARI SONUÇLARI

Gaz yıkayıcı tankı seviye denetiminde, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC kullanımı geleneksel MRAC ve PID kullanımı yapılmıştır. Yapılan denetim çalışmalarında elde edilen zamana bağlı veriler Bölüm 5.3, Bölüm 5.4 ve Bölüm 5.5'te incelenmiştir. Bu şekillerdeki verilere göre MRAC ve geleneksel PID'nin bir sanayi tesisindeki performansını zamana bağlı değerlendirmek mümkündür. Bununla birlikte, yapılan her bir denetim çalışmasından elde edilen verilere göre belirlenen denetim performansı verileri, denetleyicilerin karşılaştırılması açısından faydalı bilgiler vermektedir. Buna göre gaz yıkayıcı tank seviyesi denetiminin ilk zaman bölümünde elde edilen denetim performansı verileri, Şekil 5.21 ,Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te bulunmaktadır.

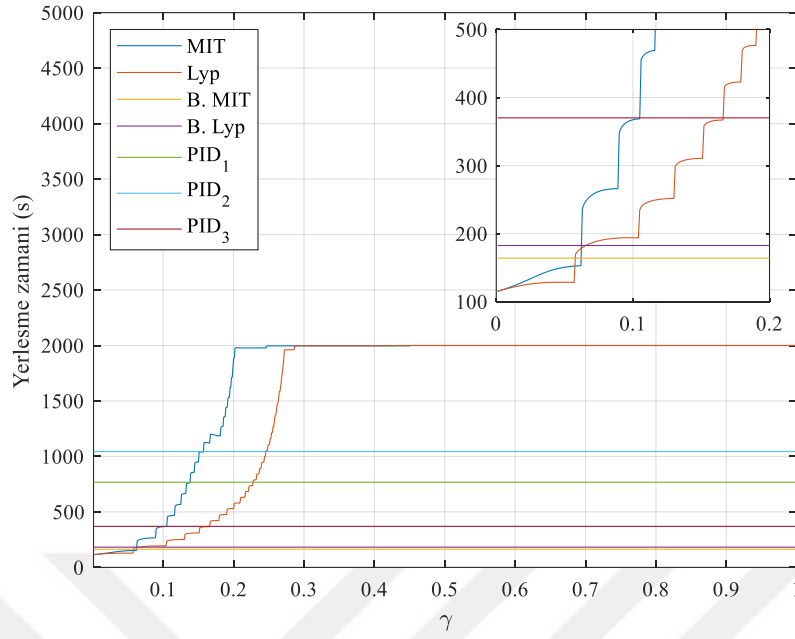
Şekil 5.21'de, denetim çalışmalarında oluşan yükselme zamanı verileri vardır. Geleneksel MRAC MIT ve Lyapunov uyarlama kuralı tabanlı MRAC'lar, γ 'nın 0.01 olduğu durumda 49.6 saniye değerinde yükselme zamanı ile denetimi sağlamışlardır. γ değerinin artırılması ile her iki MRAC denetiminde de yükselme zamanında düşüş olmaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC, γ değerinin 0.6 olması durumunda, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, γ değerinin 0.21 olması durumunda kendilerinin en hızlı yükselme zamanı olan 48 saniye değerine sahip olmaktadır. Geleneksel MRAC'ların yükselme zamanı verilerine karşılık bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, 49.1 saniye, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 4.4 saniye, PID denetleyiciler de 48 saniye yükselme zamanı ile denetimi sağlamaktadır.

Şekil 5.22'de, gazı yıkayıcı tankı seviye denetimi çalışmalarında oluşan yerleşme zamanı verileri bulunmaktadır. Buna göre geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar, γ 'nın 0.001 olması durumunda 115.3 saniye ile en hızlı yerleşme zamanı değeri ile denetimi sağlamaktadır. γ değerinin 0.06'dan daha yukarı çıkması ile her iki geleneksel MRAC'ın oluşturduğu yerleşme zamanı değeri de büyük bir hızla artmaktadır. Geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde γ değeri 0.45 olduğunda, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta ise γ değeri 0.43 olduğunda yerleşme zamanı 2000 saniye olmaktadır. Denetimin ilk bölümünde denetim performansı verileri, 0 ile 2000. saniyeler arasında yapılmaktadır. Buna göre yerleşme zamanı 2000 saniye olan örnekler, denetleyicinin bu süre boyunca kalıcı durum hatasını yerleşme bölgesi içerisine getiremediğini göstermektedir. Şekil 5.21'de MIT kuralı tabanlı

MRAC için γ 'nın 0.6'dan, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için ise 0.21'den büyük olması en iyi yükselme zamanı değerine yakınsamayı sağlamaktadır. Ancak γ 0.6 seçildiğinde MIT kuralı tabanlı MRAC denetiminde sistem referans değere yerleşememektedir. γ 0.21 olarak seçildiğinde Lyapunov kuralı tabanlı MRAC yerleşme zamanı ise, 529 saniye ile işletme isterinden çok büyük bir değer ile en iyi 4. zaman olmaktadır. Bununla birlikte bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC 163,9 saniye, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC 182.6 saniye değerindeki yerleşme zamanı ile geleneksel MRAC'ların en iyi performanslarına göre sırasıyla 1.42 ve 1.58 kat daha yavaş sürede denetimi sağlamaktadır. Geleneksel PID'ler içinde PID₃, 370 saniye ile en hızlı yerleşme zamanı değerine sahiptir. Bu değerlere ek olarak PID₁, 767, PID₂ de 1044 saniye ile diğer tüm denetleyicilerden çok daha yavaş yerleşme zamanı ile denetimi sağlamaktadır.

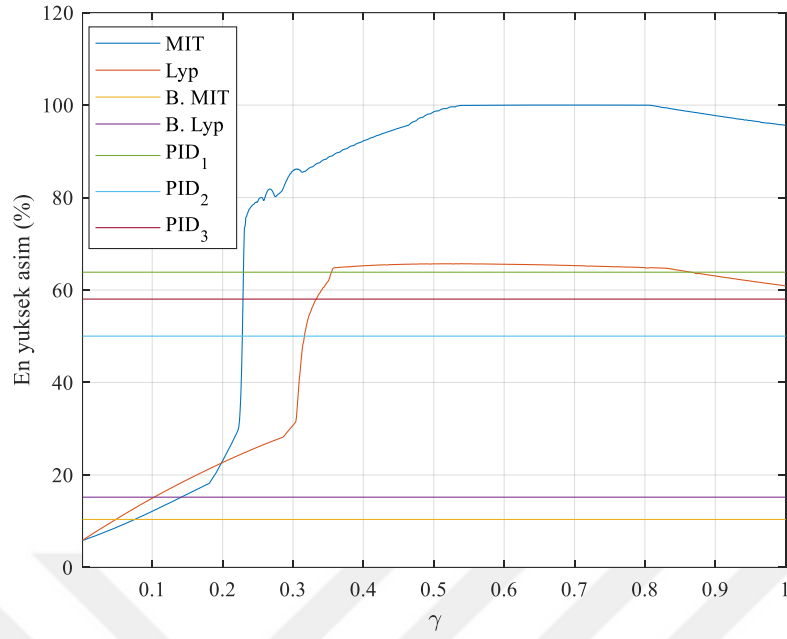


Şekil 5.21 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde yükselme zamanları.

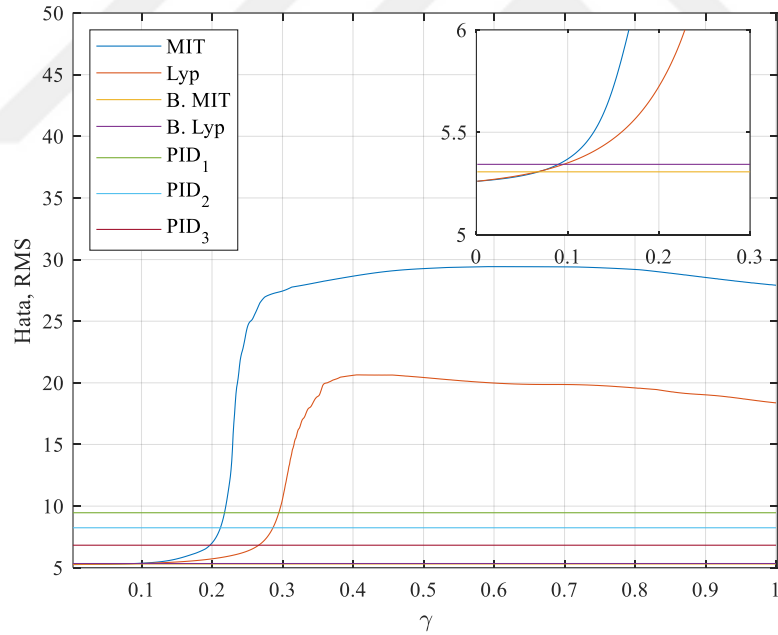


Şekil 5.22 Gaz yakayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde yerleşme zamanları

Şekil 5.23'te, γ 'nın 0.01 olması durumunda geleneksel MRAC'ların her ikisinin ürettiği aşım miktarı da %5.8 olmaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC'ta γ 'nın değeri 0.076'yı geçtiğinde aşım %10.44 ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC'tan, γ 'nın değeri 0.142'yi geçtiğinde aşım %15.23 ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'tan daha büyük değere sahip olmaktadır. Benzer şekilde Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ta γ 'nın değeri 0.049'u geçtiğinde aşım %10.38 değeri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC'tan, γ 'nın değeri 0.104'ü geçtiğinde aşım %15.30 değeri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'tan daha büyük olmaktadır. Her iki geleneksel MRAC için de γ değerinin yükseltilmesi ile birlikte aşım miktarları artmaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC, γ değeri 0.228'i geçtiğinde, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC da γ değeri 0.3170'i geçtiğinde bulanık tabanlı MRAC ve PID'lerden daha büyük aşım değeri üretmektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, %10.37 değeri ile birinci, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC da %15.19 değeri ile ikinci en iyi performans sergilemektedir. Geleneksel PID'ler ise sırasıyla %63, %50 ve %58 aşım değerleri ile bulanık tabanlı MRAC ve γ değeri küçük seçilen geleneksel MRAC'lardan daha kötü performans göstermektedir.



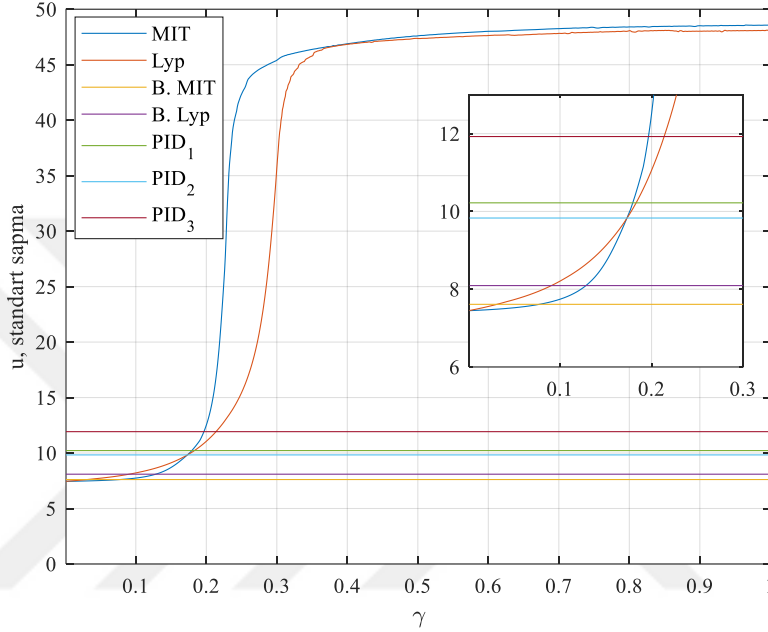
Şekil 5.23 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde aşım miktarları.



Şekil 5.24 Gaz yıkayıcı denetimi, birinci zaman bölümünde RMS hata değerleri.

Şekil 5.24'te, yapılan denetim çalışmaları neticesinde oluşan sistem hatası RMS değerleri bulunmaktadır. Geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ değeri 0.01 ile 0.069 arasındayken bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve geleneksel PID'lerden daha düşük hata değeri ile denetimi sağlamaktadır. Ancak γ 'nın 0.1'den 1'e doğru yükseltilmesi ile MIT kuralı tabanlı MRAC'ın sebep olduğu hata hızlı bir şekilde artışa geçerek %29 değerine yakınsamaktadır.

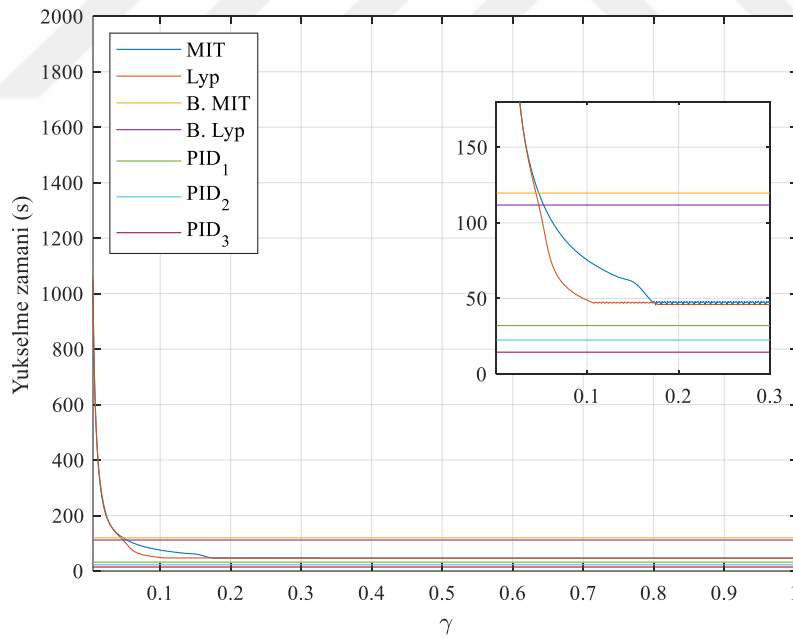
Benzer durum Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için de geçerlidir. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, γ değeri 0.01 ile 0.064 arasındayken bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ve geleneksel PID'lerden daha düşük hata değeri ile denetimi sağlamaktadır. Ancak γ 'nın 0.1'den 1'e doğru yükseltilmesi ile Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın sebep olduğu hata hızlı bir şekilde artışa geçerek %18 değerine yakınsar.



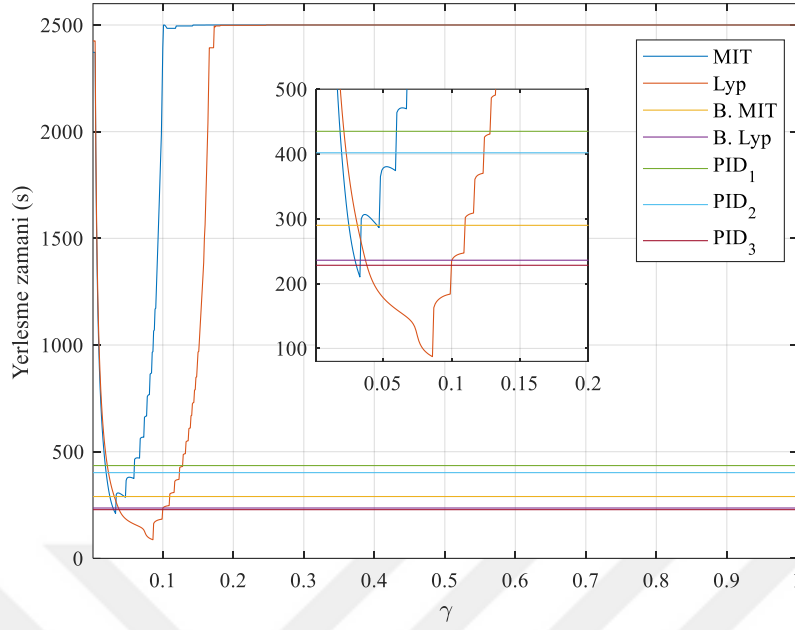
Şekil 5.25 Gaz yakayıcı tank seviye denetimi, birinci zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları.

Şekil 5.25'te denetimin birinci bölümünde yapılan denetim çalışmalarında denetleyicilerin ürettiği denetim işaretinin standart sapma değeri bulunmaktadır. Şekildeki verilere göre MIT kuralı tabanlı MRAC γ 'nın 0.075'ten küçük değerleri, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise γ 'nın 0.03'ten küçük değerleri ile yapılan tasarımlar için en iyi performansı göstermektedir. Her iki denetleyicide de γ 'nın daha büyük değerleri ile yapılan tasarımlar, denetim işareti standart sapma değerinin %48'e yakınsamasını, denetim işaretinin yaklaşık olarak 0 ve 1 arasında salınım yapmasına sebep olmaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların ürettiği denetim işaretlerinin standart sapma değerleri ise sırasıyla %7.61 ve %8.09 'dur. Geleneksel PID'ler ise sırasıyla %10.22, %9.83 ve %11.93 standart sapma değerine sahip olan denetim işaretleri üretmektedir.

Denetimin birinci zaman bölgesinde, geleneksel ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ların uyarlama parametrelerinin, sistem özelinde ideal değerlerine yakınsamalarının ardından, referans seviye değeri 0.5'ten 0.6'ya yükseltilmektedir. Bu durumda oluşan denetleyici performansları, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da bulunmaktadır. Şekil 5.26'da, γ 'nın 0.048'den küçük değerleri için MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.046'ten küçük değerleri için de Lyapunov kuralı tabanlı MRAC en yavaş yükselme zamanı değerleri ile denetimi sağlamaya çalışmaktadır. γ değerinin artırılarak 0.167 olarak belirlenmesi ile MIT kuralı tabanlı MRAC, 0.096 olarak belirlenmesi ile de Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 50 saniyeden daha hızlı yükselme zamanı değerleri ile denetimi sağlamaktadır. Denetimin bu bölümünde bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC 119 saniye, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise 111 saniyelik yükselme zamanı ile denetim sağlamaktadır. Bu bölümde PID denetleyiciler, sırasıyla 32 saniye, 22 saniye ve 14 saniye ile her iki tip MRAC'tan çok daha hızlı yükselme zamanı değeri üretmektedir.

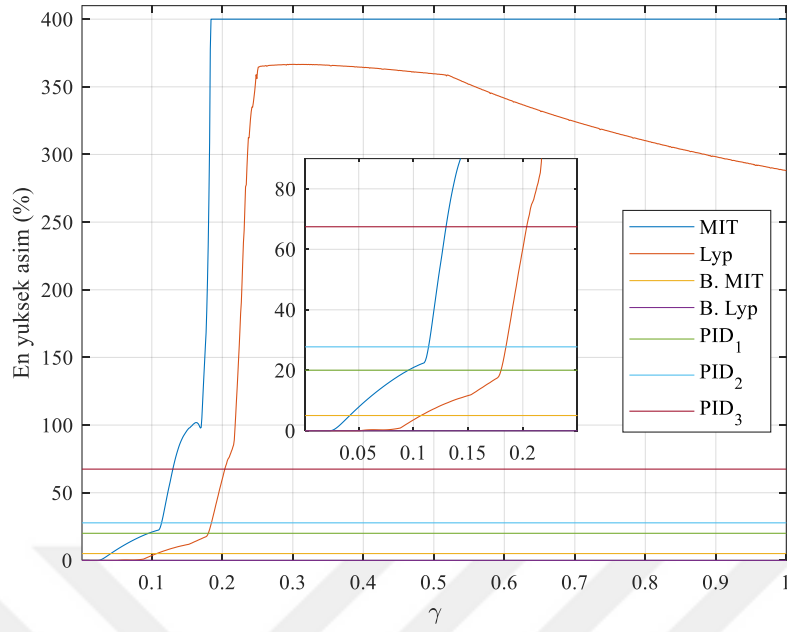


Şekil 5.26 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde yükselme zamanları.



Şekil 5.27 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde yerleşme zamanları.

Denetimin ikinci bölümünde yükselme zamanı bakımından diğer denetleyicilerden çok daha hızlı olsa da Şekil 5.27, PID'lerin yerleşme zamanı konusunda benzer performansa sahip olmadığını göstermektedir. PID₁, 434 saniye, PID₂ ise 401 saniye değeri ile en yavaş yerleşme sağlayan iki denetleyici olurken PID₃, 228 saniyelik yerleşme zamanı ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'tan %3 daha hızlı olmaktadır. Geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.033 olduğu durumda 210 saniye ile kendi en hızlı yerleşme zamanı değerine sahip olmaktadır. γ değerinin 0.025'ten küçük, 0.034'ten büyük değerleri için ise yerleşme zamanı 300 saniyeyi geçmektedir. Benzer şekilde geleneksel Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.086 olduğu durumda 87 saniye ile kendi en hızlı yerleşme zamanı değerine sahip olmaktadır. γ değerinin 0.031'den küçük, 0.109'dan büyük değerleri için ise yerleşme zamanı 300 saniyeyi geçmektedir. 300 saniye, süreç isterinin 3 katı bir değer olup, bu kadar yavaş yerleşme zamanı değeri, gerçek bir yüksek fırın üretim sürecinde, gaz yıkayıcı tankının taşması veya tamamen boşalmasına neden olacaktır.



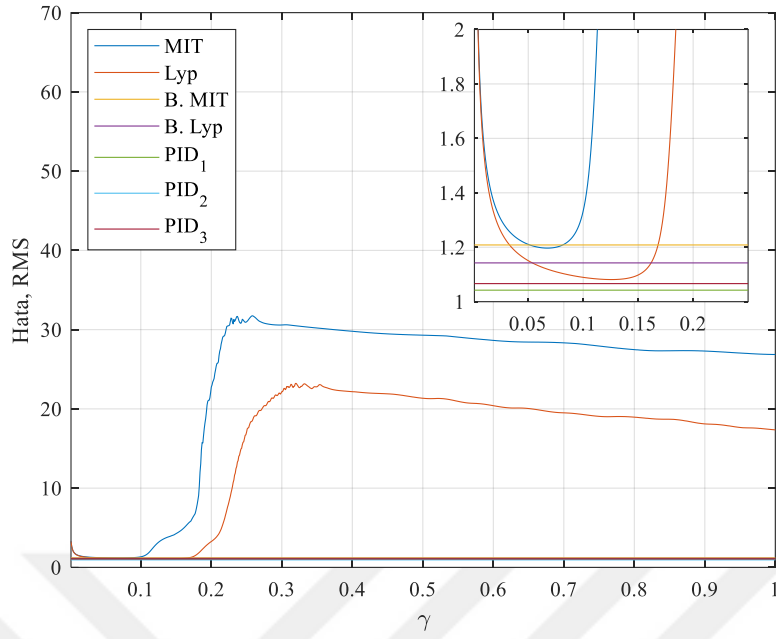
Şekil 5.28 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde aşım miktarları.

Şekil 5.28’de denetimin ikinci zaman bölgesindeki aşım değerleri bulunmaktadır. Şekildeki verilere göre MIT kuralı tabanlı MRAC, γ ’nın 0.057’den küçük olduğu durumlarda, denetim ister limiti olan %10’un altında aşım ile denetimi sağlamaktadır. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC da γ ’nın 0.137’den küçük değerleri için denetim isterlerini sağlamaktadır. Ancak her iki denetleyicinin tasarımında bu γ değeri daha da artırıldığında, aşım miktarı hızla artarak MIT kuralı tabanlı MRAC için %400, Lyapunov kuralı tabanlı MRAC için %360 değerine yakınsamaktadır. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, %5’lik aşım ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise %0 aşım ile denetimi sağlamaktadır. Denetimin ikinci bölümünde hızlı yükselme zamanı değeri ile öne çıkan PID denetleyiciler, sırasıyla %20, %27 ve %67 değerinde aşım ile denetim sağlamaktadır.

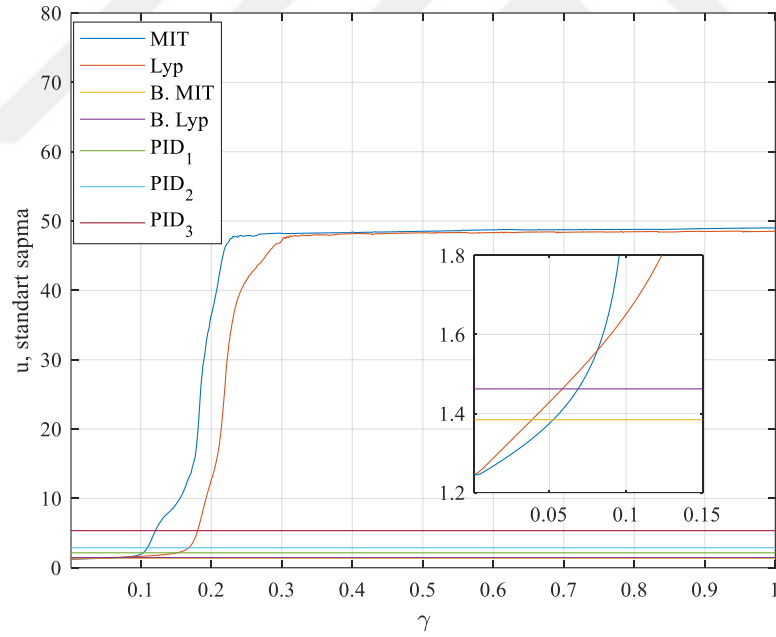
Gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi çalışmasının ikinci zaman bölümünde yerleşme zamanı ve aşım değerleri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC’ların gerisinde kalan PID’ler, yükselme zamanı konusundaki başarısı ile RMS hata değeri bakımından öne geçmektedir. Şekil 5.29’daki verilere göre en düşük RMS hata değeri %0.95 ile PID₂ denetiminde gerçekleşmektedir. PID₂’yi %1.04 ile PID₁, %1.06 ile PID₃ takip etmektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise sırasıyla %1.21 ve %1.14 değerindeki RMS hata ile denetimi sağlamaktadır. Bu verilere göre geleneksel MRAC’lar değerlendirildiğinde γ ’nın

0.005 ile 0.083 değerleri arasında olması durumunda MIT kuralı tabanlı MRAC en çok %1.21 hata ile denetimi sağlamaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC tasarımıyla elde edilen en küçük RMS hata değeri olan %1.19'u elde etmek için ise γ değeri 0.065 seçilmelidir. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC içinse γ değerinin 0.030 ile 0.17 arasında seçilmesi durumunda oluşacak RMS hata değerleri, %1.21'in altında kalmaktadır. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC tasarımıyla elde edilen en küçük RMS hata değeri olan %1.08'i elde etmek için γ 'nın 0.1 ile 0.144 arasında olması gerekmektedir.

Şekil 5.30'da denetimin ikinci bölümünde üretilen denetim işaretlerinin yüzdesel standart sapma verileri bulunmaktadır. Veriler, RMS hata değeri bakımından MRAC'ların önüne geçen PID'lerin bu denetim başarısını, yüksek standart sapma değerine sahip denetim işareti üretmek sağladığını göstermektedir. Buna göre PID denetleyiciler tarafından üretilen denetim işaretleri standart sapma değerleri sırasıyla %2.15, %2.88 ve %5.34 olarak gerçekleşmektedir. Buna karşılık bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC %1.38, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise %1.46 değerinde standart sapmaya sahip denetim işareti üretmektedir. Bu verilere göre geleneksel MRAC'lar değerlendirildiğinde γ 'nın 0.001 ile 0.103 değerleri arasında olması durumunda MIT kuralı tabanlı MRAC en çok %2.14 ile PID'lerden daha küçük standart sapmaya sahip denetim işareti üretmektedir. Benzer şekilde γ 'nın 0.001 ile 0.151 değerleri arasında olması durumunda Lyapunov kuralı tabanlı MRAC en çok %2.14 ile PID'lerden daha küçük standart sapmaya sahip denetim işareti üretmektedir.



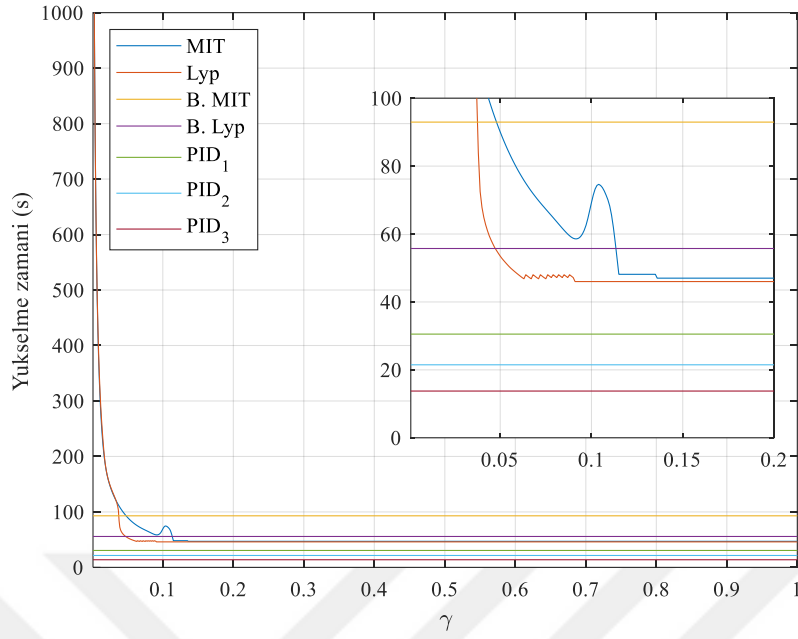
Şekil 5.29 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, ikinci zaman bölümünde RMS hata değerleri.



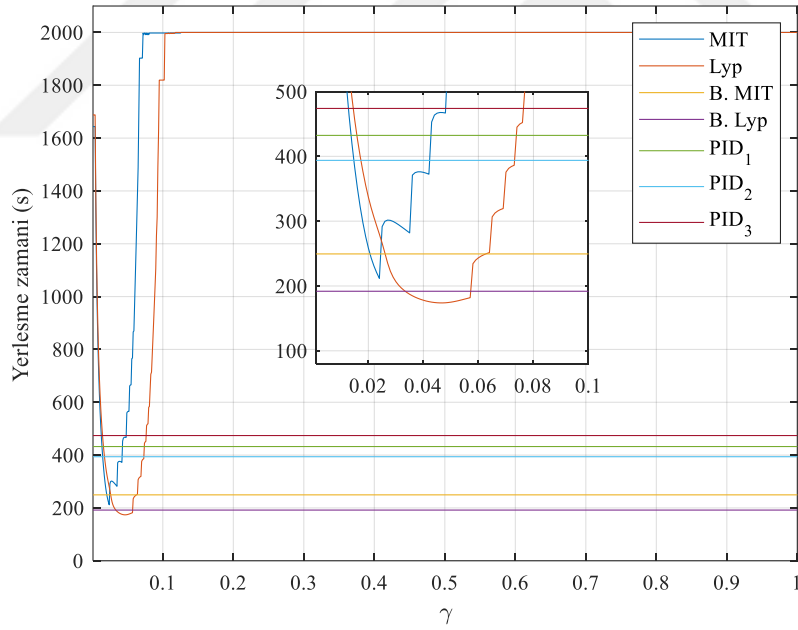
Şekil 5.30 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi denetim, ikinci zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları.

Denetimin üçüncü zaman bölümünde, dış bozucu etkisi ile dinamik cevabı değişen tank seviye denetim sisteminin referans seviye işareti, 0.6'dan 0.7'ye çıkarılmaktadır. Bu durumda elde edilen denetleyici performans verileri, Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'te bulunmaktadır. Şekil 5.31'deki veriler incelendiğinde, PID'lerin sırasıyla 30.53, 21.49

ve 12,75 saniye yükselme zamanı değerleri ile denetimi sağlamaya çalıştığı görülmektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC 92,96 saniye, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC da 55.73 saniyelik yükselme zamanı ile denetimi gerçekleştirmektedir. Denetimin ilk iki bölümünde olduğu gibi geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar, γ 'nın küçük değerleri için gerekli θ uyarlamasını sağlayamamaktadır. γ değerinin 0.047'den küçük olduğu durumlarda MIT kuralı tabanlı MRAC, 94,89 saniye, γ değerinin 0.37'den küçük olduğu durumlarda da Lyapunov kuralı tabanlı MRAC 103.04 saniye yükselme zamanı değeri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC'tan daha yavaş denetim sağlamaktadır. γ değerinin daha da artırılması, geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların her ikisinde de yükselme zamanı değerini 47 saniyeye indirmektedir. PID denetleyiciler her ne kadar denetimin her üç bölgesinde de yükselme zamanı değeri bakımından MRAC'lardan üstün performans gösterse de bu başarısını yerleşme zamanı cinsinden gösterememektedir. Denetimin üçüncü bölümünde de PID'ler sırasıyla 432,36, 393,83, 473,97 saniye yerleşme zamanı değerleri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'lardan daha yavaş denetim sağlamaktadır. Geleneksel MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.024 olması durumunda 211,75 saniye değeri ile kendisi için en hızlı yerleşme zamanına sahip olmaktadır. γ değerinin 0.028'den küçük ve 0.036'dan büyük değerleri için tasarlanan MIT kuralı tabanlı MRAC, denetimi sağlamak için 300 saniyeden daha uzun yerleşme zamanına ihtiyaç duymaktadır ve bu tasarım, gerçek bir yüksek fırın üretim sürecindeki tank seviye denetimini sağlayamayacak kadar yavaş kalmaktadır. Benzer şekilde, γ 'nın 0.047 olması durumunda Lyapunov kuralı tabanlı MRAC, 173.88 saniye değeri ile kendisi için en hızlı yerleşme zamanına sahip olmaktadır. γ değerinin 0.023'ten küçük ve 0.065'ten büyük değerleri için tasarlanan Lyapunov kuralı tabanlı MRAC da tank denetimini sağlamak için 300 saniyeden daha yavaş yerleşme zamanı değerine ihtiyaç duymaktadır.



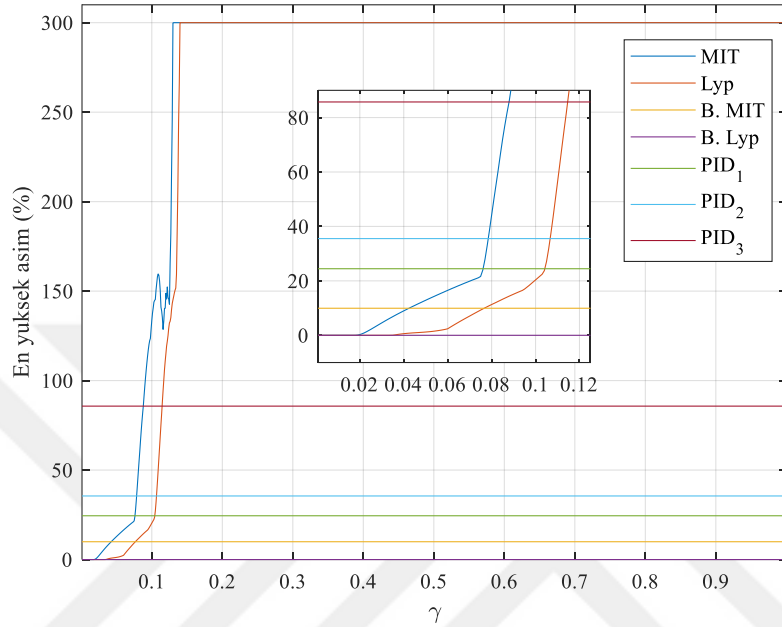
Şekil 5.31 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde yükselme zamanları



Şekil 5.32 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde yerleşme zamanları.

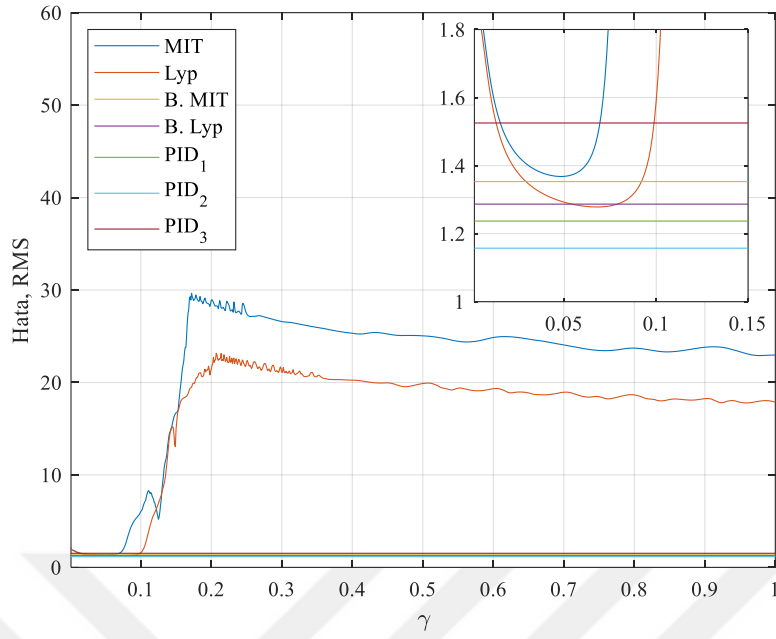
Gaz yıkayıcı tankı seviye denetiminin üçüncü bölümünde de bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'lar sırası ile %9.95 ve %0 değerindeki aşım miktarları ile diğer denetleyicilerden daha iyi performans göstermektedir. PID denetleyiciler, denetim çalışmalarının diğer bölümlerinde olduğu gibi üçüncü zaman bölümünde de büyük aşım değerlerine sebep olmaktadır. γ 'nın 0.07'den küçük değerleri için

MIT kuralı tabanlı MRAC, γ 'nın 0.11'den küçük değerleri için de Lyapunov kuralı tabanlı MRAC aşım değerleri %20'yi geçmektedir. Her iki denetleyicide de γ değerinin daha büyük değerlerinde oluşan aşım miktarı %300 olmaktadır.

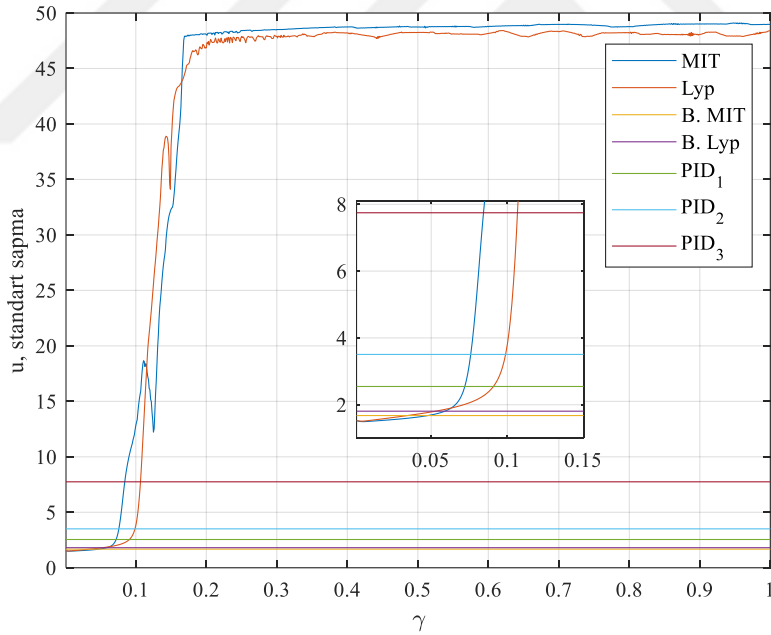


Şekil 5.33 Gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde aşım miktarları.

Denetim çalışmasının üçüncü bölümünde PID₁ ve PID₂, RMS hata bakımından sırasıyla %1.24 ve %1.16 değerleri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'lerden daha iyi performans göstermektedir. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT kuralı tabanlı MRAC, %1.35, bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli Lyapunov kuralı tabanlı MRAC ise %1.29 RMS hata ile PID'lere yakın performans sergilemektedir. Denetimin diğer bölümlerinde olduğu gibi burada da geleneksel MRAC'lar belirli γ değer aralığında PID ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC ile elde edilen performans değerlerine yakınsamaktadır. MIT kuralı tabanlı MRAC, γ değerinin 0.016 ile 0.069 değerleri arasında seçilmesi durumlarında bu bölümdeki en kötü performansa sahip olan PID₃'ten daha düşük RMS hata değeri oluşturmaktadır. Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın PID₃'ten daha düşük RMS hata ile denetimi sağlaması için ise tasarımda kullanılan γ 'nın 0.014 ile 0.098 arasında seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.34 Gaz yakayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde RMS hata değerleri.



Şekil 5.35 Gaz yakayıcı tank seviye denetimi, üçüncü zaman bölümünde denetim işareti standart sapma miktarları.

PID denetleyiciler, ikinci zaman bölümünde olduğu gibi, denetim çalışmasının üçüncü zaman bölümünde de yükselme zamanı bakımından diğer denetleyicilerden daha iyi, yerleşme zamanı ve aşım miktarı bakımından da daha kötü performans göstermektedir. Buna rağmen her iki zaman bölümünde de diğer denetleyicilerle yaklaşık aynı RMS hata değeri ile denetimi

tamamlamaktadır. Bu durumun nasıl gerçekleştiği, denetleyicilerin ürettiği denetim işaretinin standart sapma miktarını gösteren şekil 5.35 ile açıklanabilir. Diğer zaman bölümlerinde olduğu gibi üçüncü zaman bölümünde de PID denetleyiciler, MRAC'lara kıyasla çok fazla salınım yapan denetim işareti üreterek tank seviye denetimini sağlamaktadır. Geleneksel MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ların ürettikleri denetim işaretinin standart sapma değeri γ 'nın büyümesi ile artmaktadır. Buna rağmen her iki denetleyici tasarımında da γ 'nın 0.001 seçilmesi durumunda, üretilen denetim işaretinin standart sapması, %1.5 değeri ile bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MIT ve Lyapunov kuralı tabanlı MRAC'ın ürettiğinden daha büyük olmaktadır.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek fırın gaz yıkayıcı tank seviye denetimi, demir üretim süreçlerindeki önemli denetim problemlerinden biridir. Günümüzde bu denetim probleminin çözümünde PID denetleyiciler kullanılır. Yıkayıcı tank seviye denetim problemi, sürekli dış bozucu etkisi altında olduğundan, PID denetleyici tasarımlarının güncellenmesi ihtiyacı oluşur. Bu tez çalışmasında, gaz yıkayıcı tankı seviye denetiminde PID denetleyici yerine geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC kullanımı önerilmektedir. Yapılan denetim çalışmalarında geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın sahip olduğu uyarlama yaklaşımları ile denetleyici güncelleme ihtiyacını giderdiği görülmektedir.

Demir üretim süreçlerindeki denetim problemlerinin her biri, sürecin fiziksel yapısına ve çalışma amacına bağlı olarak farklı denetim isterlerine sahiptir. Bununla birlikte bu süreçlerin dinamik yapıları, donanımın eskiyerek yıpranması ve dış bozucu etkileri sebebiyle sürekli olarak bir değişim içindedirler. Bu çalışmada incelenen sanal test sistemleri, servo valf temelli pozisyon denetim sistemi ve gaz yıkayıcı tank seviye denetim sistemi tasarlanırken, denetim probleminin demir üretim süreçlerindeki denetim problemlerine benzetilmesi amaçlandı. Bu sebeple, sistemlere dış bozucu işaretler ve gecikmeler uygulandı. Sanal test sistemlerinde denetleyicileri daha da zorlamak için kritik sönümlü, az sönümlü ve aşırı sönümlü sistemler arası geçişler de yapıldı.

Farklı dinamik tepkilere sahip sanal test sistemlerinin denetimleri, geleneksel MRAC, bulanık kazanç düzenlemeli MRAC ve PID ile yapıldı. Denetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, uyarlama hızı uygun aralıkta seçilerek tasarlanan geleneksel MRAC ile elde edilen, yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en yüksek aşım ve sistem hatası gibi denetim performansı değerlerinin, sisteme bozucu uygulanmadığı durumlarda PID ile yapılan denetim çalışmaları neticesinde elde edilen değerlere yakın olduğu tespit edildi. Sisteme bozucu uygulandığında veya sistemin dinamik yapısı değiştirildiğinde ise uyarlama hızı uygun aralıkta seçilerek

tasarlanan geleneksel MRAC'ın PID'den daha iyi denetim performansı gösterdiği görüldü. MRAC'ın ideal uyarlama hızı değer aralığının tespiti için önerilen bulanık tabanlı kazanç düzenleme yöntemi ile tasarlanan bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC denetimi neticesinde elde edilen denetim performans parametrelerinin ise geleneksel MRAC ve PID'ye oranla daha iyi olduğu gözlemlendi.

Sanal test sistemleri üzerinde yapılan denetim çalışmalarının bir benzeri, demir üretim süreçlerinde sıkça kullanılan pnömatik denetim valfi kullanılarak tasarlanan, servo valf temelli deney düzeneğinde ve modellemesi yapılan yüksek fırın gaz yıkayıcı tank seviye denetim sistemi üzerinde yapıldı. Denetimler neticesinde elde edilen sonuçların, sanal test sistemindeki sonuçlarla örtüştüğü gözlemlendi. Uyarlama hızı ideal aralıkta seçildiği zaman geleneksel MRAC'ın ürettiği performans parametrelerinin, PID'ye göre daha iyi olduğu tespit edildi. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın uyarlama hızı, sistem çıkışı ile referans model arasındaki hatanın durumuna göre değişiklik gösterdiği için sürekli olarak ideal değerler arasında bulunmaktadır. Bu sayede bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC, sisteme bozucu uygulanmasından önce ve uygulandıktan sonra, geleneksel MRAC ve PID'lerden daha iyi performans gösterdi. Yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en yüksek aşım değeri ve sistem çıkışındaki hatanın RSM değerleri bakımından yapılan değerlendirmelere ek olarak denetleyiciler, ürettikleri denetim işaretinin standart sapma miktarına göre de karşılaştırıldı. Buna göre uyarlama hızı uygun değerler aralığında seçilen geleneksel MRAC, denetimi PID'den daha düşük standart sapmaya sahip denetim işareti ile sağladı. Bulanık kazanç düzenlemeli MRAC ise bütün denetim çalışmalarında, geleneksel MRAC ve PID'ye göre daha düşük standart sapmaya sahip denetim işareti ile denetimi sağladı.

Geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC, gerekli durumlarda uyarlama parametrelerini uygun değerlere yakınsatarak, dış bozucu etkisi altındaki sistemlerde denetim sağlamaktadır. Benzer durumda denetim performansı düşen PID denetleyicinin tekrar tasarlanması gerekmektedir. Demir üretim süreçleri gibi sürekli olarak dış bozucu etkisi altında olan denetim problemlerinde sıkça karşılaşılan bu durumda tasarımcılar PID denetleyicileri yeniden tasarlamak için sistemde tekrar eden testler yapmaktadır. Sistemde yapılan test çalışmaları, kimi zaman sadece kısa süreli enerji veya hammadde kaybına sebep olur. Bazı denetim problemlerindeki test çalışmalarında ise bu kayıpların yanında süreçteki donanımlar ve çalışanları riske sokan durumlar da oluşabilir. Bu açıklamaya göre, denetim esnasında

sürekli uyarlanması sayesinde, yinelenen denetleyici tasarımı ihtiyacını ortadan kaldırması, geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın PID'ye karşı sahip olduğu bir güçlü yönüdür.

Demir üretim süreçleri gibi zorlu ortam şartlarında sürekli olarak, denetleyici tarafından üretilen denetim işaretlerini sisteme uygulayan donanımlar, yaptıkları hareketler sebebiyle aşınmalara ve fiziksel zorlamalara maruz kalırlar. Bu donanımların hareketlerinin mümkün olduğunca kısıtlı bir aralıkta hareket etmeleri gerekmektedir. Örneğin standart sapması çok yüksek bir denetim işareti sebebiyle sürekli açılıp kapanan bir valf, kısa sürede aşınmakta veya denetimini sağladığı akışkanın fiziksel zorlaması sebebiyle hasarlanmaktadır. Geleneksel MRAC ve bulanık kazanç düzenlemeli MRAC'ın denetimi daha küçük standart sapmaya sahip denetim işaretleri ile sağlaması bu denetleyicilerin PID'ye karşı diğer bir güçlü yönüdür.

Demir üretim süreçlerindeki donanım tasarımları yapılırken, ilgili süreçteki denetim probleminin zorluğu dikkate alınır. Bu çalışmada açıklanan, sürekli olarak dış bozucu etkisi altında olan ve PID ile denetlenen yüksek fırın gaz yıkayıcı tankı seviyesi denetim probleminde, sistem çıkışı sürekli salınım yapmaktadır. Tankın tasarımı esnasında bu bilgidan faydalanılmaktadır. Tankın taşma veya tamamen boşalma risklerini azaltmak için tank yüksekliği ve yarıçapı, salınımlardan etkilenmeyecek büyüklükte seçilmektedir. Buna ek olarak tanktaki suyu tahliye etmek için kullanılan ikinci valfe denetim işaretini sağlayan algoritma, birinci valfin denetimi sağlayamadığı ve tank seviyesinin riskli değere ulaştığı durumda, ikinci valfin de su tahliyesi sağlaması için gerekli işareti üretmektedir. PID tarafından üretilen yüksek standart sapmaya sahip denetim işareti sebebiyle büyük genlikli salınımlar ile denetimi sağlayan valfler, bu çalışma durumundan nispeten daha az etkilenen dayanıklı modellerden seçilir. Gaz yıkayıcı tank seviyesi denetim probleminde, PID'nin dış bozuculara ve sistemin dinamik davranışındaki değişikliklere cevap veremediği durumlar öngörülerek yapılan bu düzenlemeler, sürecin tasarım ve kurulum maliyetlerini de artırmaktadır. Bu tez çalışmasında gaz yıkayıcı tankı seviye denetimi uygulamalarında, geleneksel MRAC ve bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın, PID'ye oranla daha düşük aşım değerleri ürettiğini göstermektedir. Gaz yıkayıcı tank seviyesi denetiminde PID yerine geleneksel MRAC veya bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC kullanılması değişik faydalar sağlayabilir. Örneğin tank seviyesindeki salınım azaldığı için daha küçük bir tank tasarımı yaparak tesis kurulum maliyetini düşürmek mümkündür. Tank yüksekliğinin azaltılması, sadece maliyeti etkilemez.

Yüksekliği azaltılan tankta yapılan işletme ve bakım faaliyetleri hem kolaylaşır hem de bu ortamdaki çalışma riskleri azalır. Denetleyici tarafından üretilen denetim işaretinin standart sapması azalacağından denetim valfi de daha az hareket edecektir. Bu sebeple süreç tasarım aşamasında sürekli yüksek genlikli hareketler ile çalışmaya karşı dayanıklı bir valf yerine daha düşük maliyetli bir valf seçimi yapılabilir.

Tasarım kolaylığı ve sisteme etki eden dış bozuculara karşı uyarlamalı olma özelliği, geleneksel MRAC'ın PID'ye karşı üstünlükleridir. Matematik modeli bilinmeyen sistemlerdeki PID tasarımında kullanılan yaklaşımların hepsi, sistem üzerinde yapılan tekrarlı parametre denemelerine dayanmaktadır. Geleneksel MRAC tasarımı için tasarımcının, denetim isterlerine göre bir referans model tasarlaması ve o sisteme uygun uyarlama hızını belirlemesi için denemeler yapması gerekmektedir. Bu aşamada bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC geleneksel MRAC'ın uyarlama hızı tespiti sorununa çözüm getirmektedir. Denetleyici, sahip olduğu bulanık karar yapısı ile sistem çıkışının durumuna göre uyarlama hızını düzenleyerek denetimi sağlar. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC, bu tez çalışmasında yapılan denetim çalışmaları neticesinde, tasarlandığı sisteme dış bozucu etki uygulanmasının öncesi ve sonrasında diğer geleneksel MRAC ve PID'lerden daha üstün denetim performansı sergiledi. Bulanık tabanlı kazanç düzenlemeli MRAC'ın, bu başarısı ve geleneksel MRAC'a karşı sahip olduğu tasarım kolaylığı onu demir üretim süreçlerindeki denetim problemleri için geleneksel MRAC ve PID'ye karşı güçlü bir alternatif olarak ön plana çıkarmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abougarair A J and Shashoa N A A** (2021) Model Reference Adaptive Control for Temperature Regulation of Continuous Stirred Tank Reactor. *IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*, 20-22 Aralık 2021, Tunis, Tunisia, ISBN: 978-1-6654-0270-5, 276-281.
- Aftab A and Luan X** (2022) A fuzzy-PID Series Feedback Self-tuned Adaptive Control of Reactor Power Using Nonlinear Multipoint Kinetic Model Under Reference Tracking and Disturbance Rejection. *Annals of Nuclear Energy*, 166: 108696.
- Aldemir A and Anwer M S** (2020) Determination of Optimal PID Control Parameters by Response Surface Methodology. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 4 (2): 142-153.
- Ali M N, Soliman M, Ebrahim M A and Elsisı M** (2023) D-Decomposition-based Multi-objective Robust Resilient Control for Blade Pitch of Wind Energy Conversion System. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 146: 108781.
- Alqadasi, M M A, Othman, S M, Rahmat, M F and Abdullah F** (2019) Optimization of PID for Industrial Electro-hydraulic Actuator using PSOGSA. *Telecommunication Computing Electronics and Control (TELKOMNIKA)*, 17 (5): 2625-2635.
- Altan A and Hacıoğlu R** (2014) The Controller of the Camera used in Target Tracking for Unmanned Vehicle with Model Predictive Controller, *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 23-25 Nisan 2014, Trabzon, Türkiye, 2014, ISBN: 978-1-4799-4874-1, 1686-1689.
- Altan A and Hacıoğlu R** (2020) Model Predictive Control of Three-axis Gimbal System Mounted on UAV for Real-time Target Tracking Under External Disturbances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138: 106548.
- Altan A, Aslan Ö and Hacıoğlu R** (2017) Model Predictive Control of Load Transporting System on Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Fifth International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering*, 27-28 Mayıs 2017, Rome, Italy, ISBN: 978-1-63248-123-8, 1-4.
- Altan A, Aslan Ö and Hacıoğlu R** (2018) Model Reference Adaptive Control of Load Transporting System on Unmanned Aerial Vehicle. *6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, 25-27 Ekim 2018, İstanbul, Türkiye, ISBN: 978-1-5386-7641-7, 1-5.
- Arabi E, Yucelen T, Gruenwald B C, Fravolini M, Balakrishnan S and Nguyen N T** (2019) A Neuroadaptive Architecture for Model Reference Control of Uncertain Dynamical Systems with Performance Guarantees. *Systems & Control Letters*, 125: 37-44.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Aslan Ö** (2009) Demir Çelik Alanında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Model Yapıları Tabanlı Model Öngörülü Denetleyici Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 90 s.
- Aslan Ö, Altan A and Hacıoğlu R** (2017) The Control of Blast Furnace Top Gas Pressure by using Fuzzy PID. *Fifth International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering*, 27-28 Mayıs 2017, Rome, Italy, ISBN: 978-1-63248-123-8, 22-26.
- Aslan Ö, Altan A and Hacıoğlu R** (2022) Level Control of Blast Furnace Gas Cleaning Tank System with Fuzzy Based Gain Regulation for Model Reference Adaptive Controller. *Processes*, 10 (12): 2503.
- Azevedo I A, Barros L S and Cunha C D** (2021) Variable Structure Model Reference Adaptive Control for Squirrel-cage Induction Generator-based Wind Energy Conversion Systems. *14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 15-18 Ağustos 2021, Sao Paulo, Brazil, ISBN: 978-1-6654-4118-6, 947-954.
- Balke C, Völtzer K and Dittmar R** (2022) A Lab Equipped with Industrial DCS for Different Control Engineering Courses. *IFAC-PapersOnLine*, 55(17): 162-167.
- Bolton W** (2021) PLC System. *Instrumentation and control systems*, Yura S R (Ed.), 3rd Edition, ISBN: 978-0-12-823471-6, Newnes, Oxford, 165-188.
- Candy J V** (2021) *Model Reference Adaptive Control (MRAC) for Additive Manufacturing*. LLNL-TR-823797, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 19 pp.
- Cartocci N, Monarca A, Costante G, Fravolini M L, Dogan K M and Yucelen T** (2022) Linear Control of a Nonlinear Aerospace System via Extended Dynamic Mode Decomposition. *AIAA Scitech Forum*, 3-7 Ocak 2022, San Diego, USA, 2046.
- Cavone G, Bozza A, Carli R and Dotoli M** (2022) MPC-Based Process Control of Deep Drawing: An Industry 4.0 Case Study in Automotive. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19 (3): 1586-1598.
- Ciba S and İskender İ** (2018) Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Model Referans Adaptif Kontrol Yöntemi - MIT Kuralı ile Kontrol Edilmesi. *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, 28-30 Eylül 2018, Malatya, Türkiye, ISBN: 978-1-5386-6878-8, 1-3.
- Coman S, Boldisor C and Ciusdel C** (2018) Combining the MIT and Lyapunov Stability Adaptive Methods for Second Order Systems. *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 24-26 Mayıs 2018, Suceava, Romania, ISBN: 978-1-5386-1493-8, 31-37.
- Costa R R** (2020) Lyapunov Design of Least-squares Model-reference Adaptive Control. *IFAC-PapersOnLine*, 53 (2): 3797-3802.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Das M, Catalkaya M, Akay O E and Akpinar E K** (2023) Impacts of use PID Control and Artificial Intelligence Methods for Solar Air Heater Energy Performance. *Journal of Building Engineering*, 65: 105809.
- Dinakin D and Oluseyi P** (2021) Fuzzy-optimized Model Reference Adaptive Control of Interacting and Noninteracting Processes Based on MIT and Lyapunov Rules. *Turkish Journal of Engineering*, 5 (4): 141-153.
- Duan G** (2022) High-order Fully-actuated System Approaches: Part IX. Generalised PID Control and Model Reference Tracking. *International Journal of Systems Science*, 53 (3): 652-674.
- Duvanov E S, Kudinov Y I, Pashchenko F F and Ponomarev A A** (2020) Analysis and Synthesis of the Modified MRAC-MIT System and the MRAC-Lyapunov System. *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 11-13 Kasım 2020, Lipetsk, Russia, ISBN: 978-1-7281-8840-9, 521-526.
- Geerdes M, Chaigneau R and Lingardi O** (2020) Introduction to the Blast Furnace Process. *Modern blast furnace ironmaking: an introduction*, 4th Edition, ISBN: 978-1-64368-122-1, IOS Press BV, Amsterdam, 1-10.
- Griffin J A, Takahashi T T and Rodi P E** (2022) Aerothermodynamic Modeling for a "Mission Code" Approach to Hypersonic Flight. *AIAA AVIATION Forum*, 27 Haziran – 1 Temmuz 2022, Chicago, USA, 3657.
- Gupta N, Kini P, Gupta S, Darbari H, Joshi N and Khosravy M** (2021) Six Sigma Based Modeling of the Hydraulic Oil Heating Under Low Load Operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (1): 11-21.
- Gusev G, Glot I, Epin V, Tsvetkov R, Shardakov I and Shestakov A** (2021) Experience of using Tensoresistive Strain Gauges in Corrosive Environments. *Procedia Structural Integrity*, 32: 49-55.
- Haidekker M A** (2020) PID Controller. *Linear Feedback Controls The Essentials*, Yura S (Ed.), 2nd Edition, ISBN: 978-0-12-818778-4, Elsevier, Oxford, 253-272.
- Inayat A** (2023) Current Progress of Process Integration for Waste Heat Recovery in Steel and Iron Industries. *Fuel*, 338: 127237.
- Jain P and Nigam M J** (2013) Design of a Model Reference Adaptive Controller using Modified MIT Rule for a Second Order System. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3 (4): 477-484.
- Kılıç E** (2022) Asenkron Motor Sürücülerinde Pekiştirmeli Öğrenme Tabanlı PI Hız Denetleyici Optimizasyonu. *International Symposium on Advanced Engineering Technologies (ISADET)*, 16-18 Haziran 2022, Kahramanmaraş, Türkiye, 16: 18.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kim J, Choi H H and Jung J W** (2019) MRAC-based Voltage Controller for Three-phase CVCV Inverters to Attenuate Parameter Uncertainties Under Critical Load Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35 (1): 1002-1013.
- Li P, Wang G, Dong Y, Zhuo Y and Fan Y** (2022) A Review on Desulfurization Technologies of Blast Furnace Gases. *Current Pollution Reports*, 8 (2): 189-200.
- Li Y, Li H, Zhang J and Zhang S** (2021) Data and Knowledge Driven Approach for Burden Surface Optimization in Blast Furnace. *Computers & Electrical Engineering*, 92: 107191.
- Lv W, Sun Z and Su Z** (2019) Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Iron Pelletizing Process in China, a Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 233: 1314-1321.
- Mallick A, Dhara S and Rath S** (2021) Application of Machine Learning Algorithms for Prediction of Sinter Machine Productivity. *Machine Learning with Applications*, 6: 100186.
- Manna S, Singh D K and Aella A K** (2023) Design and Implementation of MRAC & MRAC-PID Feedback for Turntable. *Gazi University Journal of Science*, 36 (3):1-15.
- Mareels I M, Anderson B D, Bitmead R R, Bodson M and Sastry S S** (1987) Revisiting the MIT Rule for Adaptive Control. *Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, 161-166.
- Możaryn J, Petryszyn J and Ozana S** (2021) PLC Based Fractional-order PID Temperature Control in Pipeline: Design Procedure and Experimental Evaluation. *Meccanica*, 56: 855-871.
- Mukherjee D, Raja G L, Kundu P and Ghosh A** (2022) Design of Optimal Fractional Order Lyapunov Based Model Reference Adaptive Control Scheme for CSTR. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (1): 436-441.
- Muresan C I and De Keyser R** (2022) Revisiting Ziegler–Nichols. A Fractional Order Approach. *ISA transactions*, 129: 287-296.
- Niel J, Weiss B and Wukovits W** (2022) Model of an Iron Ore Sinter Plant with Selective Waste Gas Recirculation. *Carbon Resources Conversion*, 5 (1): 71-83.
- Park J S and Voyakin D** (2021) Technological Transition and Complexity Reflected in Bronze and Brass Objects from the Medieval Site in the Aral Sea Region. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13: 1-13.
- Ponomarev A A, Kudinov Y I, Pashchenko F F and Duvanov E S** (2020) Analysis and Synthesis of Adaptive PID Controller with MRAC-MIT System. *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 11-13 Kasım 2020, Lipetsk, Russia, ISBN: 978-1-7281-8840-9, 527-532.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pravika M and Jacob J** (2021) Design of Model Reference Adaptive–PID Controller for Automated Portable Duodopa Pump in Parkinson’s Disease Patients. *Biomedical Signal Processing and Control*, 68: 102590.
- Rajesh R and Deepa S N** (2020) Design of Direct MRAC Augmented with 2 DoF PID Controller: An Application to Speed Control of a Servo Plant. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32 (5): 310-320.
- Ranjani M and Murugesan P** (2015) Optimal Fuzzy Controller Parameters using PSO for Speed Control of Quasi-Z Source DC/DC Converter Fed Drive. *Applied Soft Computing*, 27: 332-356.
- Rosado D J M, Chávez S B R, Gutierrez J A, de Araújo F H M, de Carvalho Jr J A and Mendiburu A Z** (2020) Energetic Analysis of Reheating Furnaces in the Combustion of Coke Oven Gas, Linz-Donawitz Gas and Blast Furnace Gas in the Steel Industry. *Applied Thermal Engineering*, 169: 114905.
- Seghiri T, Ladaci S and Haddad S** (2023) Fractional Order Adaptive MRAC Controller Design for High-accuracy Position Control of an Industrial Robot Arm. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, 10 (1): 8-20.
- Shahgholian G, Maghsoodi M, Mahdavian M, Janghorbani M, Azadeh M and Farazpey S** (2016) Analysis of Speed Control in DC Motor Drive by using Fuzzy Control Based on Model Reference Adaptive Control. *13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 28 Haziran – 1 Temmuz 2016, Chiang Mai, Thailand, ISBN: 978-1-4673-9749-0, 1-6.
- Shekhar A and Sharma A** (2018) Review of Model Reference Adaptive Control. *International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, 29-31 Ağustos 2018, Pune, India, ISBN: 978-1-5386-5510-8, 1-5.
- Sun J, Chen W and Chen X** (2022) Model Reference Adaptive Control with Adjustable Gain for Piezoelectric Actuator. *European Journal of Control*, 67: 100712.
- Taghipour A, Akkalatham W, Eaknarajindawat N and Stefanakis A I** (2022) The Impact of Government Policies and Steel Recycling Companies Performance on Sustainable Management in a Circular Economy. *Resources Policy*, 77: 102663.
- Tavoosi J, Azarakhsh Y, Mohammadzadeh A, Mobayen S, Asad J H and Safdar R** (2021) Multivariable Model Reference Adaptive Control of an Industrial Power Boiler Using Recurrent RBFN. *Complexity*, 2021: 12.
- Thusoo R, Jain S and Bangia S** (2019) PID and MRAC Control of a Quadrotor. *3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 10-11 Ekim 2019, Noida, India, ISBN: 978-1-7281-2068-3, 197-201.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Toktarova A, Walter V, Göransson L and Johnsson F** (2022) Interaction Between Electrified Steel Production and the North European Electricity System. *Applied Energy*, 310: 118584.
- Tomaselli M, Lino P, Carbone G and Roncone M** (2019) Common-rail Pressure Control using a Model Reference Adaptive Control Approach. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 6-9 Ekim 2019, Bari, Italy, ISBN: 978-1-7281-4569-3, 1907-1912.
- Wei Y, Xiong T, Li Z and Dong W** (2022) The Sinter Mixture Moisture Control System Based on Fuzzy PID. *International Conference on Artificial Intelligence and Computer Information Technology (AICIT)*, 16-18 Eylül 2022, Yichang, China, ISBN: 978-1-6654-5087-4, 1-4.
- Westenbroek T, Mazumdar E, Fridovich-Keil D, Prabhu V, Tomlin C J and Sastry S S** (2020) Adaptive Control for Linearizable Systems using On-policy Reinforcement Learning. *59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 14-18 Aralık 2020, Jeju, Korea, ISBN: 978-1-7281-7447-1 118-125.
- Whitaker H P and Rediess H A** (1970) A New Model Performance Index for Engineering Design of Flight Control Systems. *Journal of Aircraft*, 7 (6): 542-549.
- Wiklund C M, Helle M and Saxén H** (2016) Economic Assessment of Options for Biomass Pretreatment and use in the Blast Furnace. *Biomass and Bioenergy*, 91: 259-270.
- Winfield D, Paddison D, Cross M, Croft N and Craig I** (2013) Performance Comparison of a Blast Furnace Gravity Dust-catcher vs. Tangential Triple Inlet Gas Separation Cyclone using Computational Fluid Dynamics. *Separation and Purification Technology*, 115: 205-215.
- Yaman T T** (2022) Rough Sets Based Spatial Analysis for Metal Production Area at Mount Nif. *Türk Arkeoloji ve Etnografya Dergisi*, 84: 65-81.
- Zheng W, Pang L, Liu Y, Xie F and Zeng W** (2021) Effects of Initial Condition and Fuel Composition on Laminar Burning Velocities of Blast Furnace Gas with Low Heat Value. *Fuel*, 289: 119775.
- Zhu H** (2022) Research on PLC DC Motor Speed Control System Based on Quantum Fuzzy Control Algorithm. *International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, 9-11 Mayıs 2022, Salem, India, ISBN: 978-1-6654-9710-7, 1672-1675.
- Zhu S, Van Jaarsveld W and Dekker R** (2022) Critical Project Planning and Spare Parts Inventory Management in Shutdown Maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 219: 108197.
- Ziegler J G and Nichols N B** (1942) Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 64 (8): 759-765.

EK AÇIKLAMALAR

EK A: MIT Kuralı Tabanlı MRAC

Burada birinci ve ikinci dereceden sistem transfer fonksiyonu ile tanımlı denetlenen sistem için MIT kuralı tabanlı MRAC derivasyonu detaylı analizi yapılmaktadır. Parametre beklenen değerinin hesaplanması değerlendirilmektedir.

Denetlenen sistem giriş u , çıkış y olacak şekilde birinci dereceden sistem matematiksel modeli

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu \quad (0.1)$$

ile verilmekte olup birinci dereceden referans model,

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_my_m + b_mu \quad (0.2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada tasarım isterlerine göre a_m , b_m katsayıları belirlenmektedir. θ_1 ve θ_2 , uyarlanan parametreler olmak üzere denetlenen sistem girişi

$$u = \theta_1 r - \theta_2 y \quad (0.3)$$

tanımlandığında sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki fark

$$e = y - y_m \quad (0.4)$$

hata işaretidir. Burada maliyet fonksiyonu ve hatayı uyarlanan parametrelere göre türevleri Eşitlik (0.5) ve Eşitlik (0.6)'daki gibi olur.

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2 \quad (0.5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (0.6)$$

İşlem kolaylığı açısından p türev $\frac{d}{dt}$ ifadesi olarak tanımlanırsa ve Eşitlik (0.3)'teki denetim işareti ifadesi, Eşitlik (0.1)'deki yerine yazıldığında elde edilen y ve y_m ifadeleri ile Eşitlik (0.4),

$$py = -ay + b(\theta_1 r - \theta_2 y) \quad (0.7)$$

$$(p + a + b\theta_2)y = b\theta_1 r \quad (0.8)$$

$$y = \frac{b\theta_1 r}{p + a + b\theta_2} \quad (0.9)$$

$$e = \frac{b\theta_1 r}{p + a + b\theta_2} - \frac{b_m}{p + a_m} r \quad (0.10)$$

olacaktır. Eşitlik(0.10)'un θ_1 ve θ_2 , türevi alınarak hatanın uyarılma parametrelerinin değerine göre değişimi elde edilir.

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \frac{br}{p + a + b\theta_2} \quad (0.11)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = \frac{-b^2\theta_1 r}{(p + a + b\theta_2)^2} \quad (0.12)$$

Eşitlik (0.13) içerisindeki, Eşitlik (0.9)'deki y ifadesine göre düzenlendiğinde

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = \frac{-by}{p + a + b\theta_2} \quad (0.13)$$

elde edilir. Denetlenen sistem çıkışının referans model çıkışına yakınsaması hatayı sifıra yaklaştıracak olup Eşitlik (0.11) ve Eşitlik (0.13)'de bulunan $p + a + b\theta_2$ ifadesi, referans modeldeki $p + a_m$ ile ifade edilecektir ki bu durumda

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \frac{b}{p + a_m} r \quad (0.14)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = \frac{-b}{p + a_m} y \quad (0.15)$$

Eşitlik (0.6)'daki hassasiyet türevlerine göre uyarlanan parametrelerinin zamana göre türevi

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta_1} \quad (0.16)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta_2} \quad (0.17)$$

elde edilir. Bu durumda Eşitlik (0.16) ve Eşitlik (0.17) 'deki kısmi türev ifadeleri, Eşitlik (0.14) ve Eşitlik (0.15)'teki değerleri ile yazılırsa,

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \gamma' \frac{b}{p + a_m} r e \quad (0.18)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma' \frac{b}{p + a_m} y e \quad (0.19)$$

Eşitlik(0.18) ve Eşitlik (0.19)'daki γb değerleri $\gamma' = \gamma b_m/b$ olarak ifade edilirse, MIT kuralına göre θ_1 ve θ_2 parametrelerinin uyarlanması

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \gamma \frac{b_m}{p + a_m} r e \quad (0.20)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{b_m}{p + a_m} y e \quad (0.21)$$

ile elde edilir. Buna göre hatanın sıfıra yaklaşması

$$\theta_1 = \frac{b_m}{b}, \theta_2 = \frac{a_m - a}{b} \quad (0.22)$$

yakınsaması sonucunda elde edilecek olup MRAC parametreleri beklenen değerini ifade etmektedir.

Benzer bir yaklaşım ile ikinci dereceden sistemin matematiksel modeli

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -a \frac{dy}{dt} + bu \quad (0.23)$$

ve ikinci dereceden referans model,

$$\frac{d^2 y_m}{dt^2} = -a_m \frac{dy_m}{dt} + b_m r \quad (0.24)$$

olarak tanımlanır ise θ_1 ve θ_2 , uyarlama parametreleri olmak üzere Eşitlik (7.3)-(7.6) kullanılarak

$$p^2y = -apy + b(\theta_1r - \theta_2y) \quad (0.25)$$

$$p(p + a + b\theta_2)y = b\theta_1r \quad (0.26)$$

$$y = \frac{b\theta_1r}{p(p + a + b\theta_2)} \quad (0.27)$$

$$e = \frac{b\theta_1r}{p(p + a + b\theta_2)} - \frac{b_m r}{p(p + a_m)} \quad (0.28)$$

olacaktır. Denetlenen sistem çıkışının referans model çıkışına yakınsaması hatayı sıfıra yaklaştıracak olup uyarılama hızı katsayısının normalizasyonu ile birlikte

$$\theta_1 = \frac{b_m}{b}, \theta_2 = \frac{a_m - a}{b} \quad (0.29)$$

yakınsaması sonucunda ikinci dereceden sistem MIT kuralına göre θ_1 ve θ_2 parametrelerinin uyarlanması

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \gamma \frac{b_m}{p(p + a_m)} r e \quad (0.30)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{b_m}{p(p + a_m)} y e \quad (0.31)$$

ile elde edilir.

EK B: Lyapunov Kuralı Tabanlı MRAC

Burada birinci ve ikinci dereceden sistem transfer fonksiyonu ile tanımlı denetlenen sistem için Lyapunov kuralı tabanlı MRAC derivasyonu detaylı analizi yapılmaktadır. Parametre beklenen değerinin hesaplanması değerlendirilmektedir.

Denetlenen sistem giriş u , çıkış y olacak şekilde birinci dereceden sistem matematiksel modeli Eşitlik (7.1) de ve referans model Eşitlik (7.2) de tanımlanır ise θ_1 ve θ_2 , uyarlanan parametreler olmak üzere denetlenen sistem girişi Eşitlik (7.3) de hata Eşitlik (7.4) için pozitif tanımlı Lyapunov maliyet fonksiyonunu minimize eden değere ulaşmak istenmektedir. Buna göre

$$\frac{de}{dt} = -ay + b(\theta_1 r - \theta_2 y) + a_m y_m - b_m r \quad (0.32)$$

yazılır ki Eşitlik (0.32)'deki ifadeye $a_m y$ değeri eklenip çıkartılırsa,

$$\frac{de}{dt} = -ay + b(\theta_1 r - \theta_2 y) + a_m y_m - b_m r + a_m y - a_m y \quad (0.33)$$

$$\frac{de}{dt} = -a_m(y - y_m) - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)r \quad (0.34)$$

elde edilir. Burada $b\theta_2 = a_m - a$ ve $b\theta_1 = b_m$ olması koşulunda hata sifira yakınsayacaktır.

Buna göre Lyapunov fonksiyonu

$$V(e, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_2 + a - a_m)^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_1 - b_m)^2 \right) \quad (0.35)$$

için $b\gamma > 0$ olması durumunda pozitif tanımlıdır. Eşitlik (0.35)'deki fonksiyon, e sıfır olduğunda ve uyarılma parametreleri ideal değerine yakınsayacaktır. Burada Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olmalıdır.

$$\frac{dV}{dt} = e \frac{de}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt} \quad (0.36)$$

Eşitlik (0.36)'daki $\frac{de}{dt}$ ifadesi burada yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & e(-a_m e - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)r) + \frac{1}{\gamma}(b\theta_2 + a - a_m)\frac{d\theta_2}{dt} \\ & + \frac{1}{\gamma}(b\theta_1 - b_m)\frac{d\theta_1}{dt} \end{aligned} \quad (0.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -a_m e^2 - (b\theta_2 + a - a_m)ye + (b\theta_1 - b_m)re + \frac{1}{\gamma}(b\theta_2 + a - a_m)\frac{d\theta_2}{dt} \\ & + \frac{1}{\gamma}(b\theta_1 - b_m)\frac{d\theta_1}{dt} \end{aligned} \quad (0.38)$$

$$\frac{dV}{dt} = -a_m e^2 + \frac{1}{\gamma}(b\theta_2 + a - a_m)\left(\frac{d\theta_2}{dt} - \gamma ye\right) + \frac{1}{\gamma}(b\theta_1 - b_m)\left(\frac{d\theta_1}{dt} + \gamma re\right) \quad (0.39)$$

Burada uyarılama parametrelerinin zamana göre değişimi ve bu parametrelerin değişken γ uyarılama hızı katsayısına göre ifadesi

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma re \quad (0.40)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \gamma ye \quad (0.41)$$

ile Lyapunov kuralı tabanlı MRAC elde edilir. Bu durumda $\frac{dV}{dt} = -a_m e^2$ negatif değer alacaktır.

Benzer bir yaklaşım ile ikinci dereceden sistem için Eşitlik (7.23)-(7.24) kullanılırsa

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{d^2 y_m}{dt^2} \quad (0.42)$$

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -a \frac{dy}{dt} + bu - \left(-a_m \frac{dy_m}{dt} + b_m r\right) \quad (0.43)$$

elde edilir ki

Eşitlik (0.3)'teki u değeri, Eşitlik (0.43)'te yerine yazılırsa,

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -a \frac{dy}{dt} + b(\theta_1 r - \theta_2 y) + a_m \frac{dy_m}{dt} - b_m r \quad (0.44)$$

bulunur.

Eşitlik (0.44)'e $a_m \frac{dy}{dt}$ ifadesi eklenip çıkartılırsa,

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -a \frac{dy}{dt} + a_m \frac{dy}{dt} + b\theta_1 r - b\theta_2 y - a_m \frac{dy}{dt} + a_m \frac{dy_m}{dt} - b_m r \quad (0.45)$$

$$\frac{d^2e}{dt^2} = -a_m \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dy_m}{dt} \right) - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)r \quad (0.46)$$

$$\frac{d^2e}{dt^2} = -a_m \frac{de}{dt} - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)r \quad (0.47)$$

Burada θ_1 ve θ_2 uyarlama parametrelerinin başlangıç koşulu sıfır olmak üzere $b\theta_2 = a_m - a$ ve $b\theta_1 = b_m$ olması koşulunda hata sıfıra yakınsayacaktır. Buna göre Lyapunov fonksiyonu oluşturulursa,

$$V(e, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_2 + a - a_m)^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_1 - b_m)^2 \right) \quad (0.48)$$

Eşitlik (0.48)'deki fonksiyon, e 0 olduğunda ve uyarlama parametreleri ideal değerine yakınsadığında 0 değerine yakınsayacaktır. Burada Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olmalıdır.

$$\frac{dV}{dt} = e \frac{de}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt} \quad (0.49)$$

Eşitlik (0.49)'daki $\frac{de}{dt}$ ifadesi burada yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = e(-a_me - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)r) + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} \\ + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt} \end{aligned} \quad (0.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = -a_me^2 - (b\theta_2 + a - a_m)ye + (b\theta_1 - b_m)re + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} \\ + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt} \end{aligned} \quad (0.51)$$

$$\frac{dV}{dt} = -a_me^2 + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \left(\frac{d\theta_2}{dt} - \gamma ye \right) + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \gamma re \right) \quad (0.52)$$

Burada uyarlama parametrelerinin zamana göre değişimi ve bu parametrelerin değişken γ uyarlama hızı katsayısına göre ifadesi

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma re \quad (0.53)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \gamma y e \quad (0.54)$$

ikinci dereceden sistem Lyapunov kuralı tabanlı MRAC yaklaşımıdır.



ÖZGEÇMİŞ

Özgür ASLAN, İlk ve orta öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2009 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2009 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitime başladı. Halen Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'de otomasyon mühendisi olarak görev yapmaktadır.