

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MODEL REFERANS UYARLAMALI  
DENETLEYİCİ İLE SÜREKLİ KARIŞTIRMALI  
TANK REAKTÖRLERDE SICAKLIK KONTROLÜ**

**Koray MURADOĞLU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı  
Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN

Temmuz, 2025

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MODEL REFERANS UYARLAMALI DENETLEYİCİ İLE**  
**SÜREKLİ KARIŞTIRMALI TANK REAKTÖRLERDE**  
**SICAKLIK KONTROLÜ**

Koray MURADOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Kerem ALTUN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Onur Akbatı, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

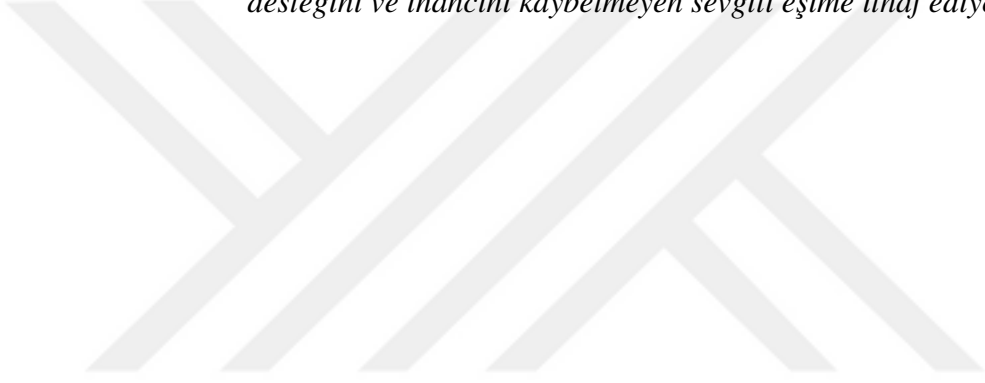
\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Model Referans Uyarlamalı Denetleyici ile Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörlerde Sıcaklık Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Koray MURADOĞLU

İmza

*Bu çalışmayı, bana koşulsuz sevgileriyle yol gösteren, sabırları ve fedakârlıklarıyla her zaman yanımda olan canım aileme ve en zor anlarda bile desteğini ve inancını kaybetmeyen sevgili eşime ithaf ediyorum.*



## TEŞEKKÜR

---

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi, destek ve ilhamlarıyla katkı sunan birçok değerli kişiye teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Öncelikle, bu çalışmanın her aşamasında akademik rehberliğini ve desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. İbrahim Alışkan'a en içten şükranlarımı sunarım. Disiplinli yaklaşımı, yönlendirici geri bildirimleri ve yapıcı eleştirileri sayesinde çalışmam akademik bir bütünlük kazanmıştır.

Akademik hayatım boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım tüm hocalarıma, özellikle yüksek lisans sürecinde bana katkı sağlayan Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Özellikle annem ve babam, her koşulda bana duydukları güven ve verdikleri emekle bu süreci anlamlı kıldılar.

Ayrıca, tez çalışmam boyunca moral ve motivasyon kaynaklarım olan dostlarıma ve tüm yüksek lisans arkadaşlarıma da içtenlikle teşekkür ederim. Onların desteği, bu zorlu süreci daha verimli ve keyifli hale getirmiştir.

Tüm bu katkılar, bu çalışmanın ortaya çıkmasını mümkün kılmıştır; ancak içerikte yer alan olası eksiklik ve hatalardan yalnızca tarafım sorumludur.

Koray MURADOĞLU

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>KISALTIMA LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiii</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş . . . . .	1
1.2 Tezin Amacı . . . . .	5
1.3 Araştırma Hipotezi . . . . .	6
<b>2 CSTR Modellemesi</b>	<b>8</b>
2.1 CSTR Sisteminin Matematiksel Modellemesi . . . . .	8
2.1.1 Modelleme Amacı ve Önemi . . . . .	8
2.1.2 CSTR Yapısı ve Giriş-Çıkış Değişkenleri . . . . .	8
2.1.3 Modelleme Yaklaşımına Genel Bakış . . . . .	10
2.2 CSTR Fiziksel Yapısı ve Akış Dinamiği . . . . .	10
2.3 Kimyasal Tepkime Türleri ve Termodinamik Temeller . . . . .	11
2.4 Varsayımlar ve Modelleme Kapsamı . . . . .	12
2.5 Kütle Denkliklerinin Ayrıntılı Türetilmesi . . . . .	13
2.6 Enerji Denkliklerinin Ayrıntılı Türetilmesi . . . . .	14
2.7 Reaksiyon Kinetiği: Arrhenius Temelli Yaklaşım . . . . .	15
2.8 CSTR Modelinin Doğrusal Hale Getirilmesi . . . . .	16
2.8.1 Doğrusal Olmayan Temel Denklemler ve Doğrusal Olmayan Terimler . . . . .	16
<b>3 Kontrolcü Tasarımları ve Benzetim Çalışmaları</b>	<b>22</b>
3.1 PI Kontrolcü Tasarımı . . . . .	22

3.1.1	Denetleyici Yapısı ve Matematiksel Modeli . . . . .	22
3.1.2	Kazanç Ayar Yöntemleri . . . . .	23
3.1.3	Kazanç Hesaplama Süreci (Bode Yöntemi) . . . . .	23
3.1.4	Simülasyon Modeli ve Uygulama Koşulları . . . . .	26
3.1.5	Zaman Cevabı Sonuçları ve Teknik Değerlendirme . . . . .	26
3.2	IMC (Internal Model Control) Tabanlı Kontrolcü Tasarımı . . . . .	28
3.2.1	IMC Teorisi ve CSTR Sistemine Uygulanması . . . . .	28
3.2.2	IMC Filtresi Seçimi ve Sistem Parametrelerine Etkisi . . . . .	29
3.2.3	IMC Denetleyici ile Benzetim Sonuçları ve Kararlılık Analizi . . . . .	30
3.3	MRAC (Model Reference Adaptive Control) Tabanlı Kontrolcü Tasarımı . . . . .	32
3.3.1	MRAC Teorisi ve Uygulama Yapısı . . . . .	32
3.3.2	Referans Model ve Gerçek Sistem Tanımı . . . . .	32
3.3.3	Lyapunov Tabanlı Uyarılma Yasası . . . . .	33
3.3.4	Simülasyon Modeli ve Uygulama Koşulları . . . . .	34
3.3.5	Zaman Cevabı Sonuçları ve Teknik İnceleme . . . . .	35
3.3.6	Performans Ölçütleri ve Nicel Analiz . . . . .	37
3.4	Benzetim Karşılaştırmaları . . . . .	37
3.4.1	Bozucusuz (Nominal) Durumda Sistem Cevapları . . . . .	40
3.4.2	Bozucu Giriş (Disturbance) Altında Sistem Performansı . . . . .	42
3.4.3	Performans Kriterlerinin Değerlendirilmesi . . . . .	46
3.5	Tartışma ve Yorumlar . . . . .	46
3.5.1	PI, IMC ve MRAC Denetleyicilerin Karşılaştırmalı Analizi . . . . .	46
3.5.2	Her Denetleyicinin Avantajları ve Sınırlılıkları . . . . .	47
3.5.3	CSTR Sistemi İçin En Uygun Kontrol Yaklaşımının Değerlendirilmesi . . . . .	48
<b>4</b>	<b>SONUÇ</b>	<b>49</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>52</b>
	<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>57</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$\rho$	Akışkanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma$	Adaptasyon kazancı
$\theta$	Adaptif kontrolör parametresi
$y(t)$	Çıkış değişkeni (reaktör sıcaklığı, °C)
$\Delta$	Fark operatörü
$F$	Giriş debisi (L/dk)
$T_{in}$	Giriş sıcaklığı (°C)
$u(t)$	Kontrol sinyali
$C_p$	Özgül ısı kapasitesi (J/kg·K)
$K_c$	PI kontrol kazancı
$V$	Reaktör hacmi (L)
$T$	Reaktör sıcaklığı (°C)
$Q$	Reaktöre verilen ısı (kJ)
$r$	Referans sinyali
$T_{ref}$	Referans sıcaklık (°C)
$k$	Reaksiyon hızı sabiti
$t$	Zaman (s)
$\tau$	Zaman sabiti

## KISALTMA LİSTESİ

---

CSTR	Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörü
IAE	Mutlak Hata İntegrali (Integral of Absolute Error)
IMC	İç Model Kontrolü (Internal Model Control)
LTI	Doğrusal Zamanla Değişmeyen Sistem (Linear Time-Invariant)
MATLAB	Matrix Laboratory (Simülasyon ve hesaplama yazılımı)
MRAC	Model Referans Uyarlamalı Kontrol (Model Reference Adaptive Control)
PI	Oransal-İntegral Kontrol (Proportional-Integral Control)
SIMULINK	Simülasyon ve Modelleme Ortamı
SISO	Tek Giriş Tek Çıkış Sistemi (Single Input Single Output)

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	CSTR sisteminin şematik gösterimi . . . . .	9
Şekil 3.1	Bode diyagramı . . . . .	24
Şekil 3.2	Bode kritik değerler . . . . .	24
Şekil 3.3	Frekans cevabı üzerinden PI kazançlarının hesaplanması . . . . .	25
Şekil 3.4	Simulink ortamında PI kontrol algoritması . . . . .	26
Şekil 3.5	Sistem çıkışı — PI denetleyici uygulaması . . . . .	26
Şekil 3.6	PI denetleyici ile hata sinyali . . . . .	27
Şekil 3.7	PI denetleyici kontrol sinyali . . . . .	27
Şekil 3.8	Simulink ortamında IMC kontrol algoritması . . . . .	29
Şekil 3.9	IMC denetleyici ile sistem çıkışı . . . . .	30
Şekil 3.10	IMC denetleyici hata sinyali . . . . .	31
Şekil 3.11	IMC denetleyici kontrol sinyali . . . . .	31
Şekil 3.12	Simulink ortamında MRAC kontrol algoritması . . . . .	32
Şekil 3.13	MRAC kontrol altında sistem çıkışı . . . . .	35
Şekil 3.14	MRAC kontrol altında hata sinyali . . . . .	35
Şekil 3.15	MRAC kontrol sinyali . . . . .	36
Şekil 3.16	MRAC adaptasyon parametreleri . . . . .	36
Şekil 3.17	CSTR sisteminin simulink ortamındaki genel görünümü . . . . .	38
Şekil 3.18	Doğrusal olmayan cstr sistemini tanımlayan matlab m-file kodu . . . . .	39
Şekil 3.19	Doğrusal olmayan cstr sistemini tanımlayan matlab m-file kodu 2 . . . . .	40
Şekil 3.20	Bozucusuz durumda IMC, PI ve MRAC denetleyicilerinin sistem çıkışı . . . . .	40
Şekil 3.21	Bozucusuz durumda hata sinyalleri karşılaştırması . . . . .	41
Şekil 3.22	Bozucusuz durumda kontrol sinyalleri karşılaştırması . . . . .	41
Şekil 3.23	MRAC adaptasyon parametreleri . . . . .	41
Şekil 3.24	Zamana bağlı bozucu giriş sinyali profili . . . . .	43
Şekil 3.25	Bozucu giriş altında sistem çıkışı . . . . .	43
Şekil 3.26	Bozucu giriş altında hata sinyalleri karşılaştırması . . . . .	44
Şekil 3.27	Bozucu giriş altında kontrol sinyali karşılaştırması . . . . .	44
Şekil 3.28	Bozucu giriş altında derişim grafiği . . . . .	44
Şekil 3.29	MRAC adaptasyon parametreleri . . . . .	45

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b>	Modelleme ve lineerleştirme işlemlerinde kullanılan sistem parametreleri . . . . .	21
<b>Tablo 3.1</b>	PI denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum) . . . . .	28
<b>Tablo 3.2</b>	IMC denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum) . . . . .	32
<b>Tablo 3.3</b>	MRAC denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum) . . . . .	37
<b>Tablo 3.4</b>	Bozucusuz durumda denetleyici performans karşılaştırması . . .	42
<b>Tablo 3.5</b>	Bozucu etkisi altında denetleyici performans karşılaştırması . . .	45

## **Model Referans Uyarlamalı Denetleyici ile Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörlerde Sıcaklık Kontrolü**

Koray MURADOĞLU

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN

Bu tez çalışmasında, kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve doğrusal olmayan dinamiklere sahip bir proses olan Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörü (CSTR) sisteminde sıcaklık kontrolü problemi ele alınmıştır. Bu probleme çözüm üretmek amacıyla üç farklı denetleyici yapısı incelenmiştir: İç Model Kontrolü (IMC), Oransal-İntegral (PI) kontrol ve Model Referans Uyarlamalı Kontrol (MRAC).

Her bir denetleyici, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve sistemin hem bozucusuz hem de dış bozucu etkiler altındaki dinamik yanıtları analiz edilmiştir. IMC kontrolörü, sistemin içsel modeline dayalı olarak tasarlanırken; PI kontrol yapısı klasik ayar yöntemleri ile yapılandırılmıştır. MRAC yöntemi ise Lyapunov kararlılık teorisi esas alınarak geliştirilmiş ve sistem parametrelerinde meydana gelen değişikliklere karşı çevrim içi uyum sağlayabilme yeteneği sunmuştur.

Denetleyicilerin başarımı; aşım oranı, yükselme süresi, yerleşme süresi, kararlı durum hatası ve Mutlak Hata İntegrali (IAE) gibi zaman tanım alanı performans kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, IMC ve PI kontrol yapılarının nominal işletim koşullarında kabul edilebilir performans sergilediğini; ancak MRAC yapısının, özellikle sistem belirsizlikleri ve dış bozucular altında daha yüksek kararlılık ve adaptif yanıt sunduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma, doğrusal olmayan sistemlerde farklı kontrol stratejilerinin sistematik karşılaştırmasını sunarak, kimyasal prosesler için uygun kontrol yaklaşımının

belirlenmesine katkı sağlamayı ve ileri düzey adaptif kontrol uygulamalarına bilimsel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Reaktör, Model, Dahili, Oransal, Uyarlamalı



---

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## ABSTRACT

---

# Temperature Control in Continuously Stirred Tank Reactors with Model Reference Adaptive Controller

Koray MURADOĞLU

Department of Control and Automation  
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim ALIŞKAN

In this thesis, the problem of temperature control in a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), which is a widely used nonlinear process in the chemical industry, is addressed. To solve this control problem, three different controller structures are investigated: Internal Model Control (IMC), Proportional-Integral (PI) control, and Model Reference Adaptive Control (MRAC).

Each controller was modeled in the MATLAB/Simulink environment, and the dynamic responses of the system were analyzed under both disturbance-free and disturbance-affected conditions. The IMC controller was designed based on the internal model of the system, while the PI controller was configured using conventional tuning methods. The MRAC structure was developed based on Lyapunov stability theory and demonstrated the ability to adapt online to changes in system parameters.

The performance of the controllers was evaluated using time-domain criteria such as overshoot, rise time, settling time, steady-state error, and Integral of Absolute Error (IAE). Simulation results showed that while IMC and PI controllers exhibited acceptable performance under nominal conditions, the MRAC structure provided superior adaptive and stable control, particularly under uncertainties and external disturbances.

This study aims to provide a comparative analysis of different control strategies for nonlinear systems, offering guidance in selecting suitable control structures

for chemical processes and forming a foundation for advanced adaptive control applications.

**Keywords:** Reactor, Model, Internal, Proportional, Adaptive



---

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING**

## 1.1 Giriş

Kimya, petrokimya, ilaç ve gıda gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılan Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktörler (CSTR), karmaşık ve doğrusal olmayan dinamik yapıları nedeniyle kontrol sistemlerinin test edildiği temel proseslerden biri olarak öne çıkmaktadır [1, 2]. CSTR sistemlerinde sıcaklık, konsantrasyon ve akış gibi değişkenlerin kontrolü; reaksiyon veriminin artırılması, ürün kalitesinin korunması ve güvenli çalışma koşullarının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir [3, 4]. Özellikle ekzotermik reaksiyonların gerçekleştiği CSTR sistemlerinde sıcaklık kontrolü, reaksiyon kinetiği üzerinde doğrudan etkili olduğundan, sistemin kararlılığı ve güvenliği açısından hayati bir rol oynar [5, 6].

CSTR sistemleri dinamik olarak oldukça karmaşıktır çünkü birçok durumda doğrusal olmayan, çok değişkenli, zaman gecikmeli ve bozulmalara açık sistemlerdir. Bu özellikleri nedeniyle CSTR'ler, kontrol sistemlerinin teorik doğruluğunu test etmek için de yaygın olarak tercih edilen bir uygulama platformu haline gelmiştir. Ayrıca, reaktör hacminin sürekli dolu olması ve giriş-çıkış akışlarının sürekli olması, kontrolün gerçek zamanlı ve sürekli olması zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Bu durum, özellikle sıcaklık ve konsantrasyon kontrolünde hassasiyet gerektiren prosesler için gelişmiş denetleyicilere olan ihtiyacı artırmaktadır [7].

Ancak, CSTR sistemlerinin doğrusal olmayan karakteri, parametre belirsizlikleri, zaman gecikmeleri ve çoklu denge noktaları gibi etkenler nedeniyle kontrol edilmesi oldukça zordur [8, 9]. Bu tür sistemler, kontrol edilen büyüklüklerin ani değişimlere maruz kalması ve sistem kazancının çevresel koşullara göre değişmesi nedeniyle klasik sabit parametrelili kontrol yöntemleriyle başarıyla yönetilememektedir. Bu nedenle CSTR sistemleri, yalnızca bir kontrol problemi değil, aynı zamanda adaptif kontrol stratejilerinin de test edilmesi için ideal bir platform sunar.

Klasik kontrol yöntemlerinden biri olan Oransal-İntegral (PI) kontrol yapıları, endüstride en yaygın kullanılan kontrol mekanizmalarındandır. PI denetleyiciler, yapısal sadelikleri, uygulama kolaylıkları ve sezgisel ayarlanabilirlikleri nedeniyle özellikle kimyasal proses kontrolünde sıkça tercih edilmektedir [10, 11]. PI denetleyicilerin tarihçesi, 20. yüzyılın başlarında endüstriyel otomasyon sistemlerinin gelişimiyle birlikte başlamış ve günümüze kadar süregelmiştir. Ancak bu kontrol yapılarının sabit kazançlı olması, sistemin parametrelerinde meydana gelen değişikliklere karşı performanslarının düşmesine yol açmaktadır. Bu durum, sistemin geçici rejim davranışında aşım oranının artmasına, yerleşme süresinin uzamasına ve kararlı durum hatasının yükselmesine neden olabilir.

Rubi ve Nachiappan [12], CSTR sisteminde PI kontrolör kullanarak sıcaklık kontrolü gerçekleştirmiş; ancak sistem parametrelerinin değişkenliği karşısında kontrol performansının zayıfladığını raporlamıştır. Ayrıca, PI kontrolörlerinin sistem içindeki zaman gecikmesi ve ölü zaman gibi etkiler karşısında da yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Stavrov ve arkadaşları [13], bu sorunu aşmak adına değişken parametrelili PI denetleyiciler önermiş ve kazançların çevrimiçi (online) olarak güncellenmesiyle daha kararlı ve hızlı bir sistem tepkisi elde edilebileceğini göstermiştir.

PI kontrolörlerin bir diğer zayıf noktası, gürültülü geri besleme sinyalleri karşısında hassas olması ve bu durumda sistemin ani osilasyonlara girmesidir. Bu gibi durumlarda, özellikle CSTR gibi ısı sistemlerinde, küçük kontrol hataları bile sıcaklık dengesizliğine ve ürün kalitesinde bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle, PI kontrol yapısının daha gelişmiş yapılandırmalarla (örneğin 2DOF PI) desteklenmesi önerilmektedir.

Bu eksiklikleri gidermek amacıyla geliştirilen yöntemlerden biri olan İç Model Kontrolü (IMC), sistemin matematiksel modeline dayanarak denetim sağladığı için daha öngörülebilir ve sağlam bir kontrol yapısı sunar [14, 15]. IMC yöntemi, 1980'li yıllarda Garcia ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve özellikle kimya ve biyoteknoloji endüstrilerinde yaygın olarak uygulanmıştır [3]. IMC'nin temel avantajı, sistem modelini doğrudan kontrol algoritmasına entegre etmesi ve bu sayede kontrol sinyalini optimize edebilmesidir. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerde, sistem modelinin iyi bilinmesi durumunda IMC son derece etkili bir kontrol performansı sunabilir.

IMC-PID yapıları gibi türevsel yaklaşımlar ise hem IMC'nin sağlamlığı hem de PID'nin sadeliğini bir araya getirerek performans avantajı sağlar. Bu hibrit yapı, hem akademik hem de pratik uygulamalarda geniş kabul görmüştür. Kommineni

[16], IMC-PID kontrol yapısını CSTR sistemine başarıyla uygulayarak düşük aşım ve kararlı durum hatası elde edildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, IMC yönteminin başarısı doğrudan doğruya sistem modelinin doğruluğuna bağlıdır. Modelleme hataları, IMC yapısında performans düşüşüne ve zamanla kararsızlığa neden olabilmektedir. Özellikle açık çevrim kararsız sistemlerde veya yüksek frekanslı bozuculara sahip ortamlarda, IMC uygulamaları zorluklarla karşılaşabilir.

Ayrıca, IMC filtre parametresinin seçimi sistem cevabında doğrudan etkili olup; yüksek filtre sabiti seçimi, sistemi aşırı yavaşlatırken; düşük sabit seçimi sistemin kararsızlaşmasına neden olabilir. Literatürde bu dengeyi sağlayacak optimum filtre tasarımları üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur [17]. Ek olarak, IMC'nin giriş sınırlamaları (input saturation) gibi pratik kısıtları hesaba katmadığı durumlarda sistemin kontrol sinyali doyumuna ulaşabileceği ve bu durumda sistemin istenilen tepkiyi veremeyeceği gözlemlenmiştir.

IMC'nin yaygın olarak kullanıldığı endüstriyel alanlar arasında biyoreaktörler, fermantasyon prosesleri, süt ve ilaç üretimi gibi sıcaklık kontrolünün kritik olduğu uygulamalar bulunmaktadır. Bu sistemlerde, proses modelinin değişmediği ve zamanla sabit kaldığı varsayımı altında IMC kontrol stratejileri başarılı sonuçlar vermektedir.

Model Referanslı Uyarlamalı Kontrol (MRAC) ise, sistemin çevresel değişkenlerine gerçek zamanlı olarak uyum sağlayabilen gelişmiş bir kontrol yöntemidir. MRAC yapısında sistem çıktısı, önceden belirlenmiş bir referans modele benzetilmeye çalışılır ve kontrol parametreleri bu hedefe ulaşmak için çevrim içi olarak güncellenir [18–20]. Bu adaptasyon mekanizması çoğunlukla Lyapunov kararlılık teorisi veya MIT kuralına dayalı olarak gerçekleştirilir [21–23]. Lyapunov temelli yaklaşımlar, kontrol sisteminin her durumda kararlı kalmasını garanti ederken, MIT kuralı daha sezgisel bir uyarlama sunmaktadır.

MRAC yöntemi, model belirsizliklerinin ve zamanla değişen sistem dinamiklerinin bulunduğu durumlarda kararlılığı koruyarak istenilen kontrol performansını sağlamaktadır. Özellikle proses kazancının sürekli değiştiği veya yapısal modelleme hatalarının bulunduğu CSTR sistemlerinde MRAC oldukça etkilidir. Vojtesek ve Dostal [8], çift denge noktasına sahip bir CSTR sisteminde MRAC denetleyicisinin etkili performans gösterdiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Sistem kazancı değiştiğinde bile MRAC kontrolörün hatayı minimize edebildiği ve referans modele hızlı bir biçimde yaklaşabildiği gösterilmiştir.

Eze ve arkadaşları [24], MRAC kontrol yapısının geçici rejim performansını artırarak yerleşme süresini ve aşım miktarını azalttığını göstermiştir. Bu kontrol

yapısı, klasik PI kontrolörlerle karşılaştırıldığında bozucu sinyallere karşı daha düşük aşım ve daha hızlı tepki süresi sağlamaktadır. Anbu ve Jaya [25], MRAC ve doğrusal olmayan PI kontrolör yapılarını karşılaştırarak, MRAC'nin değişen sistem parametrelerine karşı daha uyumlu ve kararlı olduğunu raporlamışlardır. Ayrıca, MRAC yaklaşımının güçlü yönlerinden biri de bozucu sinyallere karşı sistemin hassasiyetini azaltarak stabiliteyi sürdürebilmesidir.

MRAC'in endüstriyel uygulamaları özellikle servo motorlar, pnömatik valf sistemleri ve biyoreaktör sıcaklık kontrolü gibi sistemlerde yaygındır. Örneğin, CdLEcg [20], MRAC yapısını içeren bir uçuş kontrol sisteminde başarıyla uygulamış ve klasik PID yapılarının yetersiz kaldığı durumlarda yüksek takip başarısı elde edildiğini göstermiştir. MRAC sistemleri, adaptasyon kabiliyeti sayesinde klasik sabit parametrelili kontrolörlerin karşılaştığı sistematik sınırlamaları ortadan kaldırabilmektedir.

Bununla birlikte, MRAC'in bazı zorlukları da vardır. Uyarılama kazancının yüksek seçilmesi, sistemde hızlı parametre değişimlerine neden olabilir ve bu da kontrol sinyalinin osilasyon yapmasına yol açabilir. Ayrıca, sensör gürültüsü ve modelleme hataları MRAC yapılarında parametre tahminlerinin sapmasına sebep olabilir. Bu gibi durumlarda, düşük geçişli filtreleme (low-pass filtering), sinyal doygunluğu (saturation) ve anti-windup tekniklerinin MRAC yapısıyla birlikte uygulanması önerilmektedir [22].

Son yıllarda bulanık mantık, yapay sinir ağları ve doğadan esinlenen algoritmalar (PSO, GA, ACO vb.) ile desteklenen kontrol yapıları da CSTR sistemleri için önerilmektedir. Mohindru [7], klasik PI kontrolörlere göre fuzzy-PI yapılarının doğrusal olmayan sistemlerde daha etkin olduğunu belirtmiştir. Fuzzy mantık, özellikle sistem dinamiklerinin matematiksel olarak modellenemediği veya gürültü altında çalıştığı durumlarda esneklik sunmaktadır. Kumar ve Patel [26], bulanık mantık ile desteklenen IMC yapılarını önererek bu yapıların sistem kararlılığını artırdığını vurgulamışlardır.

Buna ek olarak, yapay sinir ağları ve adaptif öğrenme temelli denetleyici tasarımları da CSTR sistemlerinde test edilmektedir. Özellikle derin öğrenme ve çevrim içi tahmin algoritmalarıyla donatılmış kontrol yapıları, hem referans model takip başarısını artırmakta hem de sistemin dışsal bozuculara karşı adaptasyon hızını geliştirmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin hesaplama yükü ve eğitilme süresi gibi pratik zorlukları da dikkate alınmalıdır.

Tüm bu yöntemlerin etkinliği, genellikle zaman tanım alanında kullanılan performans metrikleriyle değerlendirilmektedir. Yükselme süresi, yerleşme süresi,

aşım oranı, kararlı durum hatası ve Mutlak Hata İntegrali (IAE) gibi kriterler, kontrolörlerin geçici ve kalıcı rejimdeki başarısını ölçmek için yaygın şekilde kullanılmaktadır. IAE değeri, özellikle uzun süreli hata davranışını ölçmesi bakımından tercih edilmekte; düşük IAE değeri daha iyi toplam performansa işaret etmektedir [27].

Bütün bu literatür incelemeleri göstermektedir ki, CSTR gibi doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde tek bir kontrol yöntemiyle tüm performans kriterlerini karşılamak oldukça zordur. Bu nedenle, farklı kontrol yaklaşımlarının sistematik olarak değerlendirilmesi ve karşılaştırılması, hem akademik hem de pratik uygulamalar açısından gereklidir [17, 28]. Özellikle karmaşık, zamanla değişen veya belirsiz yapıya sahip sistemlerde adaptif, model tabanlı veya akıllı kontrolörlerin kombinasyonu, geleneksel yapılara göre daha üstün performans sergilemektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, CSTR sisteminin sıcaklık kontrolü için üç farklı denetleyici yapı olan PI, IMC ve Lyapunov tabanlı MRAC kontrolörleri tasarlanmış ve MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Her bir kontrol yapısının performansı; yükselme süresi, yerleşme süresi, aşım oranı, kararlı durum hatası ve Mutlak Hata İntegrali (IAE) gibi zaman tanım alanı kriterleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, her bir kontrol yapısının bozucu etkiler karşısındaki dayanıklılığı da değerlendirilerek sistemin farklı koşullar altındaki davranışları incelenmiştir.

Tüm bu literatür çalışmaları ışığında, kontrol yapılarının performans kıyaslaması ve CSTR sistemlerine uygulanabilirliğinin detaylı incelenmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma ile farklı kontrol stratejilerinin CSTR sistemine uygulanabilirliği değerlendirilerek, hangi denetleyici yapısının hangi koşullar altında daha etkin olduğu belirlenmiş ve bu doğrultuda gerçek zamanlı uygulamalara yönelik temel bir çerçeve oluşturulması hedeflenmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının temel amacı, doğrusal olmayan dinamik yapıya sahip olan Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktörü (CSTR) sisteminde sıcaklık kontrolü problemini çözmeye yönelik farklı denetleyici yapılarını incelemek ve karşılaştırmalı analizini yapmaktır. Bu doğrultuda, klasik ve modern kontrol stratejileri olan Oransal-İntegral (PI) kontrol, İç Model Kontrolü (IMC) ve Model Referanslı Uyarlamalı Kontrol (MRAC) yöntemleri değerlendirilmiştir.

CSTR sistemleri, zamanla değişen proses koşulları, doğrusal olmayan davranışlar ve parametre belirsizlikleri nedeniyle kontrolü zor olan sistemlerdendir. Bu nedenle bu çalışmada yalnızca sabit kazançlı klasik kontrol yapıları değil, aynı zamanda adaptif yapıya sahip MRAC gibi ileri düzey kontrol yöntemleri de ele alınmıştır. PI kontrol yöntemi, endüstride yaygın olarak kullanılmasına rağmen, sistem parametrelerindeki değişimlere karşı zayıf uyum gösterir. IMC yöntemi ise, sistemin içsel modeline dayalı olarak daha sağlam ve öngörülebilir bir kontrol yapısı sunarken, MRAC yöntemi referans modele bağlı olarak kontrol parametrelerini çevrim içi güncelleyerek değişen koşullara dinamik olarak uyum sağlar.

Çalışma kapsamında her bir denetleyici yapısı MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş, benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sistem performansları; yerleşme süresi, aşım miktarı, yükselme süresi, kararlı durum hatası ve Mutlak Hata İntegrali (IAE) gibi zaman tanım alanı kriterleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca kontrolcülerin bozucu etkiler karşısındaki dayanıklılıkları da dikkate alınmıştır.

Bu tez çalışması ile, farklı kontrol stratejilerinin CSTR sistemi üzerindeki performanslarının karşılaştırılması sağlanarak, hem akademik literatüre katkı sunulması hem de pratik uygulamalarda kullanılacak etkin kontrol yapılarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Özellikle adaptif kontrol stratejilerinin, klasik yöntemlere kıyasla sunduğu avantajlar bu çalışma kapsamında detaylı şekilde ortaya konmuştur.

### **1.3 Araştırma Hipotezi**

Bu tez çalışmasında ortaya konulan temel hipotez, klasik ve gelişmiş kontrol yöntemleri arasında Model Referanslı Uyarlamalı Kontrol (MRAC) yapısının, doğrusal olmayan ve parametreleri zamanla değişen bir sistem olan CSTR'nin sıcaklık kontrolünde daha üstün performans göstereceğidir. Bu üstünlük; yerleşme süresi, aşım miktarı, kararlı durum hatası ve bozuculara karşı dayanıklılık gibi performans kriterleri üzerinden değerlendirilecektir.

Hipoteze göre, sabit kazançlı klasik PI kontrolcü ile model tabanlı IMC yapısı, belirli koşullarda kabul edilebilir kontrol sağlasa da, sistem parametrelerinde değişim olduğunda performans kaybı yaşayacaktır. Öte yandan, MRAC yapısı, sistem referans modeline göre kendini sürekli güncelleyerek değişken koşullarda dahi kararlı ve hızlı bir yanıt sağlayacaktır.

Bu bağlamda, hipotez aşığıdaki şekilde özetlenebilir:

MRAC yöntemi, CSTR sisteminde sıcaklık kontrolü için PI ve IMC yöntemlerine kıyasla daha düşük yerleşme süresi, daha az aşım ve daha yüksek kararlılık sağlayan üstün bir kontrol performansı sunar.



# 2

## CSTR Modellemesi

---

### 2.1 CSTR Sisteminin Matematiksel Modellemesi

Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktör (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor) sistemlerinin matematiksel modellemesi, kontrol uygulamalarının temelini oluşturan kritik bir aşamadır. CSTR, özellikle sıvı fazdaki kimyasal reaksiyonların kontrol altında gerçekleştirilmesini sağlayan, dinamik doğaya sahip bir sistemdir. Bu nedenle, sistemin davranışını anlamak ve etkili kontrol stratejileri geliştirmek için doğru ve yeterli bir matematiksel modele ihtiyaç vardır.

#### 2.1.1 Modelleme Amacı ve Önemi

Matematiksel modelleme, bir sistemin fiziksel, kimyasal ve termodinamik karakteristiklerinin matematiksel ifadelerle temsil edilmesidir. Bu temsil, modelin daha sonra simülasyon ve kontrol algoritmaları ile entegre edilmesine olanak sağlar. Özellikle CSTR gibi çok değişkenli, zamana bağlı ve kararsız davranış gösterebilen sistemlerde modelleme, sistem için uygun kontrolcü tasarımının ilk adımınıdır.

Modelleme sayesinde:

- Reaktör içindeki ısı ve madde dağılımı tahmin edilir,
- Parametrelerin sistem davranışına etkisi analiz edilir,
- Farklı kontrol yöntemlerinin sistem üzerindeki performansı test edilebilir,
- Gerçek sistem devreye alınmadan önce sanal ortamda senaryolar oluşturulabilir.

#### 2.1.2 CSTR Yapısı ve Giriş-Çıkış Değişkenleri

Bir CSTR sisteminin fiziksel yapısı ve işleyişi, Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu şematik gösterimde reaktöre giren reaktant akışı, çıkan ürün, soğutucu sıvı dolaşımı ve iç karıştırma yapısı temel bileşenler olarak yer almaktadır.



**Şekil 2.1** CSTR sisteminin şematik gösterimi

Bu şekle göre sistemdeki temel fiziksel parametreler şu şekilde tanımlanabilir:

Giriş değişkenleri:

- $F_i$ : Reaktöre giren reaktant akışının debisi (L/min)
- $C_{A_i}$ : Giriş akışındaki A bileşiği derişimi (mol/L)
- $T_i$ : Giriş akışının sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $F_C$ : Soğutucu akışkanın debisi (L/min)
- $T_{C_i}$ : Soğutucu giriş sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

Çıkış değişkenleri:

- $C_A$ : Reaktör çıkışındaki A bileşiği derişimi (mol/L)
- $T$ : Reaktör çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{C_o}$ : Soğutucu çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $F$ : Reaktör çıkış debisi (L/min)

Bu giriş-çıkış ilişkileri, hem dinamik modellemeyi hem de enerji ve madde transferine dayalı kontrol yapılarının temelini oluşturmaktadır. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, reaktör içerisindeki sıcaklık ve derişim değişkenleri, kontrol

stratejileri geliştirilirken dikkate alınacak temel parametrelerdir. Ayrıca soğutucu hattının giriş ve çıkışındaki sıcaklık farkı, sistemdeki ısı transferinin bir göstergesi olarak enerji denklemlerinde kullanılacak ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılı şekilde işlenecektir.

### 2.1.3 Modelleme Yaklaşımına Genel Bakış

Bu tez kapsamında CSTR sisteminin modellenmesi, birinci derece kimyasal reaksiyon ve ideal karıştırma varsayımları altında madde ve enerji denge denklemleriyle tanımlanacaktır. Modelin elde edilmesi aşağıdaki adımlarla gerçekleşecektir:

- Kütle denge denkleminde  $C_A(t)$  için diferansiyel denklem
- Enerji denge denkleminde  $T(t)$  için diferansiyel denklem
- Durum uzayı formunda sistemin yeniden yazılması
- Lineerleştirme ve transfer fonksiyonu çıkarımı
- Parametre tanımlamaları ve MATLAB/Simulink uygulaması

Bu matematiksel temel ilerleyen bölümlerde sunulacak olan kontrolcü tasarımı (PI, IMC, MRAC vb.) çalışmalarına altlık sağlayacak şekilde detaylandırılacaktır.

## 2.2 CSTR Fiziksel Yapısı ve Akış Dinamiği

Bir CSTR sistemi temel olarak sabit hacimli, genellikle silindirik yapıya sahip bir tanktan oluşur. Reaktantlar sabit debiyle reaktöre girerken, ürün karışımı da aynı debiyle sistemden çıkar. Reaktör içerisinde karıştırıcı (impeller) ile sürekli homojen karışım sağlanır. Bu yapının şematik temsili Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Reaktör içindeki karıştırma işlemi, hem sıcaklık hem de konsantrasyon gradyanlarının ortadan kaldırılmasını sağlar. Bu nedenle modelleme çalışmalarında reaktör içerisindeki tamamen karışmış olduğu (perfect mixing) varsayımı yapılır. Bu varsayım altında reaktör içindeki sıcaklık ve konsantrasyonun her noktada eşit olduğu kabul edilir ve sistem tek bir kontrol hacmi olarak modellenebilir [29].

Giriş ve çıkış debileri eşit kabul edildiğinden, reaktör hacmi sabittir ve sürekli kararlı akış (steady-flow) koşulları altında çalışır. Ancak sıcaklık veya konsantrasyon zamanla değişebilir, bu da sistemi zamana bağlı dinamik diferansiyel denklemlerle ifade etmeyi gerektirir.

### 2.3 Kimyasal Tepkime Türleri ve Termodinamik Temeller

CSTR sistemlerinde gerçekleşen reaksiyonların tipi, sistem dinamiğini doğrudan etkiler. Genellikle aşağıdaki genel formdaki tepkimeler göz önüne alınır:



Bu tür bir basit tek yönlü reaksiyon, reaktör içindeki konsantrasyon değişiminin analizi için temel oluşturur. Reaksiyon hızları, sıcaklığa bağlı olarak değişir ve bu durum termodinamik denklemlerle ifade edilir.

Reaksiyon entalpisi ( $\Delta H$ ), reaksiyonun ekzotermik ( $\Delta H < 0$ ) ya da endotermik ( $\Delta H > 0$ ) olup olmadığını belirler. Ekzotermik reaksiyonlar ısı açığa çıkarırken, endotermik reaksiyonlarda dışarıdan ısı sağlanması gerekir. Bu nedenle enerji dengesi kurulurken  $\Delta H$  terimi sistemin sıcaklık kontrolünü belirleyen en önemli parametrelerden biri haline gelir [2, 30].

Bu bağlamda enerji dengesini oluşturan 3 ana terim şunlardır:

- Akış enerjisi: Reaktöre giren ve çıkan akışkanla taşınan enerji.
- Reaksiyon ısısı: Kimyasal dönüşümden kaynaklanan enerji değişimi.
- Isı değiştirici katkısı: Dışarıdan verilen ya da çekilen ısı ( $Q$ ).

Bu terimler aşağıdaki gibi toplanır:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = F \rho C_p (T_{in} - T) + (-\Delta H) V r_A + Q \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte; reaktördeki enerji dengesini ifade eden bu diferansiyel denklem, hem taşınım hem de reaksiyon kaynaklı ısı etkilerini dikkate almaktadır. Denklemden geçen parametreler aşağıda açıklanmıştır:

- $\rho$  : Akışkanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $C_p$  : Sabit basınçta özgül ısı kapasitesi ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ),
- $V$  : Reaktör hacmi ( $\text{m}^3$ ),
- $\frac{dT}{dt}$  : Reaktör sıcaklığının zamana göre değişim hızı ( $\text{K/s}$ ),

- $F$  : Hacimsel akış hızı ( $m^3/s$ ),
- $T_{in}$  : Giriş akışkanının sıcaklığı (K),
- $T$  : Reaktör içerisindeki sıcaklık (K),
- $\Delta H$  : Reaksiyonun entalpisi (J/mol),
- $r_A$  : A bileşeninin reaksiyon hızı ( $mol/m^3 \cdot s$ ),
- $Q$  : Dışarıdan reaktöre verilen ısı (J/s).

Bu denklem, daha sonra normalize edilerek enerji denliği diferansiyel formuna dönüştürülür.

## 2.4 Varsayımlar ve Modelleme Kapsamı

CSTR modellenmesi yapılırken fiziksel ve kimyasal sistemin karmaşıklığını azaltmak adına bazı varsayımlar yapılır [31]. Bu varsayımlar, hem diferansiyel denklemlerin sadeleştirilmesini sağlar, hem de denklemlerin sayısal çözümlenebilirliğini artırır:

- Reaktör içeriği tamamen homojendir (karışım idealdir).
- Giriş-çıkış debileri sabittir.
- Reaktör hacmi sabittir.
- Yoğunluk ( $\rho$ ) ve özgül ısı ( $C_p$ ) sabittir.
- Tek reaksiyon gerçekleşmektedir.
- Giriş bileşikleri ve sıcaklığı sabittir:  $C_{A0}, T_{in}$  sabittir.
- Reaksiyon tersinir değildir.

Bu varsayımlarla birlikte modelde iki adet durum değişkeni tanımlanır:

$C_A(t)$  : Zamanla değişen A bileşiği konsantrasyonu ,  $T(t)$  : Reaktör sıcaklığı

Giriş değişkenleri ise:

$T_{in}(t)$  : Reaktöre giren akışkanın sıcaklığı ,  $Q(t)$  : Reaktöre verilen veya reaktörden çekilen ısı (kontrol girdisi)

Bu yapı, sistemin  $\dot{x} = f(x, u)$  formunda doğrusal olmayan bir dinamik sistem olarak modellenmesini sağlar.

## 2.5 Kütle Denkliklerinin Ayrıntılı Türetilmesi

Bir CSTR sisteminde kütle dengesi, giriş-çıkış akışları ve reaktördeki reaksiyonun etkisiyle zamanla değişen bir konsantrasyon profili oluşturur. A bileşiği için toplam kütle dengesi şu genel formülle ifade edilir [31]:

$$\text{Giriş} - \text{Çıkış} - \text{Tüketim} = \text{Birikim} \quad (2.3)$$

Bu ifade matematiksel olarak şu şekilde yazılır:

$$C_A \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_A}{dt} = F_i C_{Ai} - (-r_A)V - FC_A \quad (2.4)$$

Burada:

- $F$  : Reaktöre giren ve çıkan hacimsel akış hızı (L/min),
- $C_{Ai}$  : Giriş derişimi (mol/L),
- $C_A$  : Anlık A bileşiği derişimi (mol/L),
- $V$  : Reaktör hacmi (L),
- $r_A$  : A bileşiği için reaksiyon hızı ifadesi (mol/(L · min)).

Hacim sabit kabul edildiği için denklem sadeleştirildiğinde:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F_i}{V}(C_{Ai} - C_A) - (-r_A) \quad (2.5)$$

Reaksiyon hızı  $r_A$ , sıcaklık bağımlı olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$r_A = k(T)C_A = k_0 e^{-E_a/(RT)} C_A \quad (2.6)$$

Bu durumda denklem:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F_i}{V}(C_{Ai} - C_A) - k_0 e^{-E_a/(RT)} C_A \quad (2.7)$$

Bu diferansiyel denklem, CSTR içerisindeki bileşik A'nın zamanla nasıl azaldığını belirler ve sistemin dinamik davranışını tanımlar [32].

## 2.6 Enerji Denkliklerinin Ayrıntılı Türetilmesi

Enerji denkliği, sıcaklık değişiminin modellenmesi için gereklidir ve şu genel ifade ile başlar [29, 33, 34]:

$$\text{Giriş Enerjisi} - \text{Çıkış Enerjisi} + \text{Reaksiyon Enerjisi} + \text{Isı Transferi} = \text{Birikim} \quad (2.8)$$

Bu enerji bilançosu, reaktör içerisinde zamanla değişen sıcaklık profilini belirlemek amacıyla kullanılır. Sistemdeki enerji değişimi, akışla taşınan enerji, reaksiyondan açığa çıkan ya da soğurulan enerji ve ceket üzerinden gerçekleşen ısı alışverişini bileşenlerinden oluşur [31].

Bu denkliğin matematiksel formu şu şekildedir:

$$V \frac{dT}{dt} + T \frac{dV}{dt} = F_i T_i - FT - \frac{Q}{\rho C_p} + (-\Delta H)(-r_A) \frac{1}{\rho C_p} \quad (2.9)$$

Denklemden  $Q$  terimi, dış ortamla yapılan ısı alışverişini ifade eder ve aşağıdaki şekilde modellenir [30]:

$$Q = UA(T - T_c) \quad (2.10)$$

Burada:

- $U$ : Isı transfer katsayısı ( $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ),
- $A$ : Isı transfer yüzeyi ( $\text{m}^2$ ),
- $T$ : Reaktör sıcaklığı (K),
- $T_c$ : Ceket sıcaklığı (K).

Hacmin sabit kabul edilmesi ve  $Q$  ifadesinin (2.9) denklemine entegre edilmesiyle enerji denklemi sadeleştirilir ve aşağıdaki nihai forma ulaşılır:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F_i}{V}(T_{in} - T) + \left( \frac{-\Delta H}{\rho C_p} \right) k_0 e^{-E_a/(RT)} C_A - \frac{UA(T - T_c)}{V\rho C_p} \quad (2.11)$$

Bu denklemde yer alan parametreler şu şekilde tanımlanır:

- $T_{in}$ : Reaktöre giren akışkanın sıcaklığı (K),
- $T$ : Reaktör iç sıcaklığı (K),
- $T_c$ : Soğutucu ceket sıcaklığı (K),
- $\Delta H$ : Reaksiyon entalpisi (kJ/kmol),
- $UA$ : Isı transfer katsayısı ile alan çarpımı (kJ/(h · K)),
- $\rho$ : Sıvının yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),
- $C_p$ : Sıvının özgül ısısı (kJ/(kg · K)).

Denklem (2.11), reaktör sıcaklığının zamana bağlı değişimini modellemektedir. Bu değişim; (i) reaktöre giren akışkanın sıcaklık farkı, (ii) ekzotermik reaksiyon sonucu oluşan ısı ve (iii) ceket üzerinden yapılan ısı alışverişi olmak üzere üç temel fiziksel mekanizmaya bağlıdır. Bu doğrultuda enerji denkliği, sistemin sıcaklık kontrolü açısından temel bir dinamik ifade olarak değerlendirilir.

## 2.7 Reaksiyon Kinetiği: Arrhenius Temelli Yaklaşım

Kimyasal reaksiyonlar çoğunlukla sıcaklığa bağlı olarak hız değişir. Bu değişim, Arrhenius denklemi ile modellenir [29, 33]:

$$k(T) = k_0 e^{-E_a/(RT)} \quad (2.12)$$

Burada:

- $k_0$  : Frekans faktörü (deneysel sabit),
- $E_a$  : Aktivasyon enerjisi (J/mol),
- $R$  : Evrensel gaz sabiti (8.314 J/(mol · K)),
- $T$  : Reaktör sıcaklığı (K).

Bu yaklaşım sayesinde sistemin sıcaklık duyarlılığı matematiksel olarak modellenmiş olur. Denklem (2.7) ve Denklem (2.11) doğrudan  $T$ 'ye bağlı hale gelerek sistemin yüksek derecede doğrusal olmayan bir hale gelmesine neden olur. Bu durum, kontrol mühendisliği açısından ilave karmaşıklık yaratmakta ve adaptif ya da model tabanlı kontrolcülerin gerekliliğini ortaya koymaktadır [31, 32, 34, 35].

## 2.8 CSTR Modelinin Doğrusal Hale Getirilmesi

Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör (CSTR) sistemleri, doğası gereği doğrusal olmayan dinamiklere sahiptir. Özellikle sıcaklıkla değişen reaksiyon hızları ve ısı transferi terimleri bu doğrusal olmayı belirgin hale getirir. Kontrol sistemlerinin tasarımı için bu yapıların doğrusal hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, sistemin nominal çalışma noktası etrafında birinci dereceden Taylor serisi açılımı yapılır [31].

### 2.8.1 Doğrusal Olmayan Temel Denklemler ve Doğrusal Olmayan Terimler

CSTR sistemine ait kütle ve enerji denge denklemleri aşağıdaki gibidir [31]:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V}(C_{Ai} - C_A) - \underbrace{k_0 e^{-E/(RT)} C_A}_{\text{Doğrusal olmayan terim}} \quad (2.13)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_{in} - T) + \underbrace{\left(\frac{-\Delta H}{\rho C_p}\right) k_0 e^{-E/(RT)} C_A}_{\text{Doğrusal olmayan terim}} + \frac{UA}{V\rho C_p}(T_c - T) \quad (2.14)$$

Her iki denklemde de doğrusal olmayı, sıcaklık  $T$  ile üstel bağımlılığı içeren Arrhenius ifadesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle: -  $e^{-E/(RT)}$  terimi sıcaklığa göre doğrusal değildir, - Bu terimin  $C_A$  ile çarpımı doğrusal olmayan bileşik bir ifade oluşturur.  $\tau = \frac{V}{F_i}$  olarak kabul edildiğinde 2.14 denklemleri aşağıdaki denklemlere dönüşür 2.15 2.16:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{Ai} - C_A) - (k_0 e^{-E/RT} C_A) \quad (2.15)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau}(T_i - T) - \frac{-Q}{\rho V C_p} + SK_0 e^{-E/RT} C_A \quad (2.16)$$

Enerji denkleminde yer alan doğrusal olmayan terim  $e^{-E/RT} C_A$ , sıcaklık ile üstel bağımlı bir yapıya sahip olup reaksiyon hızının sıcaklığa duyarlılığını temsil etmektedir. Bu terim, enerji denklemi içerisinde reaksiyonun ekzotermik yapısını ve hacimsel ısı dönüşümünü temsil eden

$$S = \left( \frac{-\Delta H}{\rho C_p} \right) \quad (2.17)$$

katsayısı ile birlikte yer alır. Böylece ilgili ifade aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$f(C_A, T) = SK_0 e^{-E/RT} C_A \quad (2.18)$$

Bu doğrusal olmayan terim, sistemin nominal çalışma noktası  $(T_0, C_{A0})$  etrafında birinci dereceden Taylor serisi açılımı ile yaklaşık olarak doğrusal hale getirilir. Genel formu şu şekildedir:

$$\begin{aligned} e^{-E/RT} C_A &= e^{-E/RT_0} C_{A0} \\ &+ \left[ \frac{\partial(e^{-E/RT} C_A)}{\partial T} \right]_{(T_0, C_{A0})} (T - T_0) \\ &+ \left[ \frac{\partial(e^{-E/RT} C_A)}{\partial C_A} \right]_{(T_0, C_{A0})} (C_A - C_{A0}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Yukarıdaki türevlerin yerine yazılmasıyla doğrusal yaklaşık ifade aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} e^{-E/RT} C_A &= e^{-E/RT_0} C_{A0} \\ &+ \left[ \frac{E}{RT_0^2} e^{-E/RT_0} C_{A0} \right] (T - T_0) \\ &+ e^{-E/RT_0} (C_A - C_{A0}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Bu açılım, doğrusal model denklemlerine yerleştirilerek sistemin lineer hale getirilmiş hali aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{dt} = & \frac{1}{\tau}(C_{Ai} - C_A) \\ & - K_0 \left[ e^{-E/RT_0} C_{A0} \right. \\ & + \frac{E}{RT_0^2} e^{-E/RT_0} C_{A0} (T - T_0) \\ & \left. + e^{-E/RT_0} (C_A - C_{A0}) \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = & \frac{1}{\tau}(T_i - T) - \frac{Q}{V\rho C_p} \\ & + SK_0 \left[ e^{-E/RT_0} C_{A0} \right. \\ & + \frac{E}{RT_0^2} e^{-E/RT_0} C_{A0} (T - T_0) \\ & \left. + e^{-E/RT_0} (C_A - C_{A0}) \right] \end{aligned} \quad (2.22)$$

Bu modelin kararlı durumdaki davranışı, türev terimlerinin sıfırlandığı durumda elde edilir. Sistem dengede iken aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$0 = \frac{1}{\tau}(C_{Ai} - C_A^*) - k_0 e^{-E/(RT^*)} C_A^* \quad (2.23)$$

$$0 = \frac{1}{\tau}(T_i - T^*) - \frac{Q}{\rho V C_p} + SK_0 e^{-E/(RT^*)} C_A^* \quad (2.24)$$

Doğrusal hale getirilmiş sistemin durum uzayı temsili aşağıdaki genel formda ifade edilir:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU, \quad Y = CX + DU \quad (2.25)$$

Bu modelde  $X$  ve  $U$  vektörleri, simülasyonda tanımlanan durum ve giriş

değişkenlerine göre belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan simülasyon modelinde:

$$X = \begin{bmatrix} T - T_s \\ \frac{dT}{dt} \end{bmatrix}, \quad U = T_c \quad (2.26)$$

olarak tanımlanmıştır. Giriş değişkeni yalnızca ceket sıcaklığı  $T_c$  olup, çıkış değişkeni reaktör sıcaklığı  $T$ 'dir.

Bu modeldeki sistem matrislerinin genel (parametrik) ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{F}{V} - K_0 e^{-E/RT_0} & -\frac{K_0 E}{RT_0^2} e^{-E/RT_0} C_{A0} \\ -\frac{\Delta H}{\rho C_p} K_0 e^{-E/RT_0} & -\frac{F}{V} + \left(-\frac{\Delta H}{\rho C_p}\right) \frac{K_0 E}{RT_0^2} e^{-E/RT_0} C_{A0} - \frac{UA}{V \rho C_p} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{UA}{V \rho C_p} \end{bmatrix}, \\ C &= [0 \quad 1], \\ D &= [0] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Yukarıdaki parametrik ifadelerde kullanılan fiziksel büyüklüklerin sayısal değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan reaktör parametreleri literatürde yaygın olarak kullanılan CSTR modeline dayanmaktadır [36]. Bu değerler kullanılarak elde edilen sayısal matrisler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.8309 & -9.2246 \times 10^{-156} \\ 1.8030 \times 10^{-156} & -0.8518 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0209 \end{bmatrix}, \\ C &= [0 \quad 1], \\ D &= [0] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Bu sistem için kontrol edilebilirlik matrisi  $\mathcal{C}$  ve gözlemlenebilirlik matrisi  $\mathcal{O}$  aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\mathcal{C} = [B \quad AB] = \begin{bmatrix} 0 & -1.799 \times 10^{-157} \\ 0.0209 & -0.0178 \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1.8030 \times 10^{-156} & -0.8518 \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Yukarıdaki matrisler incelendiğinde, kontrol edilebilirlik ve gözlemlenebilirlik özellikleri teorik olarak sağlanıyor gibi görünmektedir. Ancak,  $10^{-156}$  mertebesindeki elemanların sayısal olarak sıfır kabul edilmesi nedeniyle, pratikte sistemin yalnızca ikinci durumu ( $x_2$ , yani sıcaklık) kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir durumdadır.

Birinci durum ( $x_1$ , yani derişim) ise hem kontrol hem de gözlem açısından izole edilmiştir. Dolayısıyla, sistemin yaklaşık olarak kontrol edilemez ve gözlemlenemez olduğu sonucuna varılmaktadır.

Bu sonuç,  $B$  matrisinin yalnızca ikinci satırının sıfırdan farklı olması ve  $C$  matrisinin yalnızca ikinci durumu ölçüyor olması ile de örtüşmektedir. Özetle:

- Kontrol edilebilen durum:  $x_2$  (sıcaklık)
- Gözlemlenebilen durum:  $x_2$  (sıcaklık)
- $x_1$  (derişim) durumu pratikte hem kontrol hem de gözlem açısından sistemden izole edilmiştir.

Sistem parametrelerinin uygun belirlenmesi (tasarımın gerçek sistemin kısıtlarına uygun yapılması) halinde prosesin her iki durumunda rahatlıkla kontrol edilebilir olduğu bilinmelidir [33].

Sistem matrisinden hareketle oluşturulan sistemin frekans alanındaki transfer fonksiyonu ise aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$G_{\text{CSTR}}(s) = \frac{T(s)}{T_c(s)} = \frac{0.0209s + 0.01738}{s^2 + 1.683s + 0.7077} \quad (2.31)$$

Bu bölümde CSTR sistemine ait doğrusal olmayan matematiksel model ayrıntılı olarak türetilmiş, doğrusal hale getirilmesi için gerekli teorik altyapı sunulmuştur. Elde edilen bu model, bir sonraki bölümde farklı kontrol stratejileri (PI, IMC ve MRAC) tasarlanarak karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirilmesine temel oluşturacaktır.

**Tablo 2.1** Modelleme ve lineerleştirme işlemlerinde kullanılan sistem parametreleri

Değişken	Açıklama	Değer
$F_{os}$	Giriş akış debisi (m <sup>3</sup> /h)	1.13
$V_s$	Reaktör hacmi (m <sup>3</sup> )	1.36
$C_{A\infty}$	Giriş akımı reaktant konsantrasyonu (kmol/m <sup>3</sup> )	8.00
$C_{A0}$	Başlangıç reaktant konsantrasyonu (kmol/m <sup>3</sup> )	3.92
$T_0$	Başlangıç sıcaklığı (°C)	21.7
$V_j$	Ceket hacmi (m <sup>3</sup> )	0.085
$K_0$	Arrhenius ön faktörü (1/h)	$7.08 \times 10^{10}$
$E$	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	69.815
$U$	Genel ısı transfer katsayısı (kJ/m <sup>2</sup> °C·h)	3065
$A$	Isı transfer yüzeyi (m <sup>2</sup> )	23.22
$T_{j0}$	Ceket giriş sıcaklığı (°C)	21.7
$R$	Gaz sabiti (kJ/kmol·K)	8.314
$H$	Reaksiyon entalpisi (kJ/kmol)	-69.815
$C_p$	Sıvı akım özgül ısısı (kJ/kg·K)	3.13
$C_{pj}$	Ceket akımı özgül ısısı (kJ/kg·K)	4.18
$\rho$	Akım yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	800
$\rho_j$	Ceket sıvısı yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1000

## Kontrolcü Tasarımları ve Benzetim Çalışmaları

---

Bu bölümde, CSTR sisteminin sıcaklık kontrolü amacıyla kullanılan farklı denetleyici yapıları ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle yaygın olarak tercih edilen PI kontrolcü tasarımı ele alınmış, ardından IMC yaklaşımıyla geliştirilmiş bir yapı incelenmiştir. Son olarak, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde üstün performans sergileyen MRAC yöntemi uygulanmıştır.

Her bir kontrolcü tipi için ayrı ayrı sistem cevabı değerlendirilmiş; yükselme süresi, yerleşme süresi, aşım oranı, kararlı durum hatası ve IAE gibi performans kriterleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntemlerle denetleyici parametreleri belirlenmiş ve simülasyon ortamında doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde önce PI denetleyici tasarımı ele alınacak, ardından IMC ve MRAC yapıları açıklanacak, son olarak da üç kontrolcü karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

### 3.1 PI Kontrolcü Tasarımı

#### 3.1.1 Denetleyici Yapısı ve Matematiksel Modeli

PI denetleyici, endüstriyel otomasyon sistemlerinde sıklıkla tercih edilen klasik bir geri besleme kontrol yapısıdır. PI yapısı, sistemin referans değere hızlı ve kararlı biçimde ulaşmasını sağlamak için hatanın oransal ( $K_p$ ) ve integral ( $K_i$ ) bileşenlerini birlikte kullanır. Bu sayede hem geçici rejimde iyi bir dinamik cevap hem de kararlı durumda sifıra yakın hata elde edilir.

Sürekli-zamanlı PI denetleyicinin transfer fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.1)$$

Burada  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$  integral zaman sabitidir. PI denetleyiciler, türevsel bileşen içermemesi sayesinde sensör gürültüsüne karşı daha dayanıklıdır [37].

### 3.1.2 Kazanç Ayar Yöntemleri

PI parametrelerinin belirlenmesinde literatürde birçok yöntem önerilmiştir:

- Ziegler-Nichols Yöntemi — Kritik kazanç ve osilasyon periyoduna dayalı ampirik ayar [38].
- Cohen-Coon Yöntemi — FOPDT (First Order Plus Dead Time) modeli üzerinden ayar yapılır [39].
- Zaman Alanı Optimizasyon Yöntemleri — IAE, ISE, ITAE gibi hata metriklerine dayalı ayar [40].
- Frekans Cevabı (Bode) Yaklaşımı — Açık çevrim frekans cevabı analiz edilerek hedef geçiş frekansı ve faz marjı üzerinden kazançlar belirlenir [41].
- Kök Yer Eğrisi (Root Locus) Yöntemi — Sistem kutuplarının konumlarının kazançla göre değişimi incelenerek istenilen geçici rejim davranışı elde edilir [42].
- Kutup Atama Yaklaşımı (Pole Placement) — Kapalı çevrim kutupları doğrudan belirlenerek PI denetleyici kazançları tasarlanır. Özellikle durum-uzay temelli sistemlerde tercih edilir [43].

Bu çalışmada, frekans cevabı temelli Bode diyagramı yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde, sistemin açık çevrim transfer fonksiyonu üzerinden geçiş frekansındaki genlik değeri hesaplanarak PI kazançları belirlenmiştir.

### 3.1.3 Kazanç Hesaplama Süreci (Bode Yöntemi)

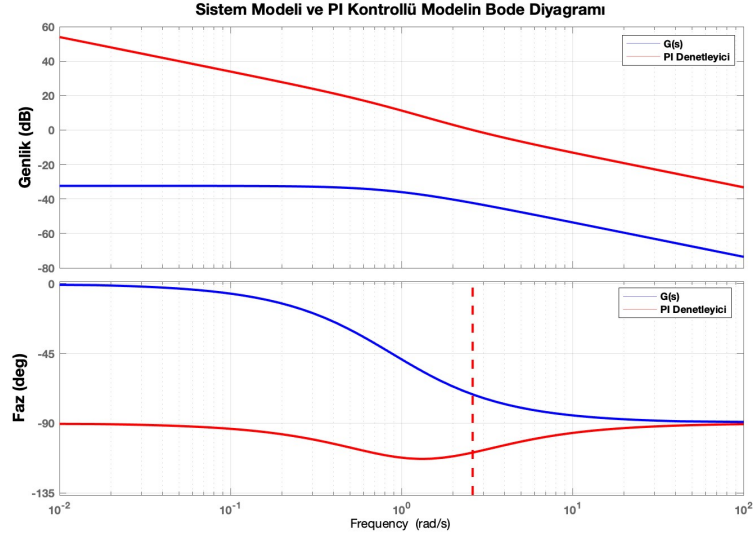
Doğrusal hale getirilmiş tank sisteminin açık çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$G(s) = \frac{0.0209s + 0.01738}{s^2 + 1.683s + 0.7077} \quad (3.2)$$

Sisteme ait frekans cevabı analiz edilmiş ve geçiş frekansı belirlenmiştir:

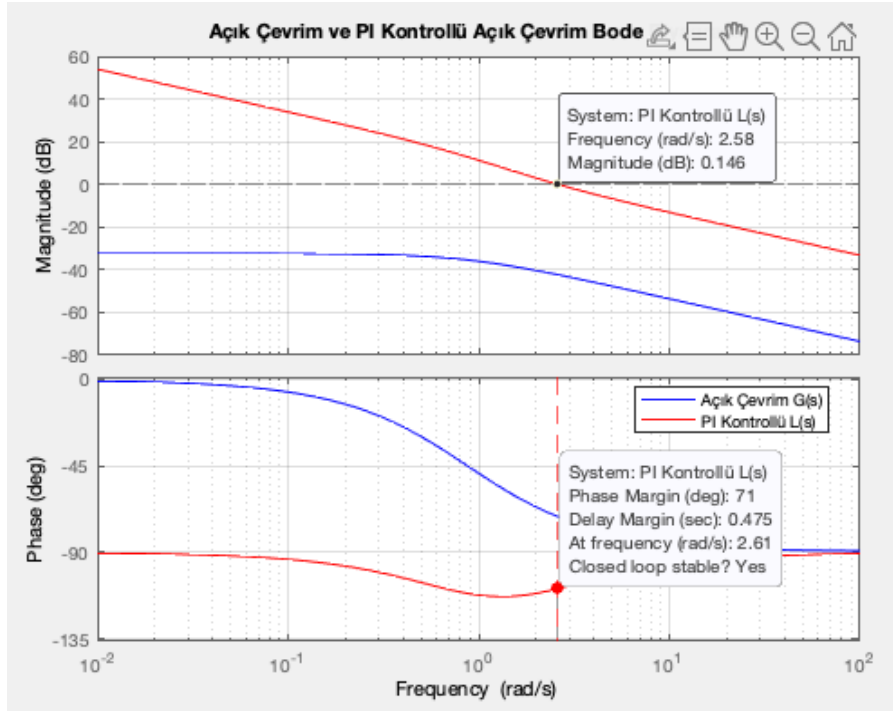
$$\omega_c = 2 \text{ rad/s} \quad (3.3)$$

Şekil 3.1’de sistemin ve PI denetleyicili sistemin Bode diyagramı, Şekil 3.3’te ise frekans cevabı üzerinden PI parametrelerinin hesaplanma süreci gösterilmektedir.



**Şekil 3.1** Bode diyagramı

Şekil 3.2’de sistemin ve PI denetleyicili sistemin bode diyagramındaki kritik değerleri görülmektedir.



**Şekil 3.2** Bode kritik değerler

```

clear; clc; close all;

%% Sistem Tanımı (CSTR transfer fonksiyonu)
num = [0.0209, 0.01738];
den = [1, 1.683, 0.7077];
G = tf(num, den);

%% Kazanç Geçiş Frekansı (seçilen)
wc = 2; % rad/s

%% Frekans Cevabı: |G(jw)| ve ∠G(jw)
[mag, phase] = bode(G, wc);
mag = mag(:); % Mutlak kazanç (mutlak değer)
phase = phase(:); % Faz açısı (derece)

%% PI Denetleyici Parametre Hesaplaması
Kp = 1 / mag;
Ti = 1/wc;
Ki = Kp / Ti;

%% Bode Slotu
figure('Name','Bode Diyagramı','NumberTitle','off');
margin(G)
title('Bode Diyagramı')

%% Türkçe Bilgi Çıktısı
fprintf('\n Kazanç Geçiş Frekansı (wc): %.2f rad/s\n', wc);
fprintf(' |G(jwc)| = %.4f (Kazanç)\n', mag);
fprintf(' ∠G(jwc) = %.2f derece (Faz Açısı)\n', phase);

fprintf('\n PI Denetleyici Parametreleri:\n');
fprintf(' Kp = %.4f\n', Kp);
fprintf(' Ki = %.4f\n', Ki);

```

Şekil 3.3 Frekans cevabı üzerinden PI kazançlarının hesaplanması

Bu frekansta sistemin genlik ve faz bilgileri aşağıda verilmiştir:

$$\text{Genlik: } |G(j\omega_c)| = 0.0096 \quad (3.4)$$

$$\text{Faz açısı: } \angle G(j\omega_c) = -66.94^\circ \quad (3.5)$$

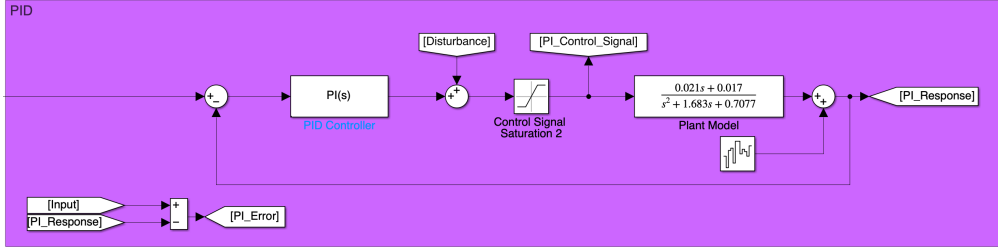
Bu değerlere göre PI denetleyici kazançları aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$K_p = \frac{1}{|G(j\omega_c)|} = \frac{1}{0.0096} \approx 104 \quad (3.6)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{104}{0.5} = 208 \quad (3.7)$$

### 3.1.4 Simülasyon Modeli ve Uygulama Koşulları

PI denetleyici, MATLAB/Simulink ortamında doğrusal CSTR modeli ile birlikte uygulanmıştır. Referans girişi 60 birimlik sabit bir adım sinyalidir. Simülasyon süresi 50 saniye olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'te kontrol algoritmasının blok diyagramı sunulmuştur.

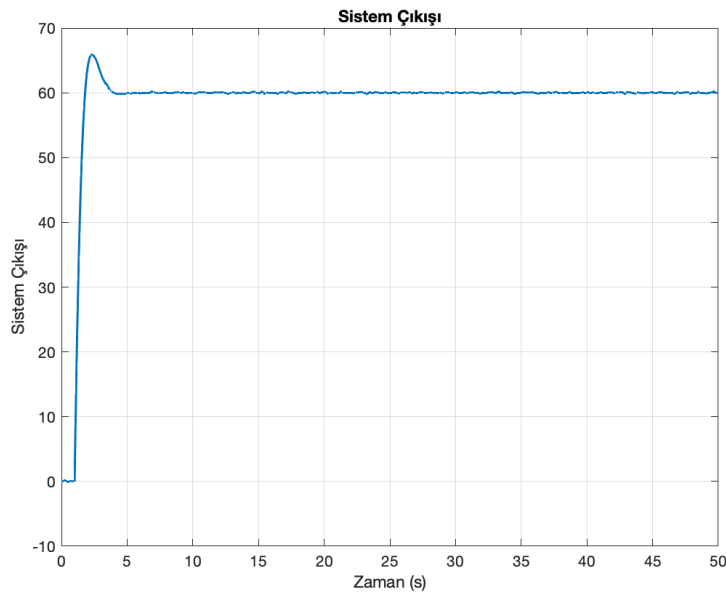


Şekil 3.4 Simulink ortamında PI kontrol algoritması

Simülasyon sırasında sistem çıkışına, gerçek hayattaki sensör gürültülerini temsil etmesi amacıyla band-limitli beyaz gürültü eklenmiştir. Gürültü gücü 0.001 ve örnekleme zamanı 0.2 s. Bu aşamada bozucu (disturbance) girişi uygulanmamıştır.

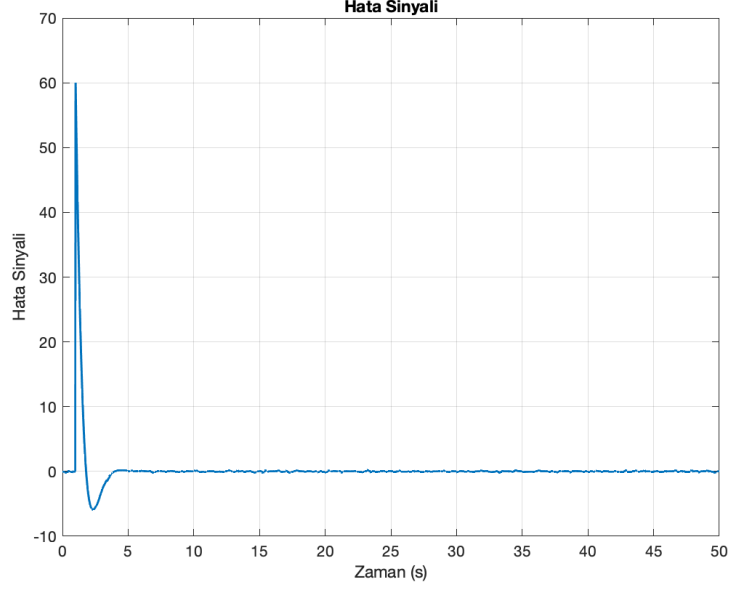
### 3.1.5 Zaman Cevabı Sonuçları ve Teknik Değerlendirme

Simülasyon sonucu elde edilen sistem çıkışı Şekil 3.5'te sunulmuştur. PI kontrolcü, referans sinyal olan 60 birimlik adıma hızlı bir geçiş sağlamış ve yaklaşık 2.5 saniye içinde kararlı duruma ulaşmıştır. Bu süreçte aşım oranı %10'un altında kalmıştır.



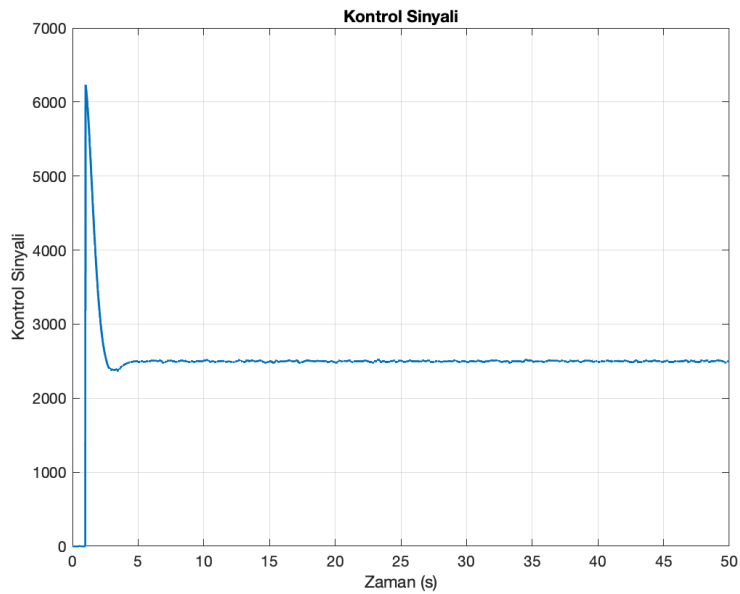
Şekil 3.5 Sistem çıkışı — PI denetleyici uygulaması

Hata sinyali Şekil 3.6’te verilmiştir. İlk anda yüksek hata gözlemlense de sistem yaklaşık 2.5 saniye içinde  $\pm 1$  bandına kalıcı olarak girmektedir. Bu durum, sistemin geçici rejimde etkin bir şekilde denetlendiğini göstermektedir.



**Şekil 3.6** PI denetleyici ile hata sinyali

Şekil 3.7 kontrol sinyalinin zamanla değişimini göstermektedir. PI denetleyici, sistemin referans değere hızlı ulaşması için başlangıçta yüksek genlikli sinyaller üretmektedir. Bu davranış, geçici rejim performansı açısından avantajlı olmakla birlikte, aktüatör sınırlamaları açısından dikkatle değerlendirilmelidir.



**Şekil 3.7** PI denetleyici kontrol sinyali

Yukarıdaki şekillerden elde edilen nicel performans ölçütleri Tablo 3.1’te sunulmuştur. Yerleşme süresi hem MATLAB’in `stepinfo` fonksiyonu ile hem de  $\pm 1.0$  tolerans bandı esas alınarak manuel olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.1** PI denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum)

Performans Ölçütü	Değer
Yükselme Süresi ( $t_r$ )	0.5859 s
Aşım Oranı (%OS)	9.81%
Yerleşme Süresi	2.3773 s
Kararlı Durum Hatası	0.00
IAE	5.91

Simülasyon çıktıları PI kontrolcünün CSTR sistemi için yeterli performans sunduğunu göstermektedir. Sistem referans değere kısa sürede ulaşmış, aşım oranı %10’un altında kalmıştır.

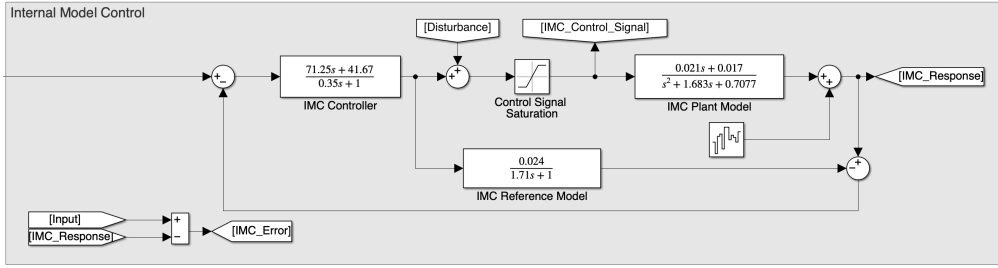
Literatürde de benzer şekilde, klasik PI denetleyicilerin temel kontrol ihtiyaçlarını karşılamakla birlikte, dış bozululara ve model belirsizliklerine karşı zayıf olduğu belirtilmektedir [44, 45]. Bu nedenle, takip eden bölümlerde IMC ve MRAC gibi gelişmiş yöntemlerle karşılaştırmalı bir analiz sunulacaktır.

## 3.2 IMC (Internal Model Control) Tabanlı Kontrolcü Tasarımı

### 3.2.1 IMC Teorisi ve CSTR Sistemine Uygulanması

IMC, prosesin matematiksel modeliyle birlikte çalışan, model odaklı bir kontrol yaklaşımıdır. IMC yapısında, kontrolör tasarımı doğrudan sistemin modeline dayanır. Bu yaklaşım sayesinde hem referans takibi hem de bozucu bastırma performansı yüksek seviyede sağlanabilir. IMC’nin avantajları arasında; yapısal basitlik, içsel kararlılık sağlama ve modelleme hatalarına karşı daha fazla tolerans bulunur [46].

IMC mimarisinde gerçek sistem  $G(s)$ , kontrolör  $Q(s)$  ve referans model  $G_{ref}(s)$  ile yapılandırılır. Kontrolör  $Q(s)$  genellikle sistemin yaklaşık ters modeline dayalı olarak tasarlanır ve düşük geçiren bir filtre ile kararlılık sağlanır [47]. Şekil 3.8’te kullanılan IMC yapısının Simulink blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8 Simulink ortamında IMC kontrol algoritması

### 3.2.2 IMC Filtresi Seçimi ve Sistem Parametrelerine Etkisi

Bu çalışmada kontrolör aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$Q(s) = \frac{71.25s + 41.67}{0.35s + 1} \quad (3.8)$$

Burada  $Q(s)$ , sistemin yaklaşık tersine ve bir filtreye sahiptir. Filtre zaman sabiti  $\lambda = 0.35$  olarak belirlenmiştir. Küçük  $\lambda$  değerleri sistemin daha hızlı cevap vermesini sağlarken, büyük değerler gürültüye karşı daha dayanıklı yapılar oluşturur. Bu parametre seçimi, sistemin geçici rejim tepkisi ve kararlılığı açısından önemli bir rol oynar [48].

IMC tasarımında kullanılan referans model, sistemin ikinci dereceden dinamiğinden sadeleştirilerek oluşturulmuştur. Bu sadeleştirme, IMC kontrolörünün kararlılığını sağlamak ve uygulama kolaylığı oluşturmak için tercih edilmiştir [49]. Model indirgeme ve referans model oluşturma süreci aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Gerçek sistem transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{0.021s + 0.017}{s^2 + 1.683s + 0.7077} \quad (3.9)$$

DC kazanç:

$$G(0) = \frac{0.017}{0.7077} \approx 0.024 \quad (3.10)$$

Karakteristik denklem:

$$s^2 + 1.683s + 0.7077 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \Rightarrow \omega_n \approx 0.695, \zeta \approx 1 \quad (3.11)$$

Zaman sabiti:

$$\tau = \frac{1}{\zeta\omega_n} = \frac{1}{0.695} \approx 1.71 \quad (3.12)$$

Sonuç olarak referans model:

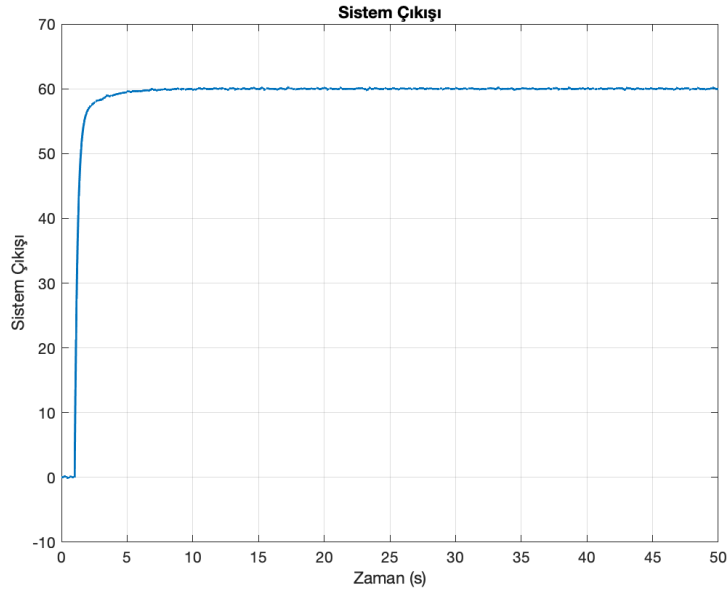
$$G_{\text{ref}}(s) = \frac{0.024}{1.71s + 1} \quad (3.13)$$

Bu yapı, hem sadeleştirilmiş bir dinamik model hem de sistemin DC kazancı ile uyumlu olacak şekilde oluşturulmuştur.

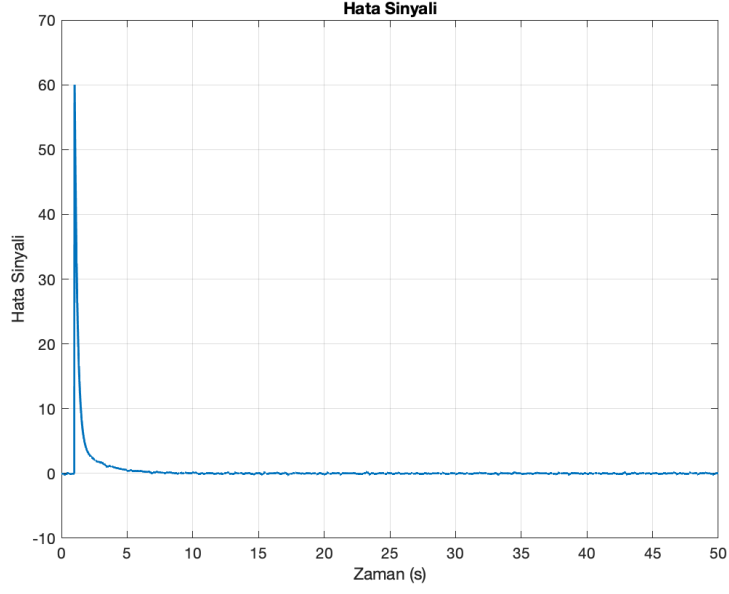
### 3.2.3 IMC Denetleyici ile Benzetim Sonuçları ve Kararlılık Analizi

IMC kontrolörünün performansını değerlendirmek amacıyla, MATLAB/Simulink ortamında 50 saniyelik bir simülasyon yapılmıştır. Sisteme 60 birimlik sabit bir referans adımı uygulanmıştır. Ayrıca çıkış sinyaline, sensör kaynaklı belirsizlikleri modellemek için band-limitli beyaz gürültü eklenmiştir (güç: 0.001, örnekleme zamanı: 0.2 s). Bozucu giriş bu aşamada aktif edilmemiştir.

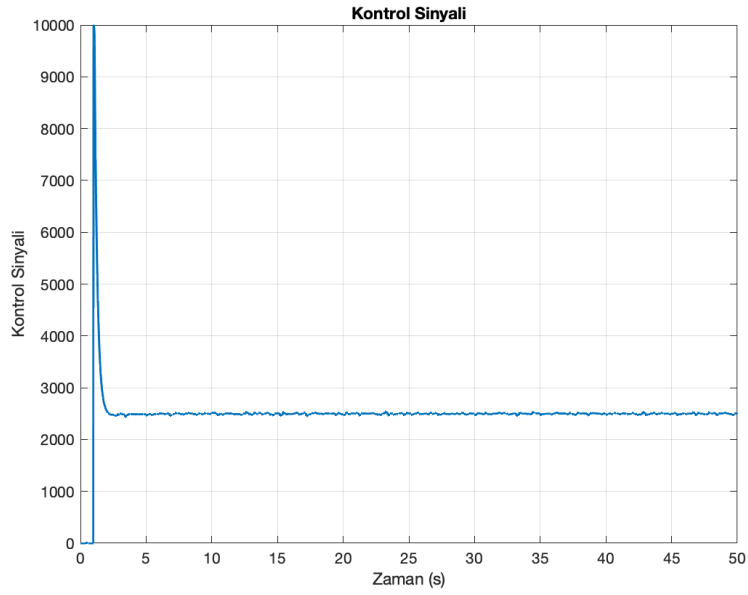
Şekil 3.9 sistem çıkışını, Şekil 3.10 hata sinyalini, Şekil 3.11 ise kontrol sinyalini göstermektedir.



**Şekil 3.9** IMC denetleyici ile sistem çıkışı



**Şekil 3.10** IMC denetleyici hata sinyali



**Şekil 3.11** IMC denetleyici kontrol sinyali

Simülasyon sonuçlarına ait sayısal performans ölçütleri Tablo 3.2’te sunulmuştur. Yerleşme süresi hem `stepinfo` ile hem de  $\pm 1.0$  tolerans bandına göre manuel olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.2** IMC denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum)

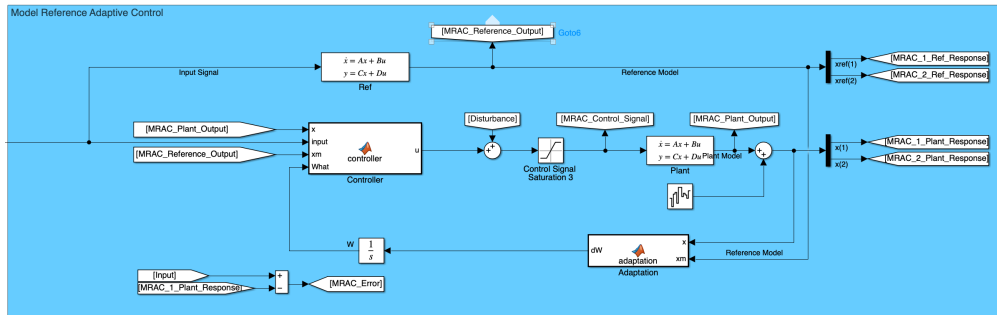
Performans Ölçütü	Değer
Yükselme Süresi ( $t_r$ )	0.6367 s
Aşım Oranı (%OS)	0.42%
Yerleşme Süresi	3.0113 s
Kararlı Durum Hatası	0.00
IAE	3.42

### 3.3 MRAC (Model Reference Adaptive Control) Tabanlı Kontrolcü Tasarımı

#### 3.3.1 MRAC Teorisi ve Uygulama Yapısı

Model Referanslı Uyarlamalı Kontrol (MRAC), dinamik karakteristikleri değişken olan veya yapısal belirsizlik içeren sistemlerin denetimi için geliştirilmiş bir adaptif kontrol yaklaşımıdır. Bu yöntemde, sistem çıktısının belirlenen bir referans modelin çıktısını takip etmesi hedeflenir. Uyarlamalı yapı sayesinde sistem parametrelerindeki değişimlere karşı gerçek zamanlı uyum sağlanır [50, 51].

Şekil 3.12'te MRAC yapısının Simulink ortamında modellenmiş hali gösterilmektedir. Sistemin hem referans modeli hem de gerçek modeli durum-uzay temsili ile tanımlanmıştır.



**Şekil 3.12** Simulink ortamında MRAC kontrol algoritması

#### 3.3.2 Referans Model ve Gerçek Sistem Tanımı

Referans model, ikinci dereceden aşım oranı  $\leq 0.1$  ve yerleşme süresi  $t_s = 0.7$  s olacak şekilde belirlenmiş ve aşağıdaki durum-uzay formuyla tanımlanmıştır:

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -16 & -8 \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 16 \end{bmatrix}, \quad C = I_{2 \times 2}, \quad D = 0 \quad (3.14)$$

Gerçek sistemin (plant) doğrusal hale getirilmiş durumu ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.7077 & -1.683 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = I_{2 \times 2}, \quad D = 0 \quad (3.15)$$

### 3.3.3 Lyapunov Tabanlı Uyarılama Yasası

MRAC yapısında denetleyicinin amacı, sistem çıktısı  $y(t)$  ile referans model çıktısı  $y_m(t)$  arasındaki hata sinyalini en aza indirmektir. Bu amaçla Lyapunov kararlılık teorisine dayalı uyarılama yasası kullanılmıştır.

Pozitif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$V(t) = e^T P e \quad (3.16)$$

Burada  $P = P^T > 0$  matrisidir. Lyapunov teorisine göre sistemin kararlı olması için  $V(t)$  fonksiyonunun türevinin negatif olması gerekir:

$$\dot{V}(t) = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} < 0 \quad (3.17)$$

Hata dinamiği şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{e} = A x + B u - A_m x_m - B_m r \quad (3.18)$$

Denetleyici kontrol sinyali aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$u(t) = K_x x + K_r r - W^T x \quad (3.19)$$

Burada sabit kazançlar aşağıdaki gibidir:

$$K_x = \begin{bmatrix} -15.2923 & 0.3170 \end{bmatrix}, \quad K_r = 16 \quad (3.20)$$

Kararlılığı sağlamak için Lyapunov denklemi şu şekilde çözülür:

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (3.21)$$

Bu denklem MATLAB ortamında aşağıdaki kodla çözülmüştür:

```
Am = [0 1; -16 -8];  
Q = eye(2);  
P = lyap(Am', Q);
```

Elde edilen Lyapunov çözüm matrisi:

$$P = \begin{bmatrix} 1.312 & 0.031 \\ 0.031 & 0.066 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Uyarlama yasası:

$$\dot{W}(t) = \Gamma x e^T P B \quad (3.23)$$

Bu yapı MATLAB'de aşağıdaki fonksiyonla modellenmiştir:

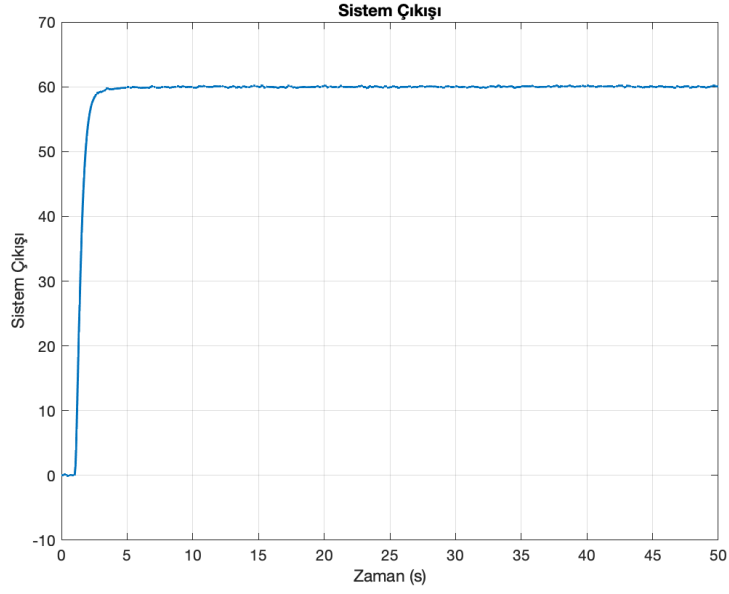
```
function dW = adaptation(x, xm)  
Gamma = 40;  
P = [1.312 0.031; 0.031 0.066];  
B = [0; 1];  
e = x - xm;  
dW = Gamma * x * (e' * P * B);
```

### 3.3.4 Simülasyon Modeli ve Uygulama Koşulları

MRAC yapısı Simulink ortamında 50 saniyelik bir simülasyon süresinde test edilmiştir. Sisteme 60 birimlik sabit bir step referansı uygulanmıştır. Gerçek sistem çıkışına band-limitli beyaz gürültü eklenmiştir (gürültü gücü: 0.001, örnekleme zamanı: 0.2 s). Başlangıç koşulları sıfır olarak alınmıştır.

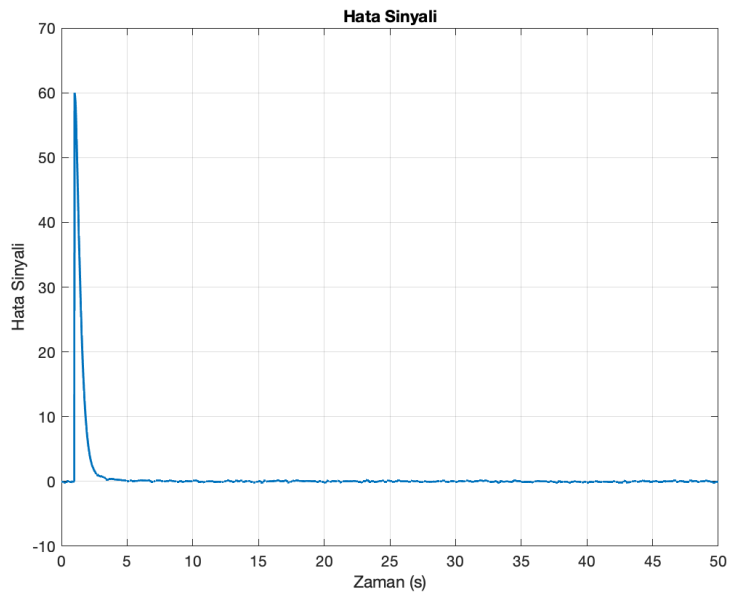
### 3.3.5 Zaman Cevabı Sonuçları ve Teknik İnceleme

MRAC yapısının referans izleme başarımı ve sistem kararlılığı, zaman domeni tepkileri üzerinden değerlendirilmiştir. Aşağıdaki figürler sırasıyla sistem çıkışını, hata sinyalini ve kontrol sinyalini göstermektedir.



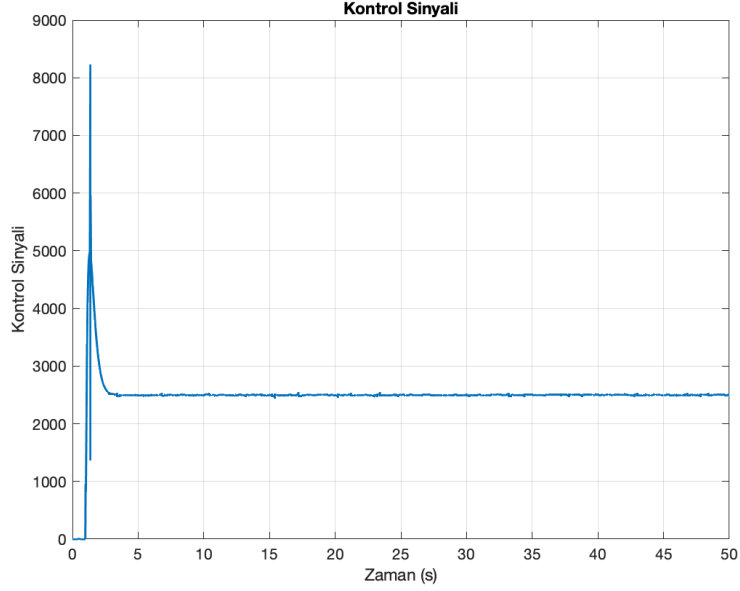
Şekil 3.13 MRAC kontrol altında sistem çıkışı

Şekil 3.13, sistemin referans adımına hızlı bir şekilde cevap verdiğini ve yaklaşık 1.5 saniyede kararlı duruma ulaştığını göstermektedir. Kararlı durum hatası oldukça düşüktür ve aşım oranı kabul edilebilir düzeydedir.

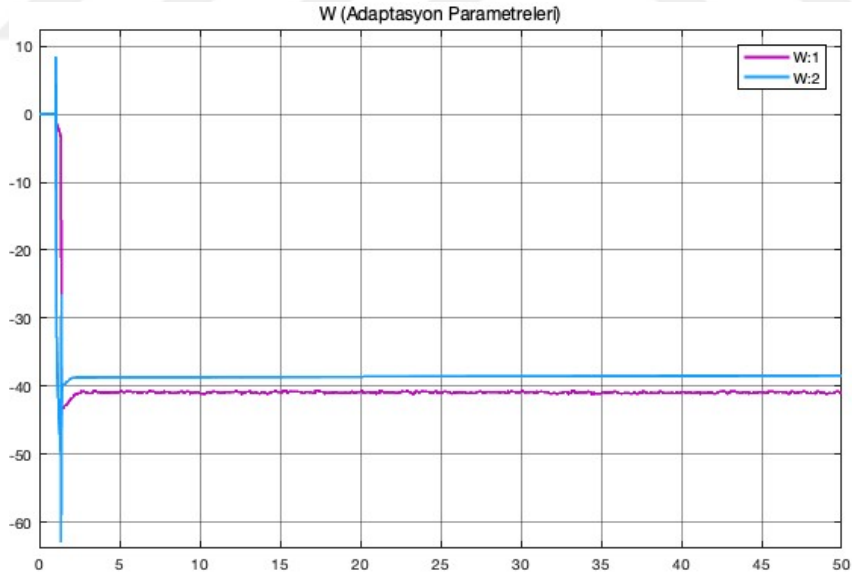


Şekil 3.14 MRAC kontrol altında hata sinyali

Şekil 3.14, hata sinyalinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Başlangıçta yüksek seviyede olan hata, uyarlama yasası sayesinde hızla bastırılmış ve yaklaşık 2 saniye içinde sıfıra yakın değere düşmüştür.



Şekil 3.15 MRAC kontrol sinyali



Şekil 3.16 MRAC adaptasyon parametreleri

Şekil 3.15'de görüldüğü üzere, kontrol sinyali simülasyonun başında yüksek genlikli ve salınımlı bir yapı sergilemektedir. Bu davranış, adaptasyon sürecinin hızlı ve agresif bir şekilde başlamasından kaynaklanmaktadır. Zamanla kontrol sinyali stabil hale gelir ve sistem kararlı şekilde çalışmaya devam eder.

### 3.3.6 Performans Ölçütleri ve Nicel Analiz

Simülasyon sonuçlarına ait zaman alanı performans ölçütleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Yerleşme süresi hem `stepinfo` komutu hem de manuel olarak  $\pm 1.0$  toleransına göre değerlendirilmiştir.

**Tablo 3.3** MRAC denetleyici için zaman alanı performans ölçütleri (bozucusuz durum)

Performans Ölçütü	Değer
Yükselme Süresi ( $t_r$ )	0.8355 s
Aşım Oranı (%OS)	0.35%
Yerleşme Süresi	2.63 s
Kararlı Durum Hatası	0.00
IAE	1.96

MRAC yapısı, referans modeli izleme performansı açısından oldukça başarılı sonuçlar sunmuştur. Özellikle düşük aşım oranı ve hızlı başlangıç tepkisi ile geçici rejim kriterlerini karşılamaktadır. Ancak kontrol sinyalinin başlangıçta yüksek genlikli değerler alması, adaptasyonun erken fazda agresif çalıştığını göstermektedir.

Lyapunov tabanlı adaptasyon yasası sayesinde sistem, kararlı bir şekilde referans modele yakınsar. Bu yaklaşım, adaptif yapının kararlılığını matematiksel olarak garanti altına alır [52, 53].

MRAC'ın PI ve IMC yapılarına göre en büyük avantajı, model belirsizliklerine ve değişen sistem dinamiklerine karşı uyarlanabilir yapısıdır. Ancak kontrol sinyalinin sınırlanması ve adaptasyon kazancının ayarlanması gibi pratik mühendislik sorunları dikkatle yönetilmelidir.

### 3.4 Benzetim Karşılaştırmaları

Bu bölümde PI, IMC ve MRAC denetleyicilerinin performansları, önce doğrusal hale getirilmiş CSTR modeli üzerinde tasarlandıktan sonra, doğrusal olmayan (non-linear) CSTR ortamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu bağlamda, doğrusal kontrolcü kazançları doğrusal model üzerinden elde edilmiş, ardından doğrusal olmayan modele uygulanmıştır [54].

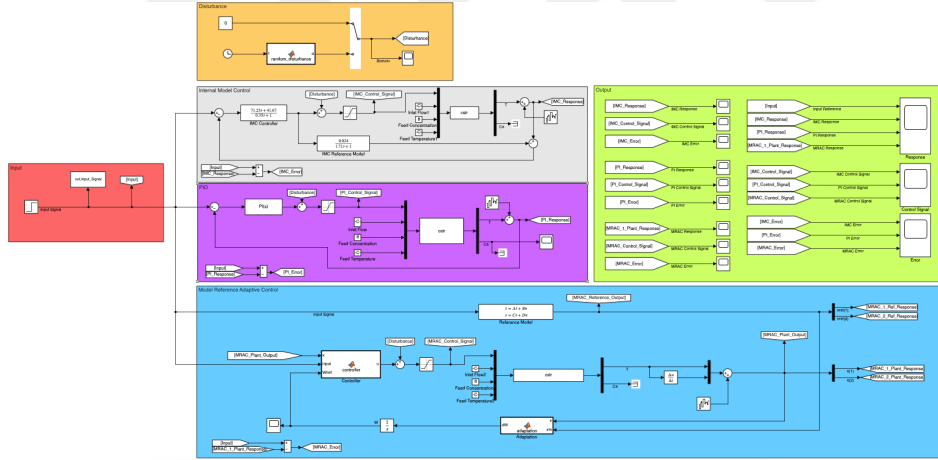
Simülasyonlar 50 saniyelik bir süre boyunca,  $60^\circ C$  değerindeki basamak fonksiyonu altında gerçekleştirilmiştir.

Her bir kontrolcü için sistem çıkışı (reaktör sıcaklığı), hata ve kontrol sinyali grafiksel olarak incelenmiş, ayrıca zaman domeni performans ölçütleri (yükselme süresi, aşım oranı, yerleşme süresi, kararlı durum hatası ve IAE) hesaplanarak karşılaştırmalı olarak tablo hâlinde sunulmuştur.

Simülasyonlarda kullanılan CSTR modeli doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve bu yapı, enerji ve madde denge denklemleri ile tanımlanır (bkz. Denklem 2.14 ve Denklem 2.13). İlgili MATLAB fonksiyonu kullanılarak sistem dinamiği modellenmiş ve Simulink ortamına entegre edilmiştir (Şekil 3.18).

MATLAB fonksiyonunun SIMULINK entegrasyonu aşağıdaki şekilde sağlanmıştır [54]. Entegrasyon için kullanılan parametreler şu şekildedir :

- Reaktör giriş debisi (giriş akış hızı): Besleme akışı ( $L/s$ ) =  $1 \cdot 13/3600$
- Besleme konsantrasyonu:  $C_{A0} = 8 \text{ kmol/m}^3$
- Besleme sıcaklığı:  $T_{in} = 294.85 \text{ K}$  Celcius'a dönüşüm yapılmıştır



Şekil 3.17 CSTR sisteminin simulink ortamındaki genel görünümü

```

function [sys,x0,str,ts] = cstr(t,x,u,flag)
% CSTR sistemi için temel S-function tanımı
switch flag
case 0
[sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(); % Başlatma
case 1
sys = mdlDerivatives(t,x,u); % Türevler
case 3
sys = mdlOutputs(x); % Çıktılar
otherwise
sys = [];
end
end

%% Başlangıç ayarları ve boyutlar
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2; % Sürekli durum: [T; Ca]
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 2; % Çıktılar: [T; Ca]
sizes.NumInputs = 4; % Girişler: [Tc; Fi; Cai; Ti]
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
x0 = [273.15; 3.92]; % Başlangıç koşulları (T0 (Kelvin), Ca0)
str = [];
ts = [0 0]; % Sürekli zaman
end

%% Sistem dinamikleri (dT/dt, dCa/dt)
function sys = mdlDerivatives(~,x,u)

% Girişler
Tc = u(1); % Ceket sıcaklığı
Fi = u(2); % Giriş debisi
Cai = u(3); % Giriş konsantrasyonu
Ti = u(4); % Giriş sıcaklığı

% Durum değişkenleri
T = x(1); % Reaktör sıcaklığı
Ca = x(2); % Konsantrasyon

% Sabit parametreler
V = 1.36; % Hacim
rho = 800; % Yoğunluk
Cp = 3130; % Özgül ısı
k0 = 7.08e10 / 3600; % Reaksiyon sabiti (1/s)
E = 69815; % Aktivasyon enerjisi (J/mol)
R = 8.314; % Gaz sabiti
UA = 3065 * 23.22; % Isı transfer katsayısı
Hrxn = -69.815e3; % Reaksiyon ısısı (J/mol)

% Reaksiyon hızı
k = k0 * exp(-E / (R * T));

% Enerji ve madde denklemleri

```

Şekil 3.18 Doğrusal olmayan cstr sistemini tanımlayan matlab m-file kodu

$$dT = Fi/V * (Ti - T) ...$$

$$- UA / (V * rho * Cp) * (T - Tc) ...$$

$$+ (-Hrxn) / (rho * Cp) * k * Ca;$$

$$dCa = Fi/V * (Cai - Ca) - k * Ca;$$

```
sys = [dT; dCa];
end
```

```
% %% Çıkış fonksiyonu
% function sys = mdlOutputs(x)
% sys = x; % [T; Ca] doğrudan çıkış
```

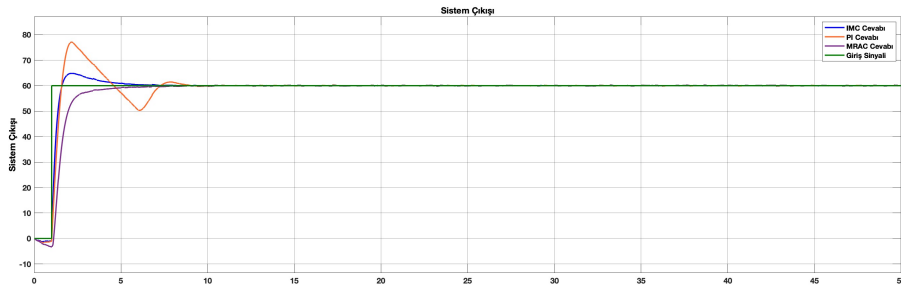
```
function sys = mdlOutputs(x)
T_C = x(1) - 273.15; % Kelvin → Celsius dönüşümü
Ca = x(2); % Konsantrasyon olduğu gibi kalsın
sys = [T_C; Ca];
end
```

Şekil 3.19 Doğrusal olmayan cstr sistemini tanımlayan matlab m-file kodu 2

Elde edilen sonuçlar, bozucusuz ve bozucu etkisi altındaki sistem davranışlarını kapsamlı bir şekilde ortaya koymakta olup, her kontrolcünün hem nominal hem de bozucu durumlar altındaki etkinliği ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

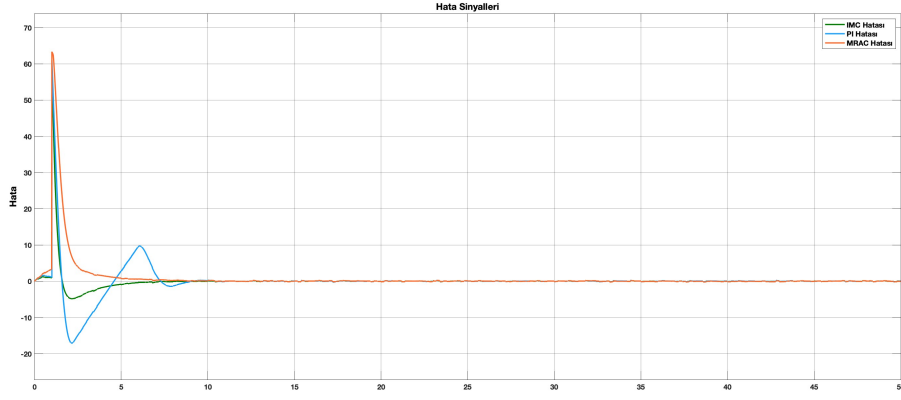
### 3.4.1 Bozucusuz (Nominal) Durumda Sistem Cevapları

İlk olarak, dış bozucu sinyal devreye alınmadan yalnızca sensör gürültüsü altında kontrolcülerin davranışı incelenmiştir. Şekil 3.20, 3.21 ve 3.22 sırasıyla sistem çıkışı, hata sinyali ve kontrol sinyali değişimlerini göstermektedir.



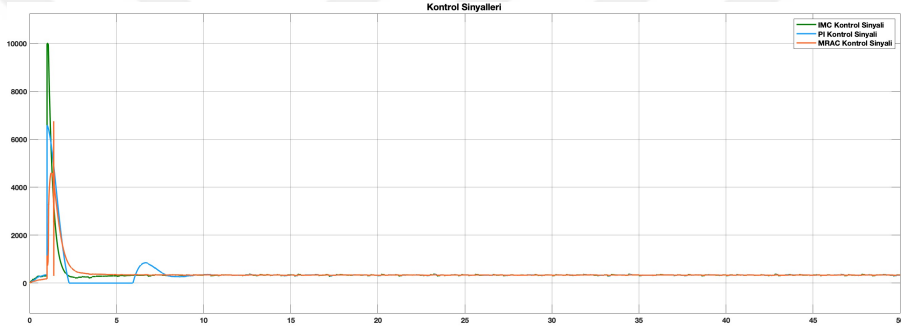
Şekil 3.20 Bozucusuz durumda IMC, PI ve MRAC denetleyicilerinin sistem çıkışı

Şekil 3.20'e göre tüm denetleyiciler hızlı yükselme göstermekte ve kısa sürede kararlı duruma ulaşmaktadır. MRAC yapısı en hızlı yükselme süresine sahiptir.

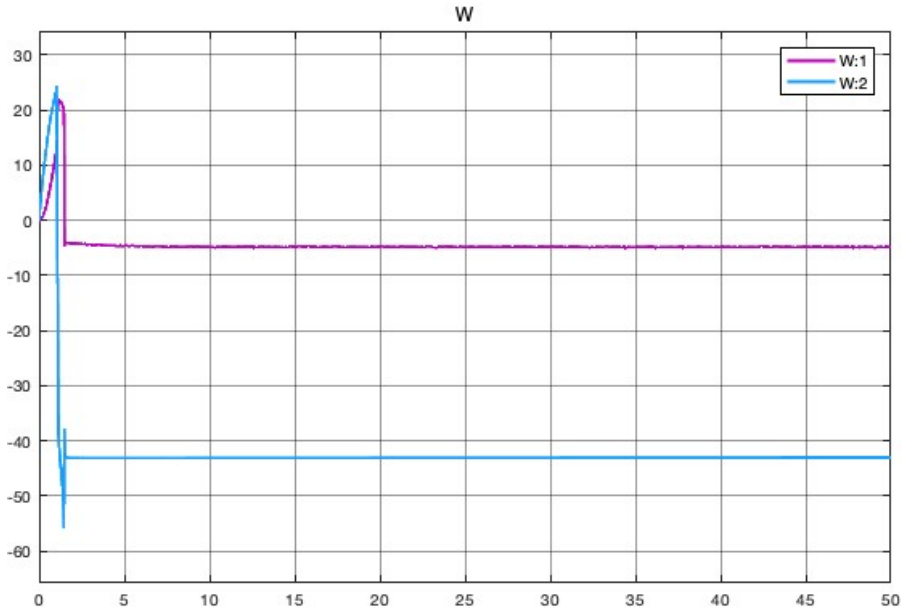


**Şekil 3.21** Bozucusuz durumda hata sinyalleri karşılaştırması

Şekil 3.21’te görüldüğü üzere, MRAC hata sinyalini en hızlı biçimde sıfıra yakın bir seviyeye düşürmektedir.



**Şekil 3.22** Bozucusuz durumda kontrol sinyalleri karşılaştırması



**Şekil 3.23** MRAC adaptasyon parametreleri

Şekil 3.22 incelendiğinde, bozucusuz ortamda tüm kontrolcüler için başlangıçta benzer bir kontrol tepkisi üretildiği, ancak bu tepkinin kısa sürede hızla azalarak kararlı bir seviyeye geldiği görülmektedir. PI ve IMC kontrolörlerinin sinyalleri kısa süreli hafif salınımlar içerse de, genlik açısından MRAC kontrolcüsüne göre belirgin bir farklılık göstermemektedir. MRAC kontrolcüsü, kontrol sinyalini daha sönümlü bir şekilde üretmiş ve özellikle kararlı duruma geçtikten sonra düşük genlikli bir kontrol davranışı sergilemiştir. Genel olarak, bozucusuz koşullarda üç kontrolcü de benzer büyüklükte bir başlangıç kontrol çabası göstermiş, ancak MRAC kontrolcüsü daha yumuşak ve dengeli bir kontrol stratejisi sunmuştur.

**Tablo 3.4** Bozucusuz durumda denetleyici performans karşılaştırması

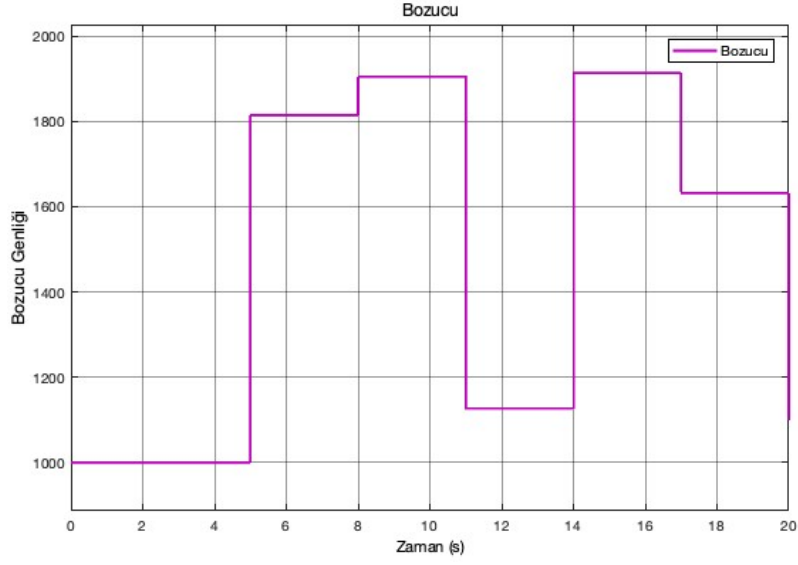
Performans Ölçütü	PI	IMC	MRAC
Yükselme Süresi ( $t_r$ )	0.443 s	0.402 s	1.028 s
Aşım Oranı (%OS)	28.47 %	8.05 %	0.38 %
Yerleşme Süresi ( $t_s$ )	8.12 s	4.54 s	4.39 s
Kararlı Durum Hatası	0.00	0.00	0.00
IAE	37.78	7.66	7.28

Tablo 3.4 incelendiğinde, MRAC denetleyicisinin bozucusuz ortamda en kısa yerleşme süresine sahip olduğu, dolayısıyla referans değere en hızlı şekilde ulaşan kontrol yapısı olduğu görülmektedir. IMC kontrolcüsü de kısa sürede dengeye ulaşmaktadır. %OS değeri açısından en düşük aşımı MRAC üretmektedir (%0.38). PI denetleyicisi ise görece daha yavaş yerleşmekte ve en yüksek aşım oranına (%28.47) sahiptir.

IAE ölçütü açısından değerlendirildiğinde, MRAC en düşük toplam hata ile en verimli denetimi sağlamıştır. Onu IMC ve PI kontrolcülerini takip etmektedir. Kararlı durum hatası açısından ise IMC kontrolcüsü en düşük değere ulaşmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, MRAC denetleyicisi en hızlı ve etkili kontrolü sağlarken, IMC kontrolcüsü de daha küçük kararlı durum hatası ve dengeli geçici yanıt üretmektedir.

### 3.4.2 Bozucu Giriş (Disturbance) Altında Sistem Performansı

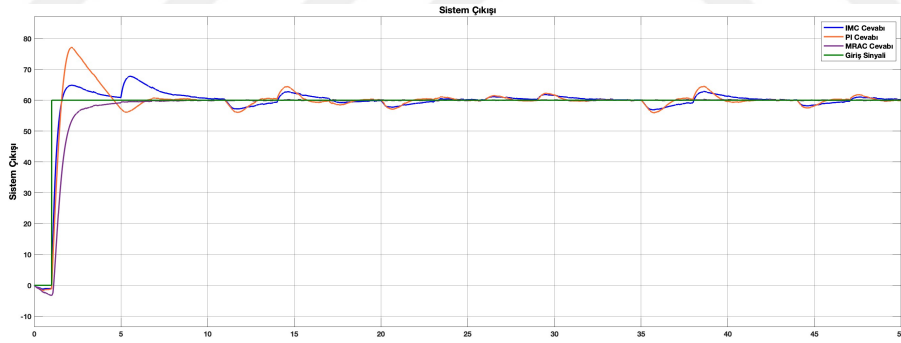
İkinci aşamada, her kontrol yapısı için sisteme zamanla değişen bir bozucu giriş sinyali uygulanmıştır. Bu sinyal, MATLAB ortamında oluşturulan rastgele değere sahip ve her 3 saniyede bir değişen bir fonksiyonla üretilmiştir. Sinyal yapısı Şekil 3.24'de verilmiştir.



**Şekil 3.24** Zamana bağlı bozucu giriş sinyali profili

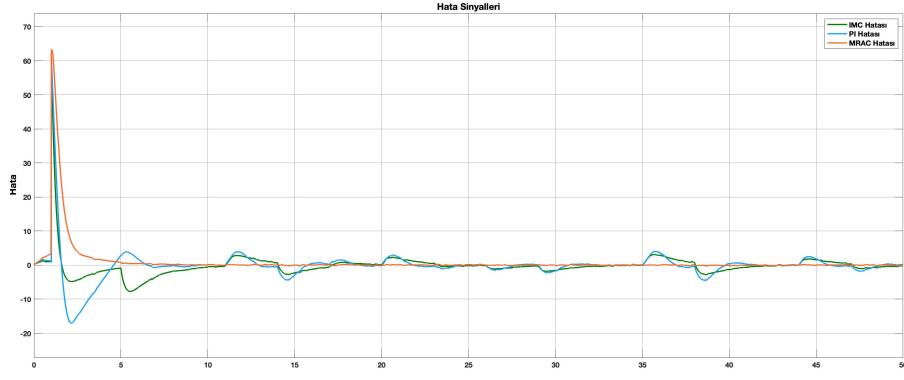
Bu giriş sayesinde denetleyicilerin ani değişimlere ve düşük frekanslı dış bozulmalara verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.

Şekil 3.25, 3.26 ve 3.27 bozucu sinyal aktifken elde edilen sistem çıkışı, hata ve kontrol sinyali grafiklerini göstermektedir.



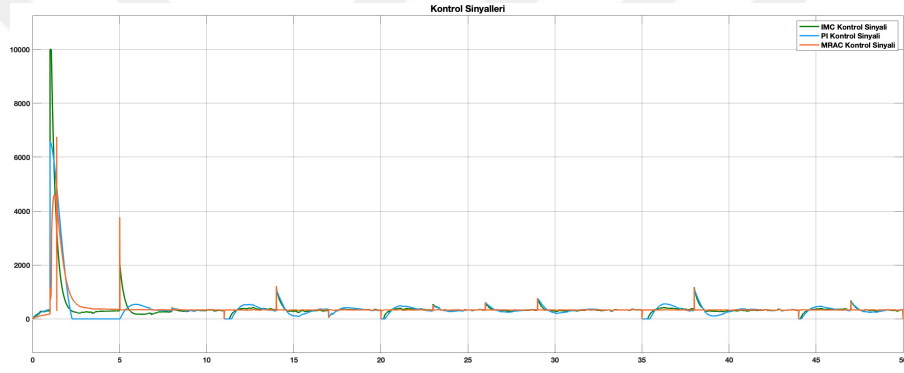
**Şekil 3.25** Bozucu giriş altında sistem çıkışı

Şekil 3.25'e göre bozucu sinyale karşı en yüksek stabiliteyi MRAC sağlamaktadır. PI kontrolcü ani tepkilerde hassasiyet göstermekte, IMC ise bozucu etkilere karşı daha yavaş bir tepki vermektedir.

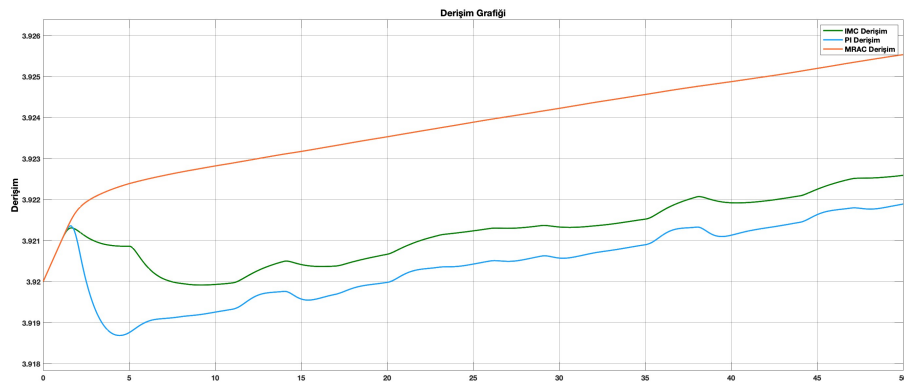


**Şekil 3.26** Bozucu giriş altında hata sinyalleri karşılaştırması

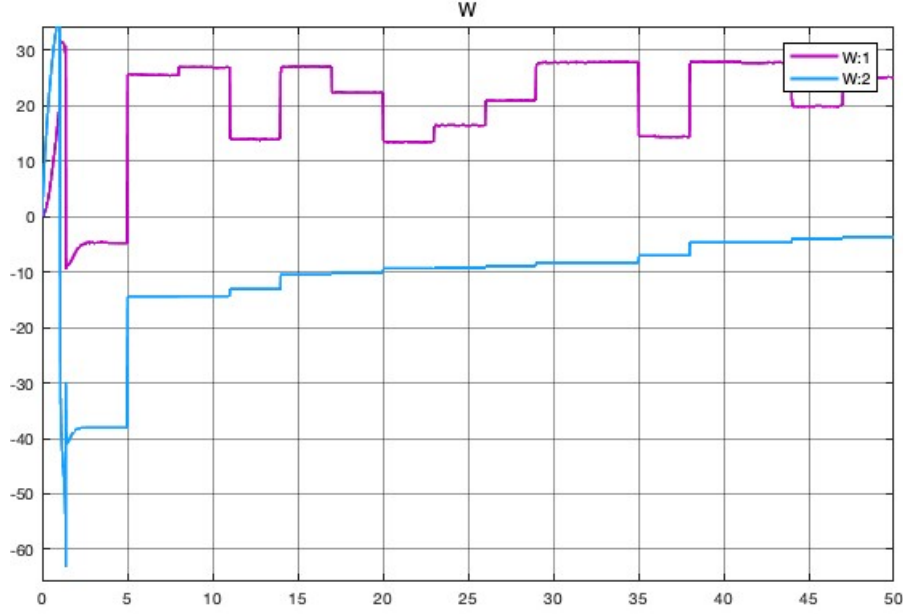
Hata sinyali açısından (Şekil 3.26), IMC ve MRAC'in PI'ye göre daha düşük genlikli ve kısa süreli salınımlar ürettiği gözlemlenmektedir.



**Şekil 3.27** Bozucu giriş altında kontrol sinyali karşılaştırması



**Şekil 3.28** Bozucu giriş altında derişim grafiği



Şekil 3.29 MRAC adaptasyon parametreleri

Şekil 3.27, MRAC kontrol sinyalinin düşük genlikli ama yoğun adaptasyonlu yapısını sergilerken; PI ve IMC sinyalleri ise genliği yüksek ama daha pürüzsüz bir karaktere sahiptir.

Tablo 3.5 Bozucu etkisi altında denetleyici performans karşılaştırması

Performans Ölçütü	PI	IMC	MRAC
Yükselme Süresi ( $t_r$ )	0.044 s	0.040 s	1.00 s
Aşım Oranı (%OS)	28.47 %	12.89 %	0.45 %
Yerleşme Süresi ( $t_s$ )	6.0466 s	5.2977 s	4.39 s
Kararlı Durum Hatası	0.00	0.00	0.00
IAE	54.77	50.24	7.28

Tablo 3.5'te yer alan veriler incelendiğinde, MRAC kontrolcüsünün bozucu sinyaller altında en düşük yerleşme süresine sahip olduğu görülmektedir. MRAC, PI kontrolcüsüne göre yerleşme süresini yaklaşık %27.4, IMC kontrolcüsüne göre ise %17 oranında azaltmıştır.

Aşım oranı açısından MRAC, PI'ye kıyasla yaklaşık %98.4 daha düşük aşım üretirken, IMC'ye göre bu fark %96.5 düzeyindedir. Ancak yükselme süresi bakımından MRAC en uzun yükselme süresine sahiptir.

Kararlı durum hatası tüm kontrolcülerde sıfır olduğundan bu metrikte eşit performans sergilemişlerdir. Toplam hata ölçütü olan IAE açısından ise MRAC

en düşük değeri elde ederek bozucu etkiler karşısında genel olarak en başarılı denetleyici olmuştur.

### **3.4.3 Performans Kriterlerinin Değerlendirilmesi**

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda, MRAC denetleyici hem bozucusuz hem de bozucu etkisi altındaki senaryolarda en yüksek performansı sergilemiştir. Özellikle yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşım oranı gibi geçici rejim ölçütlerinde üstün sonuçlar elde etmiş; Lyapunov tabanlı uyarılama yasası sayesinde hata sinyalini hızlı ve kararlı bir şekilde bastırabilmiştir.

Bozucu sinyal uygulandığında ise MRAC, kararlı durum hatası bakımından PI denetleyicisiyle benzer bir düzeyde kalmış; buna karşın IAE (Mutlak Hata İntegrali) açısından tüm denetleyiciler arasında en düşük değeri üreterek bozucu varlığında da referans takibi ve dengeleme başarımını korumuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, MRAC denetleyici; dinamik yapıya uyum sağlayabilen, düşük hata ile çalışan ve dışsal etkiler karşısında dengeyi koruyabilen yapısı ile CSTR sisteminin sıcaklık kontrolü için klasik PI ve IMC yöntemlerine kıyasla daha üstün, güvenilir ve uyarlanabilir bir kontrol yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

## **3.5 Tartışma ve Yorumlar**

Bu bölümde PI, IMC ve MRAC denetleyici yapılarının CSTR sistemine uygulanması sonucunda elde edilen bulgular detaylı biçimde tartışılmakta; her bir kontrol yapısının avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda, sistem dinamikleri ve bozucular karşısında hangi yapının daha uygun olduğu bilimsel ölçütlere dayanarak ortaya konmaktadır.

### **3.5.1 PI, IMC ve MRAC Denetleyicilerin Karşılaştırmalı Analizi**

Yapılan nicel analizler, PI, IMC ve MRAC denetleyicilerinin hem nominal koşullarda hem de dış bozucu etkileri altında gösterdiği performans ölçütlerini kapsamlı şekilde ortaya koymuştur.

PI kontrolcüsü, yapısal sadeliği ve hızlı geçici tepki kabiliyeti sayesinde temel kontrol ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. Ancak özellikle kararlı durum hatası ve dış bozucular karşısında yeterli doğruluk ve istikrarı sağlayamamaktadır. IMC yöntemi, sistem modeline dayalı yapısıyla kararlılık açısından güven

vermekte; fakat adaptasyon eksikliği ve referans takibinde sınırlı başarımı ile öne çıkamamaktadır. MRAC denetleyici ise, tüm senaryolarda en kısa yükselme süresi, düşük aşım oranı, hızlı hata bastırma ve adaptif yapısıyla en güçlü performansı sergilemiştir.

Özellikle Lyapunov tabanlı uyarılama yasası, MRAC'ın dışsal belirsizlikler karşısında yüksek dayanıklılık göstermesini sağlamış; referans modelin başarılı bir şekilde izlenmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle MRAC, sadece teorik olarak değil, uygulama bazlı başarı kriterleri açısından da klasik yöntemlerden belirgin biçimde ayrılmaktadır.

### 3.5.2 Her Denetleyicinin Avantajları ve Sınırlılıkları

PI Kontrolcü:

- Avantajları: Yapısal sadelik, kolay uygulanabilirlik, hızlı geçici rejim tepkisi.
- Sınırlılıkları: Dış bozuculara duyarlılık, adaptasyon kabiliyetinin olmaması.

IMC Kontrolcü:

- Avantajları: Kararlılık garantisi, gürültüye karşı tolerans, içsel model kullanımı.
- Sınırlılıkları: Referans modeli izleme kapasitesinin sınırlı oluşu, dış bozuculara karşı yavaş tepki, model doğruluğuna bağımlılık.

MRAC Kontrolcü:

- Avantajları: Uyarlanabilir yapısı sayesinde sistem parametrelerindeki belirsizlikleri ve dış bozucuları tolere edebilir. Lyapunov temelli analiz ile sınırlı giriş-çıkış kararlılığı (bounded-input bounded-output) garanti altına alınmıştır. Bu, girişler sınırlı olduğu sürece sistem çıkışlarının da sınırlı kalacağını ifade eder.
- Sınırlılıkları: Asimptotik kararlılık (ör.  $e(t) \rightarrow 0$ ) yalnızca kalıcı uyarım (persistent excitation) koşulu sağlanıyorsa mümkündür. Bunun dışında, başlangıçta yüksek genlikli kontrol sinyali üretme riski ve gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek işlem yükü gibi sınırlamalar mevcuttur.

### 3.5.3 CSTR Sistemi İçin En Uygun Kontrol Yaklaşımının Değerlendirilmesi

Yapılan sayısal analizler, grafiksel incelemeler ve hata ölçütlerine dayalı karşılaştırmalar sonucunda, CSTR sisteminde sıcaklık kontrolü için en uygun denetleyici yapının MRAC olduğu açık biçimde ortaya konmuştur. Özellikle sistem dinamiklerinin zamanla değiştiği veya dış bozucu sinyallerin etkili olduğu durumlarda, MRAC denetleyici; kısa yerleşme süresi, düşük kararlı durum hatası ve minimal kontrol enerjisi ile diğer yöntemlerden ayrılarak en güvenilir performansı sergilemiştir.

Elde edilen bulgular, hem literatürdeki çalışmalarla tutarlılık göstermekte hem de Lyapunov tabanlı adaptif denetimin teorik üstünlüklerini pratikte doğrulamaktadır. MRAC yapısı, sistem modelinde belirsizlik bulursa dahi referans modeli başarıyla takip etmiş ve sistemin kararlılığını garanti altına almıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında önerilen MRAC kontrol yapısı; klasik PI ve IMC denetleyicilere kıyasla CSTR sıcaklık kontrolü uygulaması için daha güçlü, daha güvenilir ve daha esnek bir kontrol çözümü sunmaktadır. Özellikle endüstriyel süreçlerde sıklıkla karşılaşılan yapısal belirsizlikler ve dış bozucuların etkin biçimde bastırılması açısından MRAC denetleyicisinin uygulanabilirliği önemli bir katkı potansiyeli taşımaktadır.

# 4

## SONUÇ

---

Bu tez çalışmasında, CSTR sisteminin sıcaklık kontrolü için üç farklı kontrol stratejisi — PI, IMC ve MRAC — tasarlanmış ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her bir denetleyici MATLAB/Simulink ortamında uygulanarak, yükselme süresi, aşım oranı, yerleşme süresi, kararlı durum hatası ve IAE gibi zaman alanı performans kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca bozucu sinyal etkisi altındaki sistem davranışı da analiz edilerek denetleyicilerin dışsal değişkenlere karşı dayanıklılığı test edilmiştir.

Elde edilen bulgular, klasik PI kontrolcünün temel geçici rejim gereksinimlerini karşılayabildiğini ancak dış bozuculara karşı zayıf kaldığını göstermektedir [44, 55]. Bu durum, literatürde de sıkça vurgulanan bir dezavantaj olarak öne çıkmakta ve doğrusal olmayan sistemlerde PI denetleyicilerin sınırlı başarısını ortaya koymaktadır [56]. IMC denetleyici ise daha düşük hata birikimi ve daha dengeli kontrol sinyali üreterek kararlılık açısından avantaj sağlamaktadır [41, 46]. Özellikle sistem modelinin doğru bilindiği durumlarda IMC yapısının kararlı rejimdeki performansı tatmin edici seviyededir. Bununla birlikte, Lyapunov temelli uyarılama yasasına sahip olan MRAC denetleyici, hem geçici hem de kararlı rejim performansında en başarılı sonuçları sunmuştur. MRAC yapısı, yalnızca bozucular karşısında değil; aynı zamanda parametre değişkenliği ve model belirsizlikleri altında da üstün performans sergileyerek dinamik süreç kontrolüne katkı sağlamaktadır [51, 52, 57].

Bu bulgular ışığında, MRAC kontrol yapısının doğrusal olmayan, değişken dinamiklere sahip proseslerde tercih edilmesi önerilmektedir. Bununla birlikte, uygulamada karşılaşılan bazı zorluklar, bu yöntemin dikkatli şekilde tasarlanmasını gerektirir. Özellikle kontrol sinyalindeki yüksek genlikli başlangıç çıkışları, aktüatör sınırlarını aşma riski taşımakta ve donanımsal kısıtlar açısından önem arz etmektedir. Bu bağlamda MRAC'in yalnızca yazılımsal değil, aynı zamanda donanımsal uyum bakımından da değerlendirilmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır [58].

Ayrıca bu tez kapsamında değerlendirilen her üç kontrol yapısının da, belirli parametre iyileştirmeleriyle daha yüksek performans sergilemesi mümkündür. Örneğin PI denetleyicide, kazançların (özellikle  $K_p$  ve  $K_i$ ) daha hassas ayarlanması veya zaman tanım alanı yerine frekans alanı tabanlı tasarım yapılmasıyla aşım ve yerleşme süresi gibi ölçütlerde önemli iyileştirmeler sağlanabilir [37]. IMC kontrol yapısında ise hem referans modelin ikinci dereceden tanımlanması hem de filtre parametresi  $\lambda$ 'nın bozucu spektrumuna göre adaptif biçimde değiştirilmesi, özellikle bozucu bastırma ve kararlılık açısından performansı artırabilir [59]. Benzer şekilde MRAC yapısında da, adaptasyon kazancı  $\gamma$ 'nın farklı değerlerde test edilmesi veya referans modelin  $\omega_n$  ve  $\zeta$  parametreleriyle sistem gereksinimlerine göre hassas ayarlanması, uyarlamalı yapının daha kararlı ve hızlı cevap üretmesini sağlayabilir. Bu tür parametrik iyileştirme çalışmaları, her denetleyici yapısının potansiyel kapasitesini ortaya koymak açısından önem arz etmektedir.

İleride gerçekleştirilecek olan gerçek zamanlı donanım uygulamaları ise bu çalışmanın akademik bulgularını pratik mühendislik koşullarıyla birleştirme açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle sıcaklık kontrolünün hassas olduğu kimyasal proseslerde, MRAC yapısının fiziksel sınırlara sahip aktüatörlerle (örn. ısıtıcılar, soğutma valfleri) birlikte denenmesi; hem kontrol sinyali doyum davranışını test etme hem de gerçek sistem gürültülerine karşı dayanıklılığı gözlemlene fırsatı sunacaktır [60, 61]. Ayrıca bu tür deneysel uygulamalar, sensör gecikmeleri, ölçüm hataları ve sıcaklık atalet etkilerinin kontrol performansına yansımalarını analiz ederek, teorik modellerin daha güvenilir hale getirilmesini sağlar. Bu bağlamda, geliştirilen kontrol yapılarının endüstriyel ortamlarda uygulanabilirliğini göstermek ve akademik çalışmayı sahaya taşımak açısından deneysel doğrulama süreci büyük bir katkı sağlayacaktır.

Gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- MRAC yapısının farklı uyarlama yasaları (örneğin  $\sigma$ -modification veya e-modification) ile yeniden yapılandırılması, kontrol sinyalinin sınırlanmasına ve daha kararlı davranış elde edilmesine olanak sağlayabilir [62, 63].
- PI ve IMC kontrolcülerin performansları, referans model tasarımı ve filtre ayarlarının optimizasyonu yoluyla artırılabilir. Özellikle IMC'de filtre parametresi  $\lambda$ 'nın farklı bozucu frekanslarına göre adaptif şekilde güncellenmesi daha etkin sonuçlar doğurabilir [64].
- Donanım tabanlı bir gerçek zamanlı deneysel düzeneğin oluşturulması ve bu kontrolcülerin fiziksel sistem üzerinde denenmesi, uygulama açısından önemli

bir adım olacaktır. Donanım tabanlı denemeler yapılırken CSTR modellemesinin ve sınırlarının daha etkin belirlenmesi gerekmektedir.

- Ek olarak, kontrol performansının daha esnek ve öğrenilebilir hale gelmesi için MRAC yapısının yapay sinir ağı veya pekiştirmeli öğrenme gibi yapay zekâ tabanlı yöntemlerle entegre edilmesi güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır [65, 66].

Sonuç olarak bu tez çalışması, adaptif kontrol yöntemlerinin klasik kontrolcülerle karşılaştırıldığında daha esnek, uyarlanabilir ve kararlı sonuçlar sunduğunu ortaya koymuş ve CSTR gibi belirsizlik içeren proseslerde MRAC yaklaşımının uygulanabilirliğini başarıyla göstermiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler, ilerleyen çalışmalarda adaptif kontrolün daha geniş ölçekli proses sistemlerine entegrasyonu açısından da yol gösterici olacaktır.

- [1] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp F. J. Doyle, *Process Dynamics and Control*, 3rd. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall, 2003.
- [3] C. E. Garcia, D. M. Prett M. Morari, “Model predictive control: Theory and practice—A survey,” *Automatica*, c. 25, no. 3, ss. 335–348, 1989.
- [4] M. Shyamalagowri R. Rajeswari, “Modeling and Simulation of Non Linear Process Control Reactor - Continuous Stirred Tank Reactor,” *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, c. 6, no. 4, ss. 1813–1818, 2013, issn: 2231-1963.
- [5] A. Sharma R. Patel, “Design and Analysis of Controllers for Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR),” *International Journal of Chemical and Process Engineering*, c. 9, no. 3, ss. 55–60, 2022.
- [6] C. E. Michoski, J. A. Evans P. G. Schmitz, “Modeling Chemical Reactors I: Quiescent Reactors,” *arXiv preprint arXiv:1012.5682*, 2010.
- [7] P. Mohindru, “Review on PID, Fuzzy and Hybrid Fuzzy PID Controllers for Controlling Non-Linear Dynamic Behaviour of Chemical Plants,” *Artificial Intelligence Review*, c. 57, 2024. doi: 10.1007/s10462-024-10743-0.
- [8] J. Vojtesek P. Dostal, “Adaptive Control of Continuous-Stirred Tank Reactor in Two Stable Steady-States,” *IFAC Proceedings Volumes*, 2010.
- [9] M. H. Dastjerdi M. Farsi, “Simulation of nonlinear adaptive control of a continuous stirred tank reactor,” *Modares Mechanical Engineering*, c. 21, no. 2, ss. 183–192, 2021.
- [10] T. K. Ojiabo P. K. Igbokwe, “Proportional-Integral-Derivative Control (PID) Of A Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR),” *The International Journal of Engineering and Science*, c. 4, no. 10, ss. 66–73, 2015.
- [11] J. C. Basilio S. R. Matos, “Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification,” *IEEE Transactions on Education*, c. 45, no. 4, ss. 364–370, 2002. doi: 10.1109/TE.2002.804399.
- [12] T. Rubi A. A. Nachiappan, “Temperature Control of CSTR using PID Controller,” *International Journal of Engineering and Computer Science*, c. 4, no. 5, ss. 11 989–11 993, 2015.
- [13] D. Stavrov, M. M. Serbezov P. G. Simeonov, “Quadratic Model-Based Dynamically Updated PID Control of CSTR System with Varying Parameters,” *Algorithms*, c. 14, no. 5, s. 127, 2021.

- [14] N. Duong, N. V. Nguyen T. N. Pham, "Control of Induction Motor using IMC Approach," *2007 International Conference on Power Electronics*, 2007. doi: 10.1109/ICPE.2007.4692410.
- [15] L. Harnefors H.-P. Nee, "Model-Based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 34, no. 1, ss. 133–141, 1998.
- [16] R. Kommineni, "IMC Based PID Controller Design for a Jacketed CSTR," *UACEE International Journal of Advances in Electronics Engineering*, c. 2, no. 2, ss. 48–52, 2012, issn: 2278-215X.
- [17] M. A. Siddiqui, M. N. Anwar S. H. Laskar, "Control of Nonlinear Jacketed Continuous Stirred Tank Reactor using Different Control Structures," *Journal of Process Control*, c. 108, ss. 112–124, 2021. doi: 10.1016/j.jprocont.2021.11.005.
- [18] A. B. Singh S. Natarajan, "Model Reference Adaptive Control (MRAC) Implementation for an Industrial Pilot Stirrer Process," *2017 International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 2017, ss. 310–314. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392081.
- [19] A. J. Abougarair N. A. A. Shashoa, "Model Reference Adaptive Control for Temperature Regulation of Continuous Stirred Tank Reactor," *IEEE Smart Cities Conference*, 2021.
- [20] H. Zhang L. Wang, "A Model Reference Adaptive Control Approach to Terrain Following Flight Control System," *Aerospace Science and Technology*, c. 104, s. 105 918, 2020.
- [21] S. Anbu N. Jaya, "Design of Adaptive Controller Based On Lyapunov Stability for a CSTR," *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*, c. 8, no. 1, 2014, issn: 2517-9438.
- [22] D. Mukherjee, G. L. Raja, P. Kundu A. Ghosh, "Design of Optimal Fractional Order Lyapunov Based Model Reference Adaptive Control Scheme for CSTR," *IFAC PapersOnLine*, c. 55, no. 1, ss. 436–441, 2022. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.072.
- [23] W. Ghozlane J. Knani, "Model Reference Adaptive Control Design for Nonlinear Plants," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, c. 10, no. 3, ss. 116–124, 2019.
- [24] P. C. Eze, A. E. Jonathan, E. A. Okoronkwo M. P. Akin, "Improving the Transient Response Performance of CSTR Using MRAC," *IRE Journals*, c. 3, no. 1, ss. 190–195, 2019.
- [25] S. Anbu N. Jaya, "Design of Model Reference Adaptive control and Nonlinear PI Controller for Continuous Stirred Tank Reactor," *International Journal of Computer Applications*, c. 153, no. 9, ss. 13–18, 2016.
- [26] P. Kumar S. Patel, "A Review on Fuzzy Logic and Hybrid Fuzzy-PID Controllers for Chemical Process Control," *International Journal of Automation and Control*, c. 17, no. 1, ss. 23–34, 2023.
- [27] R. Upadhyay R. Singla, "Analysis of CSTR Temperature Control with Adaptive and PID Controller: A Comparative Study," *International Journal of Engineering and Technology*, c. 2, no. 1, ss. 164–168, 2010.

- [28] D. Li, D. Wang Y. Gao, “Adaptive Neural Control and Modeling for Continuous Stirred Tank Reactor with Delays and Full State Constraints,” *Complexity*, 2021.
- [29] E. B. Nauman, *Chemical Reactor Design, Optimization, and Scaleup*. McGraw-Hill, 2002.
- [30] R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting J. A. Shaeiwitz, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 4. bs. Prentice Hall, 2012.
- [31] O. P. Verma, S. Kumar G. Manik, “Analysis of Hybrid Temperature Control for Nonlinear Continuous Stirred Tank Reactor,” içinde *Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2014)*, seri Advances in Intelligent Systems and Computing, K. N. Das ve diğ., ed., c. 336, Springer India, 2015, ss. 103–112. doi: 10.1007/978-81-322-2220-0\_9.
- [32] M. Kumavat S. Thale, “Analysis of CSTR Temperature Control with PID, MPC and Hybrid MPC-PID Controller,” *ITM Web of Conferences*, c. 44, 2022, s. 01 001.
- [33] B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design and Simulation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- [34] W. L. Luyben, *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [35] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp F. J. D. III, *Process Dynamics and Control*, 3rd. New York: Wiley, 2010.
- [36] P. Saini, S. K. Gaba, N. Rajput A. Aggarwal, “Design and Analysis of Controllers for Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR),” *2016 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, IEEE, 2016, ss. 2778–2784.
- [37] J. Basilio S. Matos, “Design of PI and PID controllers with transient performance specification,” *IEEE Transactions on Education*, c. 45, no. 4, ss. 364–371, 2002.
- [38] J. Ziegler N. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers,” *Transactions of the ASME*, c. 64, no. 11, ss. 759–768, 1942.
- [39] G. Cohen G. Coon, “Theoretical considerations of retarded control,” *Transactions of the ASME*, c. 75, no. 1, ss. 827–834, 1953.
- [40] N. e. a. Ajlouni, “Enhancing PID control robustness in CSTRs: a hybrid approach to tuning under external disturbances with GA, PSO, and machine learning,” *Neural Computing and Applications*, 2025.
- [41] L. Harnefors H. Nee, “Model-based current control of AC machines using the internal model control method,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 34, no. 1, 1998.
- [42] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5. bs. Prentice Hall, 2010, isbn: 978-0136156734.
- [43] Karl J. Åström Richard M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008, isbn: 978-0691135762.

- [44] e. a. Maheshwari, "Design and analysis of PID controller for CSTR process," *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2017.
- [45] M. e. a. Aboelela, "Design and implementation of PID controller using particle swarm algorithm for a CSTR system," *International Journal of Control Theory and Applications*, 2018.
- [46] C. E. Garcia, D. M. Prett M. Morari, "Internal model control: A unifying review and some new results," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, c. 21, no. 2, ss. 308–323, 1982.
- [47] M. Morari E. Zafiriou, *Robust Process Control*. Prentice Hall, 1989.
- [48] S. J. Qin T. A. Badgwell, "Survey on model predictive control," *Control Engineering Practice*, c. 11, no. 7, ss. 733–764, 2003.
- [49] I. Karafyllis M. Krstic, "A tutorial on model-based control and estimation design for chemical processes: IMC and beyond," *Annual Reviews in Control*, c. 47, ss. 10–25, 2019.
- [50] J.-J. Slotine W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, 1991.
- [51] P. A. Ioannou J. Sun, *Robust Adaptive Control*. Dover Publications, 2012.
- [52] E. Lavretsky K. Wise, *Robust and Adaptive Control: With Aerospace Applications*. Springer, 2013.
- [53] M. M. Ioan D. Landau Rogelio Lozano A. Karimi, *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. Springer, 2011.
- [54] A. Online, *CSTR Modeling and Control Case Study*, <https://apmonitor.com/che436/index.php/Main/CaseStudyCSTR>, 2014.
- [55] P. Stavrov M. Kolev, "Self-tuning PI control for systems with parameter uncertainty," *Journal of Process Control*, c. 103, ss. 1–10, 2021.
- [56] B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design and Simulation*. Prentice Hall, 2003.
- [57] J. Vojtěšek, P. Dostál M. Fojtůš, "Model reference adaptive control of a continuous stirred tank reactor," *15th International Conference on Process Control*, IEEE, 2010, ss. 1–6.
- [58] S. Mukherjee B. Tripathi, "Adaptive control of nonlinear systems under actuator constraints: A survey," *ISA Transactions*, c. 110, ss. 230–249, 2021.
- [59] G. Kommineni B. R. Reddy, "Design and implementation of IMC-PID controller for a chemical process," *International Journal of Engineering Research and Applications*, c. 2, no. 3, ss. 1450–1454, 2012.
- [60] M. Krstic, I. Kanellakopoulos P. Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design," Wiley, 1995.
- [61] M. Mashinchi M. Shahriari, "Hardware-in-the-loop simulation for testing of control systems in chemical reactors," *2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, IEEE, 2015, ss. 367–372.
- [62] K. S. Narendra A. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.

- [63] E. Lavretsky K. Wise, *Projection Operator Techniques in Adaptive Control*. Springer, 2011.
- [64] N. H. Duong M. Lee, “IMC-PID control design for chemical processes: A tutorial review,” *Journal of Process Control*, c. 17, no. 6, ss. 493–511, 2007.
- [65] Y. Jiang, Y. Shi, D. Xu, Z. Li S. Qiu, “Deep reinforcement learning for control: A survey,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, c. 32, no. 7, ss. 3049–3069, 2021.
- [66] H. Zhang B. Jiang, “Adaptive neural control for nonlinear systems with unknown dead zone and actuator saturation,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, c. 33, no. 3, ss. 1100–1112, 2022.



## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### **Konferans Bildirisi**

K. Muradoğlu İ. Alışkan, "MRAC Yöntemi ile CSTR Sisteminde Sıcaklık Kontrolü," *Grad Symposium 2025 - Mühendislikte Sürdürülebilir Çözümler*, 2025.

