

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖLÜM OYUNU OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI KULLANARAK İKİLİ TANK
SIVI SEVİYE SİSTEMİ İÇİN FPTİD+FF DENETLEYİCİSİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Müh. Ali Kıvanç ŞAHİN

**OCAK 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖLÜM OYUNU OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI KULLANARAK İKİLİ TANK
SIVI SEVİYE SİSTEMİ İÇİN FPTİD+FF DENETLEYİCİSİ TASARIMI**

Elektrik Elektronik Müh. Ali Kıvanç ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 01 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 01 / 2022

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır. Bu tezde ikili tank sistemindeki sıvı akışını kontrol edebilmek amacıyla ölüm oyunu optimizasyonu tabanlı kesir dereceli oransal-eğimli-integral-türevsel denetleyici tasarlanmış olup hem simülasyon olarak hem de gerçek zamanlı olarak sonuçları incelenmiştir.

Tez çalışma süresi boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli tez danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Erdinç ŞAHİN'e ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince maddi ve manevi beni her konuda destekleyen ve hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen anneme, babama ve abime teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda faydalı olması temennisiyle.

Ali Kıvanç ŞAHİN

Trabzon 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ölüm Oyunu Optimizasyonu Algoritması Kullanarak İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi için FPTID+FF Denetleyicisi Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/01/2022

Ali Kıvanç ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	1
1.3. Tezin Amacı	7
1.4. Tezin Özgünlüğü	7
1.5. Tezin İçeriği	8
1.6. Optimizasyon Algoritması	8
1.6.1. Ölüm Oyunu Optimizasyonu Algoritması	8
1.7. Tez Çalışmasında Kullanılan Denetleyiciler	12
1.7.1. İleri Beslemeli Oransal-İntegral Denetleyici	12
1.7.2. İleri Beslemeli Kesir Dereceli Oransal-Eğimli-İntegral-Türevsel Denetleyici	13
1.8. İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi	16
1.8.1. Tank 1 Düzeneginin Matematiksel Modeli	16
1.8.2. Tank 2 Düzeneginin Matematiksel Modeli	19
1.8.3. BRO Algoritmasının İkili Tank Sistemine Uygulanması	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	24
2.1. Giriş	24
2.2. Tank 1 Düzeneginin Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi	24
2.2.1. Tank 1 Düzeneginin Yakınsama Eğrisi Analizi	25
2.2.2. Tank 1 Düzeneginin Birim Basamak Tepkisi Analizi	26

2.2.3.	Tank 1 Düzeneği İçin Gürbüzlük Analizi	28
2.3.	Tank 2 Düzeneğinin Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi	30
2.3.1.	Tank 2 Düzeneğinin Yakınsama Eğrisi Analizi	32
2.3.2.	Tank 2 Düzeneğinin Birim Basamak Tepkisi Analizi	33
2.3.3.	Tank 2 Düzeneği İçin Gürbüzlük Analizi	35
2.4.	DeneySEL Sonuçlar	37
2.4.1.	Tank 1 Düzeneği İçin Gerçek Zamanlı Sonuçlar	37
2.4.2.	Tank 2 Düzeneği İçin Gerçek Zamanlı Sonuçlar	41
3.	SONUÇLAR	46
4.	ÖNERİLER	47
5.	KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÖLÜM OYUNU OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI KULLANARAK İKİLİ TANK SIVI SEVİYE SİSTEMİ İÇİN FPTID+FF DENETLEYİCİSİ TASARIMI

Ali Kıvanç ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR
2022, 50 Sayfa

Süreç endüstrisinde kullanılan tanklarda tedarik edilecek sıvının tanklarda depolanması ve ihtiyaç durumuna göre diğer tanklara aktarılması gerekmektedir. Dolayısıyla sıvının belirli bir aralıkta veya yükseklikte tutulması son derece önemlidir. Bu tezde ise kâğıt yapımında, petro-kimya ve su arıtma tesisleri gibi süreç endüstrisi alanında sıklıkla kullanılan ikili tank sisteminin sıvı seviyesini sabit tutabilmek amacıyla ileri beslemeli oransal-integral (PI+FF) ve ileri beslemeli kesir dereceli oransal-eğimli-integral-türevsel (FPTID+FF) denetleyicileri önerilmiştir. PI+FF ve FPTID+FF parametrelerinin ayarlanmasında yeni bir meta-sezgisel algoritması olan ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritmasından yararlanılmıştır. Önerilen denetleyicilerin Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmış olup yakınsama profili, geçici tepki ve son olarak da sistem parametre değişikliğine karşı gürbüzlük analizi incelenmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlara göre FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin üstünlüğü gerçek zamanlı olarak ikili tank sisteminde test edilerek iyi bir performans ve tepki verdiği doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ölüm oyunu optimizasyonu algoritması, İkili tank sistemi, İleri beslemeli kesir dereceli oransal-eğimli-integral-türevsel denetleyicisi, İleri beslemeli oransal-integral denetleyicisi

MSc. Thesis

SUMMARY

FPTID+FF CONTROLLER DESIGN FOR COUPLED TANK LIQUID LEVEL SYSTEM USING BATTLE ROYALE OPTIMIZATION ALGORITHM

Ali Kıvanç ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Oğuzhan ÇAKIR
2022, 50 Pages

The liquid to be supplied in the tanks used in the process industry should be stored in the tanks and transferred to other tanks according to the need. Therefore, it is extremely important to keep the liquid at a certain range or height. In this thesis, feedforward proportional-integral (PI+FF) and feedforward fractional proportional-tilt-integral-derivative (FPTID+FF) are proposed to keep the liquid level of the coupled tank system, which is frequently used in process industries such as papermaking, petro-chemistry and water treatment plants. A new meta-heuristic algorithm, battle royale optimization (BRO), is used to tune the PI+FF and FPTID+FF parameters. The proposed controllers are simulated in Matlab/Simulink environment and convergence profile, transient response and finally robustness analysis against system parameter change are examined. According to the simulation results obtained, it has been observed that the FPTID+FF controller gives better results than the PI+FF controller. In addition, the superiority of the proposed BRO-based FPTID+FF controller has been tested in real-time in coupled tank system, validating good performance and response.

Key Words: Battle royale optimization algorithm, Coupled tank system, Feedforward fractional proportional-tilt-integral-derivative controller, Feedforward proportional-integral controller.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Ölüm oyunu optimizasyonu algoritmasının akış diyagramı	11
Şekil 2. PI denetleyicisinin şematik diyagramı	12
Şekil 3. PI+FF denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı çevrim şematik diyagramı	13
Şekil 4. FPTID denetleyicisinin şematik diyagramı	14
Şekil 5. FPTID+FF denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı çevrim şematik diyagramı	15
Şekil 6. İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi	16
Şekil 7. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi	22
Şekil 8. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi	23
Şekil 9. PI+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi	24
Şekil 10. FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi	25
Şekil 11. Tank 1 düzeneği için önerilen denetleyicilerin yakınsama eğrisi analizleri	25
Şekil 12. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 1 düzeneğinin birim basamak tepkisi	26
Şekil 13. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin kontrol sinyali	27
Şekil 14. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin hata sinyali	28
Şekil 15. PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için birim basamak tepkisi	29
Şekil 16. FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için birim basamak tepkisi	30
Şekil 17. PI+FF denetleyicisine sahip tank 2 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi	31
Şekil 18. FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 2 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi	31

Şekil 19.	Tank 2 düzeneği için önerilen denetleyicilerin yakınsama eğrisi analizleri	32
Şekil 20.	PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 2 düzeneğinin birim basamak tepkisi	33
Şekil 21.	PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin kontrol sinyali	34
Şekil 22.	PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin hata sinyali	34
Şekil 23.	PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için birim basamak tepkisi	35
Şekil 24.	FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için birim basamak tepkisi	36
Şekil 25.	İkili tank sisteminin deneysel kurulumu	37
Şekil 26.	Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları	38
Şekil 27.	Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri	39
Şekil 28.	Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları	39
Şekil 29.	Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları	40
Şekil 30.	Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri	40
Şekil 31.	Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları	41
Şekil 32.	Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları	42
Şekil 33.	Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri	42
Şekil 34.	Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları	43
Şekil 35.	Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları	43
Şekil 36.	Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri	44
Şekil 37.	Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları	44

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İkili tank sisteminin parametre değerleri	21
Tablo 2. BRO algoritmasının parametre değerleri	22
Tablo 3. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 1 düzeneği sıvı seviyesinin geçici karakteristik değerleri	27
Tablo 4. BRO/PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları	29
Tablo 5. BRO/FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları	30
Tablo 6. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 2 düzeneğinin geçici karakteristik değerleri	33
Tablo 7. BRO/PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları	36
Tablo 8. BRO/FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları	36
Tablo 9. Tank 1 düzeneği için önerilen denetleyicilerin gerçek zamanlı olarak performans metrislerinin analiz değerleri	41
Tablo 10. Tank 2 düzeneği için önerilen denetleyicilerin gerçek zamanlı olarak performans metrislerinin analiz değerleri	45

SEMBOLLER DİZİNİ

AFL	: Uyarlamalı bulanık mantık
AMP	: Uyarlamalı model öngörülü
ASSM+FF	: İleri beslemeli uyarlamalı ikinci dereceden kayan kipli
BRO	: Ölüm oyunu optimizasyonu
CFSM	: Tırlama etkisi içermeyen kayan kipli
FL	: Bulanık mantık
FOPID	: Kesir dereceli oransal-integral-türevsel
FO-PIDSM	: Kesir dereceli hesabına dayalı oransal-integral-türevsel kayan kipli
FOSM	: Kesir dereceli kayan kipli
FPID	: Bulanık-oransal-integral-türevsel
FPID-IMC	: Kendi kendine ayarlamalı bulanık-oransal-integral-türevsel
FPTID+FF	: İleri beslemeli kesir dereceli oransal-eğimli-integral-türevsel
GA	: Genetik algoritması
IAE	: Hatanın mutlak değerinin integrali
ISE	: Hatanın karesinin integrali
ITAE	: Hatanın mutlak değerinin zaman ağırlıklı integrali
ITSE	: Hatanın karesinin zaman ağırlıklı integrali
LMI	: Doğrusal matris eşitsizliği
LQR	: Doğrusal kuadratik regülatör
MAE	: Hatanın mutlak değerinin ortalaması
MRA	: Model referans uyarlamalı
MOGA	: Çok amaçlı genetik algoritması
MSE	: Hatanın karesinin ortalaması
PI	: İntegral-oransal
PID	: İntegral-oransal-türevsel
PI+FF	: İleri beslemeli integral-oransal
PS	: Örüntü arama
PSO	: Parçacık sürüsü optimizasyonu
RLS	: Özyinelemeli en küçük kare

SM	: Kayan kipli
SM+FF	: İleri beslemeli kayan kipli
SOSM	: İkinci dereceden kayan kipli
UDE	: Belirsizlik ve bozucu tahmin edici
A_{o_1}	: Tank 1'in sıvı çıkış yolu kesit alanı
A_{o_2}	: Tank 2'nin sıvı çıkış yolu kesit alanı
A_{i_1}	: Tank 1 iç kesit alanı
A_{i_2}	: Tank 2 iç kesit alanı
D_{o_1}	: Tank 1'in sıvı çıkış yolunun çapı
D_{o_2}	: Tank 2'nin sıvı çıkış yolunun çapı
e	: Hata işareti
$F_{1_{\text{çıkış}}}$	: Tank 1'den çıkan sıvı hacimsel akış oranı
$F_{1_{\text{giriş}}}$	: Tank 1'e giren sıvı hacimsel akış oranı
$F_{2_{\text{çıkış}}}$	: Tank 2'den çıkan sıvı hacimsel akış oranı
$F_{2_{\text{giriş}}}$	: Tank 2'ye giren sıvı hacimsel akış oranı
g	: Yer çekimi sabiti
K_d	: Türevsel kazanç
K_{ff}	: İleri besleme kazancı
K_i	: İntegral kazancı
k_p	: Pompa sabiti
K_p	: Oransal kazanç
K_t	: Eğimli kazanç
lb_d	: Alt sınır değeri
L_1	: Tank 1 sıvı seviyesi
L_2	: Tank 2 sıvı seviyesi
M_p	: Maksimum aşım yüzdesi
n	: Maksimum iterasyon sayısı
N	: Yakınsama derecesi

r	: 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayı
$r(t)$	: Referans değeri
$SD(\overline{x_d})$	: Tüm arama ajanlarının standart sapması
t_p	: Tepe zamanı
t_r	: Yükselme zamanı
t_s	: Yerleşme zamanı
T_s	: Örnekleme zamanı
t_{sim}	: Simülasyon süresi
u	: Denetleyici işareti
ub_d	: Üst sınır değeri
V_{o_1}	: Tank 1'den çıkan sıvı akış hızı
V_p	: Pompaya uygulanan gerilim
$x_{en\ iyi,d}$	: Bulunan en iyi çözümün pozisyonu
$x_{hasar,d}$	: d boyutlu arama uzayında tanımlanan askerin pozisyonu
$x_i,hasar$	: Askerin popülasyon içerisindeki hasar seviyesi
$y(t)$	: Çıkış değeri
w_b	: Alt sınır frekans aralığı
w_h	: Üst sınır frekans aralığı
w_k^p	: k dizisinin kutupları
w_k^z	: k dizisinin sıfırları
$\lambda, \frac{1}{n}$	: İntegral operatöründeki katsayının derecesi
μ	: Türev operatöründeki katsayının derecesi
Δ	: İterasyon adımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son zamanlarda teknolojinin de gelişmesiyle birlikte endüstri, medikal, taşımacılık ve tarım gibi alanlarda kontrol sistemlerinin kullanımı artmıştır. Günümüzde kontrol sistemlerinin kullanımının artmasındaki temel amaç insan faktörüne duyulan ihtiyacı en aza indirmektedir. Ayrıca sistemin referans değeri ile çıkış değeri arasındaki fark olarak tanımlanan hata sinyalinin minimuma getirmekle birlikte sistemin dinamiğini iyileştirip ani referans değişikliklerine karşı sistemin etkilenmemesini sağlamaktır.

Kontrol sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı bir diğer alan ise tank sıvı seviye sistemleridir. Tank sistemlerinden biri olan ikili tank sistemi günümüzde kâğıt üretiminden petrokimya işlem sürecine kadar birçok endüstriyel uygulama alanlarında tercih edilmektedir. İkili tank sisteminin doğrusal olmamasından kaynaklanan kontrol zorluğu günümüzde birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bundan dolayı araştırmacılar ikili tank sıvı seviye sisteminin dinamik performansını iyileştirebilmek amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler önermişlerdir. Araştırmacılar tarafından ikili tank sistemi için önerilen denetleyiciler literatür araştırması kısmında detaylı olarak değinilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

[1]'de yazarlar ikili tank sistemi için ASSM+FF denetleyicisi tasarlamışlardır. Ayrıca ASSM+FF denetleyici parametrelerinin ayarlanması için PS algoritması kullanılmıştır. Önerilen denetleyicinin verimliliğini ve etkinliğini gösterebilmek için PI+FF denetleyicisiyle hem simülasyon hem de gerçek zamanlı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında önerilen ASSM+FF denetleyicisinin oldukça başarılı bir yörünge izleme performansı sağladığı ve ikili tank sıvı seviye sisteminde meydana gelen bozucu girişi bastırmada PI+FF denetleyicisine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

[2]'de yazarlar bu makalede ikili tank sıvı seviyesi sistemi için kendi kendine ayarlamalı regülatör (SRT) kontrol tekniği önermişlerdir. SRT tekniğinin etkinliğini ve

üstün performansını gösterebilmek için PI+FF ve SM denetleyicileriyle gerçek zamanlı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca tank 1 ve tank 2 düzenekleri için önerilen PI+FF, SM ve SRT denetleyicilerinin parametre değerlerinin ayarlanması için PS algoritmasından faydalanılmıştır. Aynı zamanda PI+FF, SM ve SRT denetleyicilerinin gerçek zamanlı olarak üstünlükleri karşılaştırılırken literatürde sıklıkla kullanılan hata metriklerinden biri olan hatanın karesinin ortalama değeri (MSE) kıstas olarak seçilmiştir. Hem tank 1 düzeneğinde hem de tank 2 düzeneğinde elde edilen sonuçlara göre önerilen SRT tekniğinin SM ve PI+FF denetleyicilerine göre MSE değerinin daha az olduğu ve ani referansa karşı daha iyi yörünge izleme performansı gösterdiği gözlemlenmiştir.

[3]'te yazarlar bu çalışmada endüstri alanında sıklıkla kullanılan ikili tank sıvı seviye sistemi için FOPID denetleyicisi tasarlamış olup PI+FF denetleyicisiyle gerçek zamanlı olarak karşılaştırmasını yapmışlardır. Gerçek zamanlı uygulamada FOPID denetleyicisinin üstünlüğünü gösterebilmek için literatürde sıklıkla kullanılan hata performanslı indekslerden biri olan hatanın ortalama değerinin karesi olarak adlandırılan MSE seçilmiştir. Hem tank 1 için hem tank 2 düzeneği için elde edilen sonuçlara göre FOPID denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre MSE değerinin daha az geldiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla önerilen FOPID denetleyicisinin ikili tank sıvı seviye sistemi için daha etkili olduğu görülmüştür.

[4]'te yazar ikili tank sistemi için tasarlanan PID denetleyicisinin parametre değerlerini belirlerken Ziegler-Nichols ve GA yöntemlerinden yararlanmıştır. Her iki yöntemle de PID denetleyicilerinin parametre değerlerini belirleyen Khalkhali gerçek zamanlı olarak ikili tank sıvı seviye sistemine uygulamıştır. Hem tank 1 düzeneğinde hem de tank 2 düzeneğinde GA algoritma tabanlı PID denetleyicinin Ziegler-Nichols yöntemine göre ayarlanan PID denetleyiciye göre daha az aşım miktarı ve yerleşme zamanına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca Ziegler-Nichols yöntemine göre ayarlanan PID denetleyicinin referans işaretinin negatif eğim oluşturduğu yerlerde kalıcı-durum hal hatası oluşturduğu gözlemlenmiştir.

[5]'te yazarlar ikili tank sıvı seviyesindeki sıvı akışını kontrol edebilmek amacıyla PI+FF denetleyicisi önermişlerdir. Önerilen PI+FF denetleyicisinin parametre değerlerini ayarlayabilmek için Ziegler-Nichols ve GA yöntemlerinden faydalanılmıştır. Hem tank 1 düzeneğinin hem de tank 2 düzeneğinin belirli çalışma koşullar altında doğrusallaştırıp Laplace domeninde transfer fonksiyonları çıkarılmıştır. Transfer fonksiyonları çıkarıldıktan sonra Ziegler-Nichols ve GA yöntemleri uygulanmış olup PI+FF

denetleyicisinin parametre değerleri bulunmuştur. Elde edilen parametre değerleri geręek zamanlı olarak ikili tank sıvı seviye sisteminde denenip sonuçları gözlemlenmiştir. Hem tank 1 hem de tank 2 düzeneğinde önerilen GA tabanlı PI+FF denetleyicisinin Ziegler Nichols tabanlı PI+FF denetleyicisine göre daha az yerleşme zamanına ve daha az yüzde aşımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca GA tabanlı PI+FF denetleyicisinin sistemde meydana gelen ani referans değişimlerine daha hızlı tepki verdiği sonucuna varmışlardır.

[6]'da yazarlar doğrusal olmayan bir kontrol sistemindeki dinamik performansı iyileştirebilmek maksadıyla SM+FF denetleyicisi tasarlamışlardır. Önerilen bu denetleyici şeması ikili tank sıvı seviye sisteminde farklı konfigürasyonlar üzerinde incelenmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen denetleyicinin iyi çalıştığı ve tanktaki sistem parametreleri değişikliği ile harici bozulmalara karşı üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca SM+FF denetleyicinin geręek zamanlı uygulamada da üstünlüğünü göstermek için klasik PI denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Yazarlar önerilen denetleyicinin klasik PI denetleyicisine göre kontrol performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

[7]'de yazar bu tezde ikili tank sisteminin FOSM denetleyicisi önermiş olup ikili tank düzeneği üzerinde geręek zamanlı olarak farklı referans girişlerine karşı performansını gözlemlemiştir. Ayrıca FOSM denetleyicisindeki kesirli derecenin etkisini gösterebilmek için SM denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Geręek zamanlı uygulamadan elde edilen sonuçlara göre FOSM denetleyicisinin SM denetleyicisine göre sistem için tanımlanan referans girişine karşı daha iyi bir takip sağladığı, ani referans değişimlerine karşı daha duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca FOSM ve SM denetleyicileriyle birlikte FOPI ve PI denetleyicileri içinde karşılaştırılma yapılmıştır. FOSM denetleyicisinin diğer denetleyicilere göre yükselme zamanı, aşım yüzdesi ve hata eliminasyonu açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

[8]'de yazarlar süreç kontrolünde kullanılan ikili tank sisteminin sıvı seviye değişimini kontrol edebilmek amacıyla AFL denetleyicisi önermişlerdir. Bulanık mantık tanımlayıcısından yararlanılarak geręek sistemin çıkışları ve kontrol girişleri elde edilmiştir. Ayrıca bulanık mantık tanımlayıcının parametrelerinin ayarlanmasında RLS algoritmasından yararlanılmıştır. AFL denetleyicisinin üstün bir performans koyduğu gösterebilmek adına iyi ayarlanmış PI denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki tank düzeneğinden de elde edilen sonuçlara göre AFL denetleyicisinin PI denetleyicisine göre tanımlanan referans yörüngesini daha iyi takip ettiği görülmüştür. Ayrıca AFL

denetleyicisinin PI denetleyicisine göre daha az aşım ve yerleşme zamanına sahip olduğu görülmüştür.

[9]'da yazarlar bu çalışmada ikili tank sıvı seviye sistemi için geri adımlamalı denetleyici ile basit ve uygulanabilir yapısıyla endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen klasik PI denetleyicisinin gerçek zamanlı olarak performans karşılaştırmasını yapmışlardır. Geri adımlamalı denetleyicisi tasarımı yapılırken Lyapunov kararlılık kriterinden yararlanılmıştır. Uygulamadan elde edilen sonuçlara göre geri adımlamalı denetleyicinin PI denetleyicisine göre daha iyi bir referans takibi sağladığı ve ani değişimlere karşı daha hızlı tepki ortaya koyabildiğini gözlemlemişlerdir.

[10]'da yazarlar dikey doğrusal olmayan ikili tank sistemine ait tank 2 düzeneği için LMI tabanlı H_2 denetleyicisi önermişlerdir. LMI tabanlı H_2 denetleyicisi sistemin bozucu etkilerini giderebilmek ve sensör gürültüsü gibi dışsal girdilere karşı sağlam bir performans ortaya koyabildiğini kanıtlayabilmesi amacıyla PI+FF denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Gerçek zamanlı olarak yapılan bu karşılaştırmada hata tabanlı metriklerden biri olan MAE performans metriğinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre LMI tabanlı H_2 denetleyicisinin MAE performans metriğinin daha düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Bu da LMI tabanlı H_2 denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre daha iyi bir performans sunduğunu göstermektedir.

[11]'de yazarlar ikili tank sistemine ait olan ikinci tanktaki sıvı akışını kontrol edebilmek amacıyla PI, FL ve MRA denetleyicileri önermişlerdir. Önerilen denetleyiciler karşılaştırıldığında MRA denetleyicisinin diğer denetleyicilere göre sıvı seviyesini ayar noktasına getirmek için daha düzgün kontrol işareti ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca MRA denetleyicisinin diğer denetleyicilere göre en iyi yerleşme zamanına ve en az ISE değerine sahip olduğu görülmüştür.

[12]'de yazarlar ikili tank sistemindeki sıvı seviyesinin kontrolü için UDE tabanlı bir denetleyici önermişlerdir. Tasarlanan UDE tabanlı denetleyiciye sahip ikili tank sistemi sıvı seviye takibi konusunda üstün bir performans ortaya koymakla birlikte bozulma ve sağlamlık analizi açısından da iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca UDE tabanlı denetleyiciyle PID denetleyicisinin karşılaştırılması yapıp UDE tabanlı denetleyicinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

[13]'te yazarlar ikili tank sistemindeki sıvı seviyesinin kontrol takibini sağlamak için yeni bir PI denetleyicisinin tasarımını önermişlerdir. Önerilen H_∞ tabanlı PI denetleyicinin tasarımı yapmak için LMI tabanlı kutup yerleştirme bölgesinden yararlanılmıştır. Ayrıca

önerilen tasarımının üstün bir performans sergilediğini göstermek için geleneksel PI denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Gerçek zamanlı olarak her iki tank düzeneği içinde yapılan karşılaştırmada maksimum aşım, yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve kalıcı-durum hal hatası gibi sistemin geçici karakteristiklerinin yanı sıra IAE ve ISE hata performans indeksleri açısından da H_∞ tabanlı PI denetleyicisinin üstün bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

[14]'te yazarlar ikili tank sistemindeki sıvı akışını kontrol etmek amacıyla CFSM denetleyicisini önermişlerdir ve gerçek zamanlı olarak ikili tank sisteminde test etmişlerdir. Önerilen denetleyicinin sağlamlığını göstermek için tank 1 ve tank 2 düzeneğine sırasıyla farklı referans girişleriyle uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan denetleyicinin bozulan ve farklı referans girişlerine karşı daha iyi bir konum izleme performansı gösterdiği görülmüştür.

[15]'te yazarlar ikili tank sistemine ait tank 1 düzeneği için FPID-IM denetleyicisinin tasarımını uygulamışlardır. Önerilen FPID-IM denetleyicisinin tasarımı simülasyon yardımıyla gerçekleştirilmiş olup Matlab yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca FPID-IM denetleyicisiyle PID denetleyicisinin simülasyonda karşılaştırılması yapılmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında FPID-IM denetleyicisinin geleneksel PID denetleyicisine göre maksimum aşım ve yükselme zamanı bakımından üstün geldiği gözlemlenmiştir.

[16]'da yazarlar ikili tank sistemindeki sıvı seviyenin hassas bir şekilde takibini sağlamak için uyarlamalı geri adımlama denetleyicisini önermişlerdir. Uyarlamalı geri adımlama denetleyicisinin tasarımı yapılırken Lyapunov kararlılık kriteri kullanılmıştır. Ayrıca uyarlamalı geri adımlama denetleyicinin etkinliğini göstermek için PI denetleyicisiyle deneysel olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre uyarlamalı geri adımlama denetleyicisinin PI denetleyicisine göre etkin ve üstün bir performansa sahip olduğu görülmüştür.

[17]'de yazarlar ikili konik şeklindeki tank sisteminin sıvı seviyesini kontrol edebilmek için AMP denetleyicisini önermişlerdir. Önerilen AMP denetleyicisine sahip ikili konik şeklindeki tank sisteminin simülasyonu Matlab/Simulink ortamında uygulanmıştır. Ayrıca AMP denetleyicisi FOPID ve PID denetleyicileriyle karşılaştırılmıştır. Üstün bir performans gösterdiğini kanıtlamak için tepki süresi ve maksimum aşım değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre AMP denetleyicisinin FOPID ve PID denetleyicilerine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

[18]'de yazarlar ikili tank sistemindeki ikinci tankın sıvı seviyesini kontrol etmek için SOSM denetleyicisini önermişlerdir. Önerilen SOSM denetleyicisinin tasarımı için Matlab programından faydalanılmıştır. Referans girişleri olarak adım ve sinüzoidal girişler verilmiştir. Simülasyon sonuçlara göre üstün burulma kayan kipli denetleyicisinin kararlı durum yakınsama süresinin burulma kipli denetleyicisinin kararlı durum yakınsama süresine göre daha az olduğu görülmüştür.

[19]'da yazarlar ikili tank sistemi için LQR ve PID denetleyicilerin tasarımlarını uygulamış olup bu denetleyicilerin parametrelerin ayarlanması için PSO algoritmasından yararlanmışlardır. Önerilen her iki denetleyiciye sahip ikili tank sisteminin simülasyon çalışmaları Matlab'de yapılmıştır. Simülasyonda ITSE hata tabanlı performans indisinin yanı sıra yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım değeri ve kalıcı-durum hal hatası gibi değerler her iki denetleyici içinde karşılaştırılmıştır. Performans açısından PSO tabanlı LQR denetleyicisinin PSO tabanlı PID denetleyicisine göre daha iyi geçici tepki profili ortaya koyduğu gözlemlenmiştir.

[20]'de yazarlar ikili tank sistemindeki PID denetleyicisinin en uygun parametre değerlerini belirleyebilmek için BA yöntemini uygulamıştır. Önerilen BA tabanlı PID denetleyicisinin parametre değerlerinin belirlenmesi için hata tabanlı performans indislerinden olan ISE, ITAE ve IAE amaç fonksiyonları sırasıyla kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan optimizasyon algoritmasının yanı sıra PID denetleyicisinin parametrelerinin belirlenmesinde Ziegler-Nichols yönteminden de yararlanılmıştır. ISE amaç fonksiyonu tarafından bulunan PID parametre değerleri diğer yöntemler tarafından bulunan PID parametre değerlerine göre en az maksimum aşım, en az yükselme zamanı ve en az yerleşme zamanına sahip olduğu görülmüştür.

[21]'de yazarlar ikili tank sistemindeki sıvı seviyesini kontrol etmek amacıyla MOGA tabanlı PID denetleyicisinin tasarımını yapmışlardır. MOGA tabanlı PID denetleyicisinin üstünlüğünü gösterebilmek için GA tabanlı PID ve Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak ayarlanan PID denetleyicileriyle geçici zaman tepkisi açısından karşılaştırılmaları yapılmıştır. MOGA tabanlı PID denetleyicisinin diğer denetleyicilere göre maksimum aşım, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı bakımından üstün bir performans gösterdiği görülmüştür.

[22]'de yazarlar doğrusal olmayan ikili tank sistemindeki sıvı seviye takibini iyileştirmek adına FO-PIDSM denetleyicisini önermişlerdir. Önerilen bu denetleyicinin performansını gözlemleyebilmek için PI+FF denetleyicisiyle karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan bu karşılaştırmada referans girişi olarak sırasıyla sabit + kare ve sabit + testere yörünge izlemeleri verilmiştir. Ayrıca önerilen denetleyicinin PI+FF denetleyicisinden üstün olduğunu gösterebilmek için hata tabanlı metriklerden biri olan MSE ile de kıyaslanması yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre FO-PIDSMC denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre verilen farklı referans yörüngelerine karşı yörünge izlemede daha başarılı olduğu ve MSE değerinin daha az olduğu görülmüştür.

1.3. Tezin Amacı

Bu tezde ikili tank sistemindeki sıvı akış kontrolü için FPTID+FF denetleyicisi önerilmiştir. Kesir dereceli denetleyicisinin tasarımında Oustaloup yakınsama yöntemi kullanılmış olup parametrelerinin belirlenmesinde ise ölüm oyunu optimizasyonu algoritmasından (BRO) yararlanılmıştır. Ayrıca önerilen BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin üstün bir performans gösterdiğini kanıtlayabilmek amacıyla BRO tabanlı PI+FF denetleyicisiyle hem simülasyon olarak hem de gerçek zamanlı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Simülasyon karşılaştırılması olarak yakınsama eğrisi, birim basamak cevap tepkisi ve son olarak da sistem parametre değişikliklerine karşı gürbüzlük analizleri yapılmıştır.

Yapılan simülasyon sonuçlarının yanı sıra önerilen BRO tabanlı FPTID+FF ve BRO tabanlı PI+FF denetleyicilerinin deneysel sonuçları da sunulmuştur. Hem elde edilen simülasyon sonuçları hem de elde edilen deneysel sonuçlara göre önerilen BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin BRO tabanlı PI+FF denetleyicisine göre sistemin geçici yanıt karakteristiğini iyileştirdiğini, sistemin dayanıklılığını arttırdığını ve ani giriş sinyali değişikliklerine karşı daha başarılı bir takip sağladığı görülmüştür.

1.4. Tezin Özgünlüğü

İkili tank sıvı seviye sistemi için literatürde var olan denetleyiciler geniş kapsamlı olarak araştırılmıştır. Literatür taramasından elde edilen bilgiler sonucunda tez çalışmasının özgünlükleri aşağıda sıralanmıştır.

İkili tank sıvı seviye sistemi için ilk kez FPTID+FF denetleyicisi kullanılmış olup denetleyicinin etkinliği gösterilmiştir.

Önerilen BRO algoritması ikili tank sıvı seviye sistemi için tasarlanan FPTID+FF ve PI+FF denetleyicilerinin parametrelerinin belirlenmesinde ilk kez kullanılmıştır.

1.5. Tezin İçeriği

Tezin içeriği dört bölüm şeklinde organize edilmiştir.

1. Bölümde tezin amacından, tezin özgünlüğünden, tezin içeriğinden, ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritmasından, tez çalışmasında kullanılacak olan denetleyicilerden ve son olarak da ikili tank sisteminden bahsedilmiştir. Ayrıca optimizasyon probleminden ve ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritmasının nasıl uygulandığı açıklanmıştır.

2. Bölümde elde edilen simülasyon ve gerçek zamanlı sonuçlar yorumlanmıştır
3. Bölümde sonuçlar kıyaslanmıştır.
4. Bölümde ise ileride yapılacak çalışmalarla ilgili önerilere yer verilmiştir.

1.6. Optimizasyon Algoritması

Bu bölümde ise FPTID+FF ve PI+FF denetleyicilerine ait parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ölüm oyunu optimizasyonu algoritmasından bahsedilmiştir.

1.6.1. Ölüm Oyunu Optimizasyonu Algoritması

Geçmişten günümüze kadar önerilen meta-sezgisel algoritmalarının çoğu doğadan veya hayvanların davranışlarından esinlenerek tasarımı yapılmıştır. Yeni bir meta-sezgisel algoritması olan ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) ise diğer meta-sezgisel algoritmalarından farklı olarak “ölüm oyunu” video oyunlarından esinlenip tasarımı yapılan popülasyon tabanlı bir algoritmadır. BRO algoritmasında popülasyondaki her bir birey asker veya oyuncu olarak adlandırılır. Bu oyunlardaki temel esas sadece diğer düşman oyuncularını yenmek değil aynı zamanda oyun süresi boyunca oyun alanının dışında kalmamaktır. Çünkü oyun süresi boyunca oyun haritası gitgide daralır ve güvenli alanın dışındaki oyuncular da her saniye boyunca zarar görmeye başlar. Bu video oyunlarından biri olarak bilinen PUBG’de ki meşhur Sanhok haritası da oyun süresi boyunca gitgide daralan

haritaya örnek olarak verilebilir. Daire olarak da adlandırılan bu oyun alanı zamanla daralmasından dolayı oyun alanının dışındaki her oyuncu zarar görür. Bu durum oyuncuların birbirlerine yakın olmasını sağlar ve bütün oyuncuları güvenli bölgede bir araya getirir. Her bir süreç aşamasından sonra daire gitgide küçülür ve bu süre zarfında oyuncular birbirlerini öldürüp hayatta kalmaya çalışır. PUBG'nin diğer bir oyun modu olarak bilinen ve “ölüm maçı” olarak da adlandırılan bu mod da ise oyuncular belirli bir süre içinde maksimum sayıda düşman oyuncuyu öldürmeye çalışır. 2020 yılında Rahkar-Farshi tarafından önerilen bu algoritma, PUBG'nin ölüm maçı modundan ve PUBG'de ki Sanhok haritasının daralmasından ilham alınarak tasarımı yapılmıştır [23]. Araç seyir sistemi için tasarlanan PID denetleyicisine ait parametrelerin belirlenmesinde [24] ve doğrusallaştırılmış dörtlü tank sıvı seviye sistemindeki merkezi olmayan PI denetleyicisinin parametrelerinin belirlenmesinde [25] etkinliği kanıtlanmış bir algoritmadır.

BRO algoritması diğer popülasyon algoritmaları gibi başlatılırken her bir askerin/oyuncunun pozisyonu arama uzayı içerisinde rastgele olarak dağıtılır. Oyun süresince her bir asker kendisine en yakın konumdaki askere karşı silahını kullanarak yaralamaya çalışır. Eğer bir asker kendisine en yakın konumdaki bir askeri yaralamaya başarırsa yaralanan askerin hasar seviyesi bir artar. Denklem 1'de yaralanan askerin hasar seviyesinin denklemi verilmiştir.

$$x_i.hasar = x_i.hasar + 1 \quad (1)$$

Denklem 1'de belirtilen $x_i.hasar$ ifadesi askerin popülasyon içerisindeki hasar seviyesini belirtmektedir. Yaralanan asker düşman askerler tarafından daha fazla hasar görmemek için pozisyonlarını rastgele olarak günceller. Bu pozisyon güncellemesi o zaman süresince bulunan en iyi pozisyona hareket ettirilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Denklem 2'de yaralanan askerin pozisyon güncellemesi verilmiştir.

$$x_{hasar,d} = x_{hasar,d} + r(x_{en\ iyi,d} - x_{hasar,d}) \quad (2)$$

Burada r 0 ile 1 arasında rastgele olarak değişen sayı olmakla birlikte $x_{hasar,d}$ ise d boyutlu arama uzayında tanımlanan askerin pozisyonu belirtmektedir.

Ayrıca yaralanan oyuncu rakip oyunculara hasar verebilirse yaralanan oyuncunun hasar seviyesi sıfırlanmış olur. Eğer ki yaralanan oyuncu rakip oyuncuya zarar veremeyip ve almış olduğu hasar seviyesi eşik değerini geçerse oyuncu ölür. Oyuncu öldüğünde arama uzayında rastgele bir alanda doğar ve almış olduğu hasar seviyesi tekrar sıfırlanmış olur. Ölen askerin d boyutlu arama uzayında pozisyon konumlandırması denklem 3'teki gibidir.

$$x_{hasar,d} = r(ub_d - lb_d) + lb_d \quad (3)$$

Denklem 3'te görüleceği üzere ub_d ve lb_d sırasıyla üst sınır ve alt sınır değerlerini belirtmektedir. Algoritma en iyi çözümü bulabilmek için her iterasyon adımı boyunca arama uzayını küçültür.

İterasyon adımı Δ olarak ifade edilir ve hesaplanması denklem 4'te verilmiştir.

$$\Delta = \log_{10}(n) \quad (4)$$

Burada n maksimum iterasyon sayısını belirtmektedir. Arama uzayının küçültülmesi ile ilgili matematiksel ifade denklem 5'te verilmiştir.

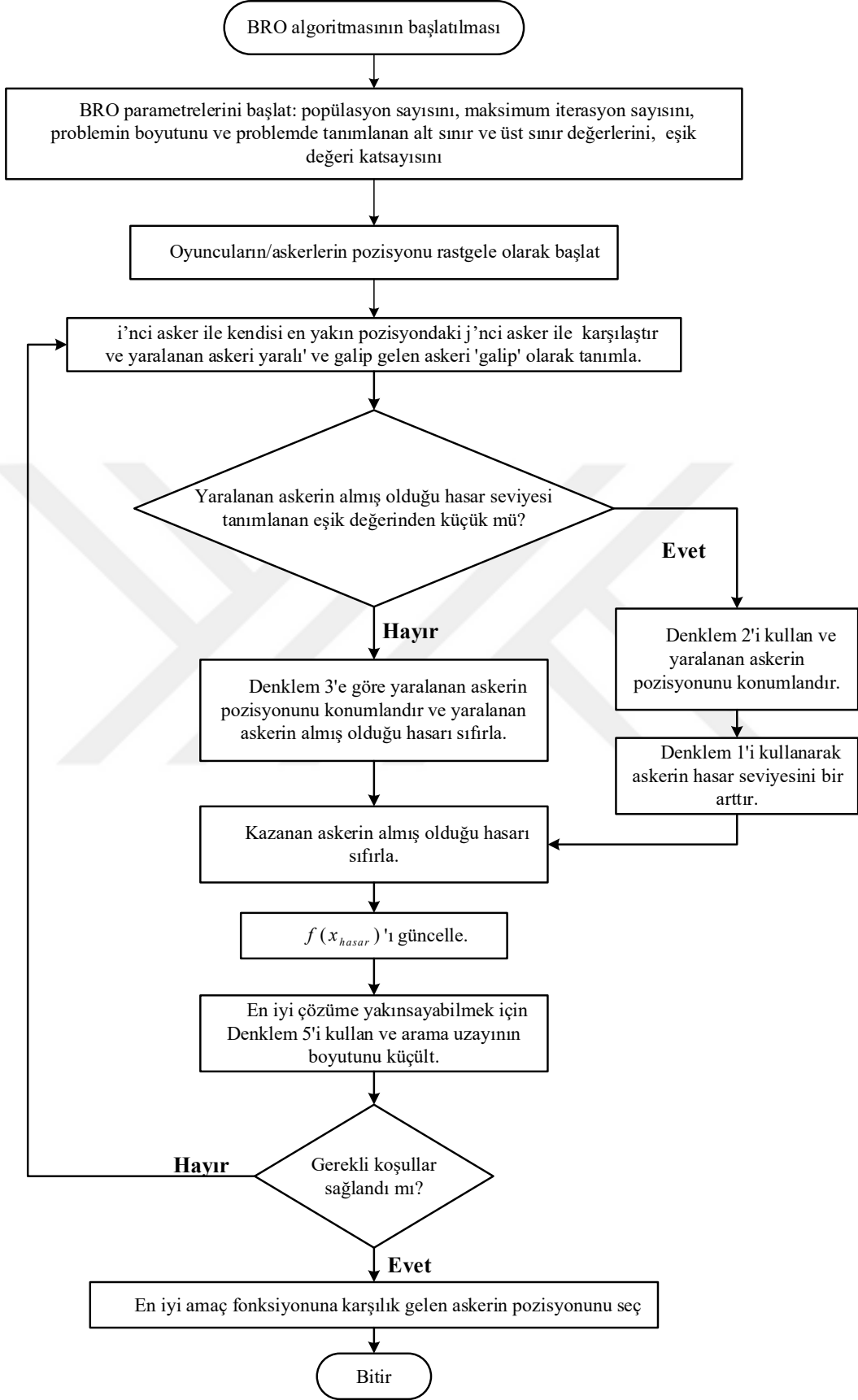
$$\Delta = \Delta + \text{round}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (5)$$

lb_d ve ub_d 'nin güncellenmeleri ile ilgili matematiksel ifadeler denklem 6-7'de verilmiştir.

$$ub_d = x_{en\ iyi,d} + SD(\overline{x_d}) \quad (6)$$

$$lb_d = x_{en\ iyi,d} - SD(\overline{x_d}) \quad (7)$$

Burada $SD(\overline{x_d})$ tüm arama ajanının standart sapmasını $x_{en\ iyi,d}$ ise bulunan en iyi çözümün pozisyonunu temsil etmektedir.



Şekil 1. Ölüm oyunu optimizasyonu algoritmasının akış diyagramı

1.7. Tez Çalışmasında Kullanılan Denetleyiciler

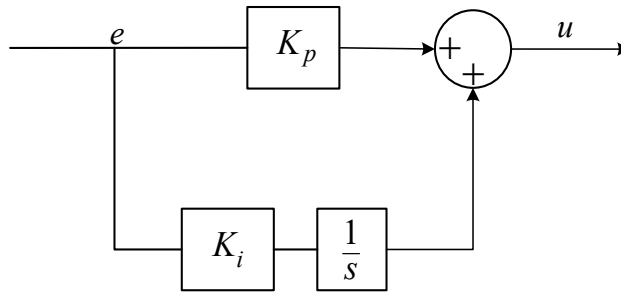
Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerinin tanıtları verilmiştir.

1.7.1. İleri Beslemeli Oransal-İntegral Denetleyici

PID denetleyicileri basit, uygulanabilir ve kolay kullanımlı bir yapıya sahip olmasının yanı sıra parametre değişimlerine karşın sağlam bir performans göstermektedir. Bu yüzden de günümüzde endüstriyel uygulamaların yaklaşık %90'ında PID denetleyicileri tercih edilmektedir [26]. Bu çalışmada ise PID denetleyicisinin farklı bir kombinasyonu olan PI denetleyicisi kullanılmıştır. PI denetleyicisine ait blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüleceği üzere K_p oransal kazancı ve K_i integral kazancını, $1/s$ integral operatörünü, e hata işaretini ve u denetleyici sinyalini temsil etmektedir. PI denetleyicisinin en büyük avantajı ise kararlı-durum hatasını ortadan kaldırır ve hata işaretinin önceki değerlerini dikkate alarak dinamik sapmaları kompanze eder [26].

Geleneksel PI denetleyicisine ait transfer fonksiyonu denklem 8'de verilmiştir.

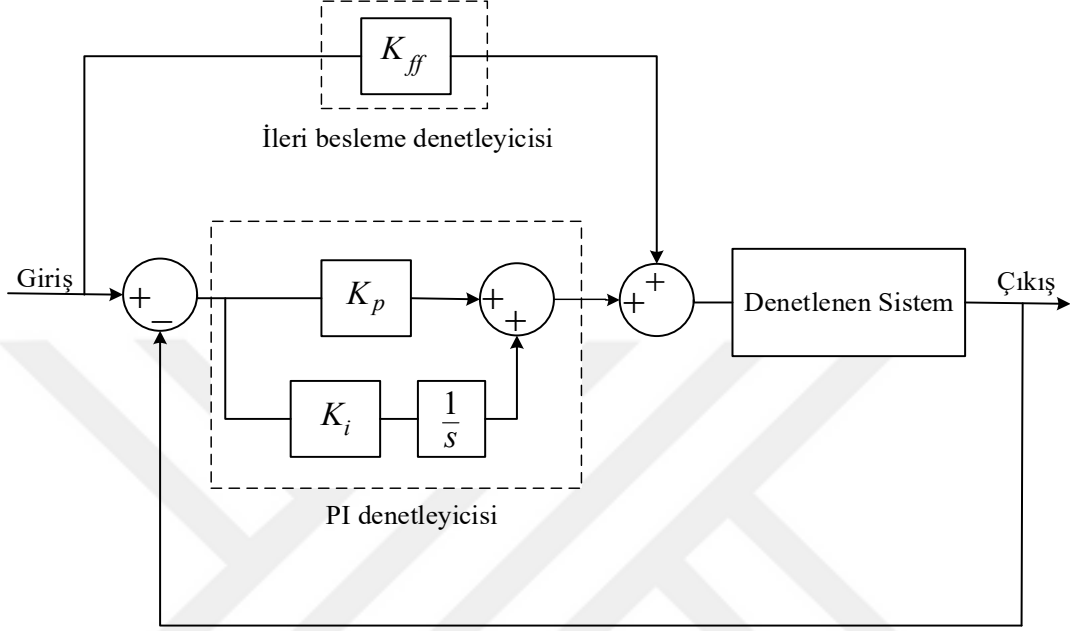
$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$



Şekil 2. PI denetleyicisinin şematik diyagramı

PI denetleyicisi gerçek zamanlı uygulamalarda ani referans değişikliklerine karşı yörünge izlemede üstün bir performans gösterememektedir. Sistem tepki hızını iyileştirebilmek adına PI denetleyicisine ileri beslemeli denetleyici eklenmiştir. Şekil 3'te ise ileri beslemeli oransal-integral (PI+FF) denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı

çevrimine ait şematik diyagramı verilmiştir. Şekil 3'te görüleceği üzere giriş değeri K_{ff} katsayısı ile çarpılarak PI denetleyicisinin çıkışına eklenmiştir. Burada K_{ff} ileri besleme denetleyicisinin kazanç değerini temsil etmektedir.



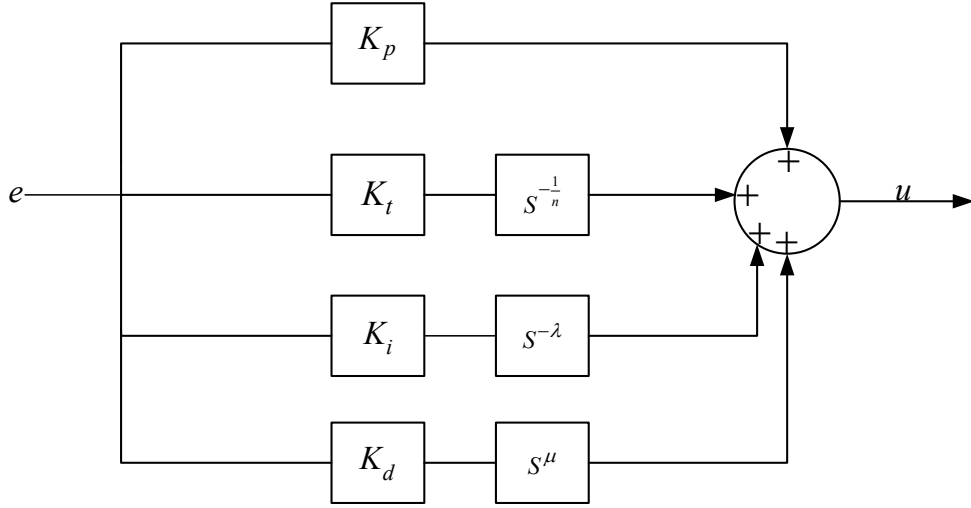
Şekil 3. PI+FF denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı çevrim şematik diyagramı

1.7.2. İleri Beslemeli Kesir Dereceli Oransal-Eğimli-İntegral-Türevsel Denetleyici

Kesir dereceli denetleyicilerden biri olan FPTID denetleyicisi PI denetleyicisinden farklı olarak fazladan beş parametre değerine sahiptir. Bu da PI denetleyicisine göre daha gürbüz ve esnek denetleyici olmasına imkân sağlar. FPTID denetleyicisine ait transfer fonksiyonu denklem 9'da verilmiştir.

$$G_{FPTID}(s) = K_p + \frac{K_t}{s^{\frac{1}{n}}} + K_i \frac{1}{s^{\lambda}} + K_d s^{\mu} \quad (9)$$

Şekil 4'te ise FPTID denetleyicisinin şematik diyagramı verilmiştir. Şekil 4'te K_p oransal kazancı, K_i integral kazancını, K_d türev kazancını K_t eğimli kazancını, $1/n$ ve λ integral operatörlerindeki katsayıların derecelerini ve μ ise türev operatöründeki katsayının derecesini temsil etmektedir.



Şekil 4. FPTID denetleyicisinin şematik diyagramı

Türev ve integral operatörlerindeki kesir dereceli katsayıların tasarımı için literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Riemann-Liouville, Grunwald-Letkinov ve Caputo yöntemleri kesir dereceli katsayıların tasarımı için önerilen başlıca yöntemlerdir [27]. Kesir dereceli operatörlerin zaman domeninde uygulanması oldukça karmaşık matematiksel işlemlere neden olmaktadır [28]. Bu çalışmada ise kesir dereceli operatörlerin matematiksel işlem karmaşıklığını giderebilmek adına Oustaloup yakınsama yöntemi kullanılmıştır [29]-[30]. Oustaloup yakınsama yöntemi kesir dereceli bir operatörün istenilen frekans bant aralığında tam sayı veya transfer fonksiyonu cinsinden yakınsamasını yapar. Oustaloup yakınsama yönteminin transfer fonksiyonu denklem 10’da verilmiştir. Denklem 10’da görüleceği üzere w_k^z ve w_k^p sırasıyla k dizisinin sıfırlarını ve kutuplarını temsil etmektedir.

$$s^{\lambda} \approx K \cdot \prod_{n=-N}^N \frac{s+w_k^z}{s+w_k^p} \quad (10)$$

w_k^z ve w_k^p ifadelerin hesaplanması denklem 11 ve 12’de verilmiştir. Burada w_b ve w_h sırasıyla alt ve üst frekans sınırlarını temsil etmektedir. Genellikle kesir dereceli operatör tasarımı yapılırken $w_b \cdot w_h = 1$ olarak seçilmesine dikkat edilir. N ise yakınsama derecesini belirtmektedir.

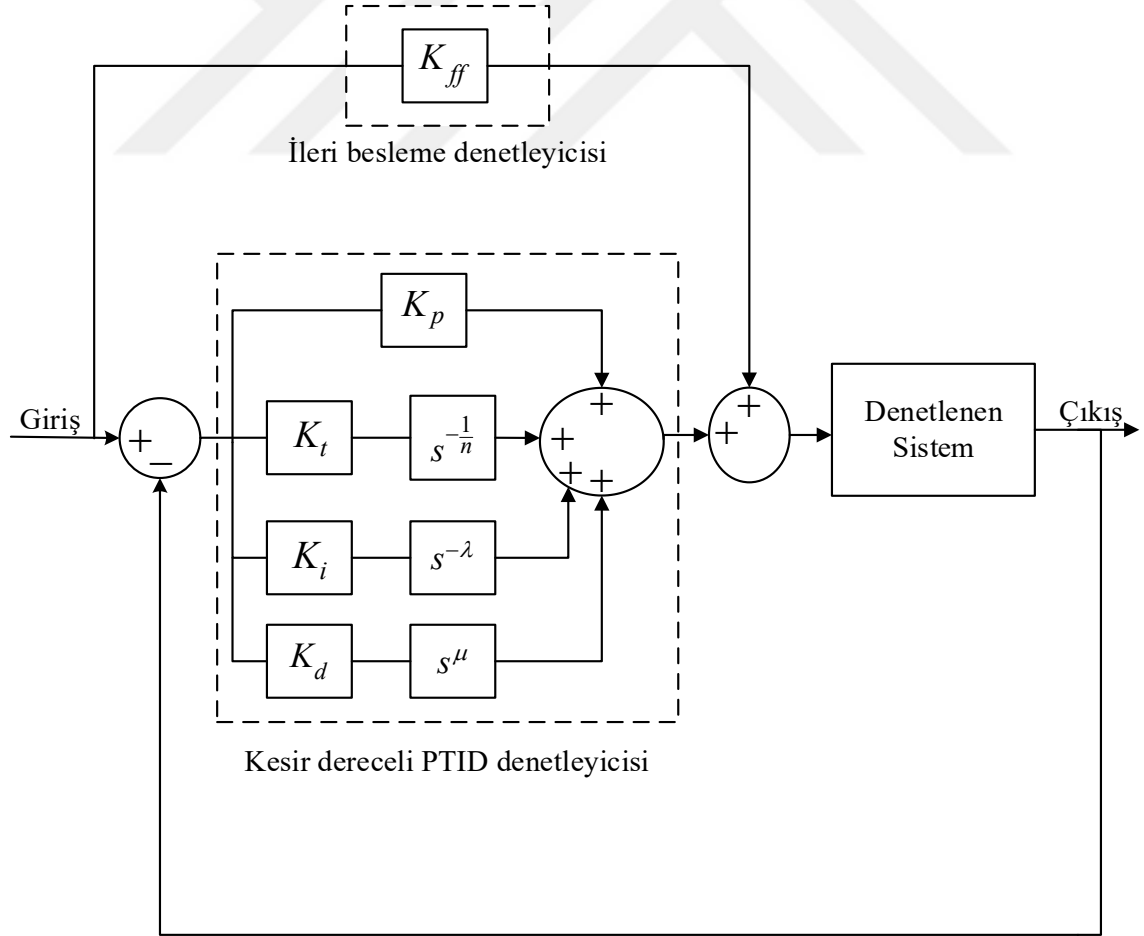
$$w_k^z = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{(1-\lambda)}{2}}{2N+1}} \quad (11)$$

$$w_k^p = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{(1+\lambda)}{2}}{2N+1}} \quad (12)$$

$$K = \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{-\frac{\lambda}{2}} \prod_{k=-N}^N \frac{w_k^p}{w_k^z} \quad (13)$$

Bu çalışmada $N = 5$ 'inci mertebeden Oustaloup yakınsama yöntemi seçilmiştir. Frekans aralığı ise $w \in (10^{-3}, 10^3)$ olarak alınmıştır.

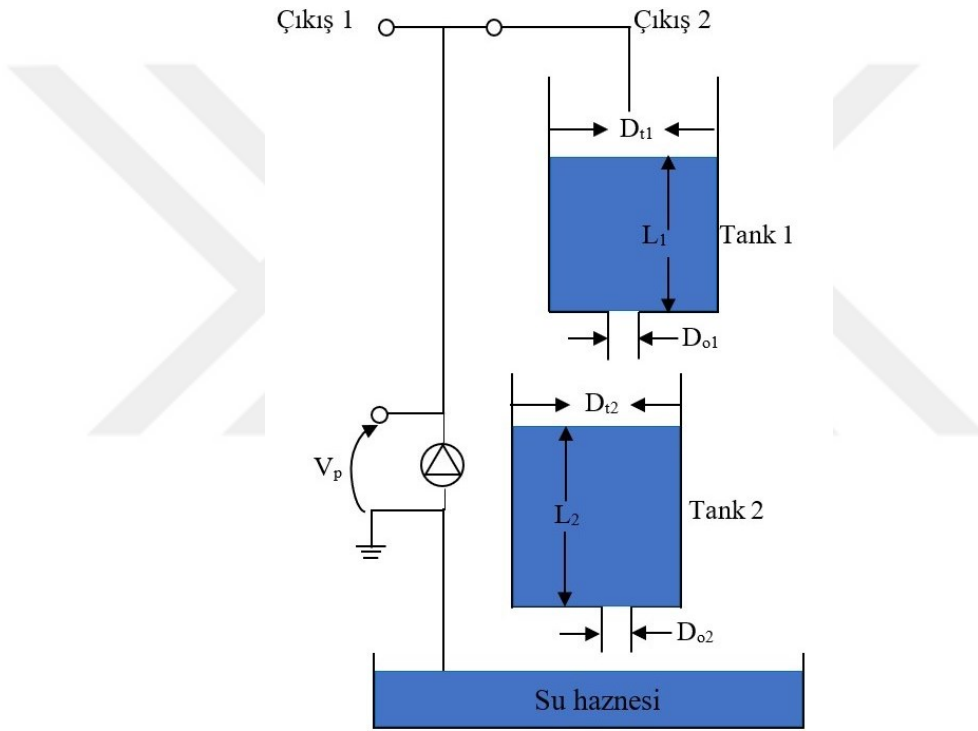
Şekil 5'te ise ileri beslemeli kesir dereceli oransal-eğimli-integral-türevsel (FPTID+FF) denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı çevrim şematik diyagramı verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi ileri besleme denetleyicisinin eklenmesinin sebebi gerçek zamanlı sistemdeki ani referans değişikliğine karşı sistem çıkış performansını arttırmaktır.



Şekil 5. FPTID+FF denetleyicisiyle denetlenen sistemin kapalı çevrim şematik diyagramı

1.8. İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi

İkili tank sisteminin şematik diyagramı şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan da görüleceği üzere ikili tank sistemi bir adet pompadan, iki adet tanktan ve su haznesinden oluşmaktadır. İkili tank sıvı seviyesi sistemi iki düzeneğe sahip olup 1. düzenekte sadece tank 1'in sıvı seviyesi kontrol edilecek olup burada tank 2 kullanılmaz. 2. düzenekte ise ilk önce tank 1'in sıvı seviyesi pompa aracılığıyla doldurulur. Yer çekimi kuvvetinin etkisiyle tank 1 çıkış deliğinden tank 2'ye sıvı akışı olur ve tank 2'nin sıvı seviyesi kontrol edilir.



Şekil 6. İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi

İlk olarak tank 1 ve tank 2 düzeneği için matematiksel modellemeler yapılmıştır. Daha sonra ise her iki düzeneğin içinde sistemlerin transfer fonksiyonları Laplace bölgesinde elde edilmiştir.

1.8.1. Tank 1 Düzeneğinin Matematiksel Modeli

Kütlenin korunumu ilkesi kullanılarak tank 1'deki sıvı seviyesinin değişimi denklem 14'te verilmiştir.

$$\dot{L}_1 = \frac{F_{1giriş} - F_{1çıkış}}{A_{t1}} \quad (14)$$

Burada tank 1'e giren sıvı hacimsel akış oranı $F_{giriş}$ tank 1'den çıkan sıvı hacimsel akış oranı $F_{çıkış}$ ve A_{t1} ise tank 1'in kesit alanını temsil etmektedir.

$$F_{1giriş} = k_p V_p \quad (15)$$

$$F_{1çıkış} = \left(\frac{1}{4} D_{o1}^2\right) V_{o1} \quad (16)$$

Denklem 15-16'da görüleceği üzere k_p pompanın sabitini (cm^3/Vs), V_p pompaya uygulanan gerilimi, D_{o1} tank 1'in sıvı çıkış yolunun çapını ve V_{o1} tank 1'den çıkan sıvının akış hızını temsil etmektedir.

Tank 1'in sıvı çıkış yolunun kesit alanı ve tank 1'den çıkan sıvı akış hızı denklem 17-18'de sırasıyla verilmiştir.

$$A_{o1} = \left(\frac{1}{4} D_{o1}^2\right) \quad (17)$$

$$V_{o1} = \sqrt{2gL_1} \quad (18)$$

Denklem 16, denklem 17-18'de verilen matematiksel ifadeler göz önüne alınarak tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_{1çıkış} = A_{o1} \sqrt{2gL_1} \quad (19)$$

Burada g yer çekimi sabitini L_1 ise tank 1'deki sıvı seviyesini belirtmektedir.

Denklem 15 ve 19'daki ifadeler denklem 14'te tekrar yerine yazıldığında tank 1'in matematiksel modeli aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{L}_1 = \frac{k_p V_p - A_{o1} \sqrt{2gL_1}}{A_{t1}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial L_{10}}{\partial t} = \frac{k_p V_{p0} - \sqrt{2gL_{10}A_{o1}}}{At_1} \quad (21)$$

Sistemin denge noktasına ait matematiksel ifade denklem 21’de verilmiştir. Sistem dengede olduğunda türev terimleri sıfıra eşit olur. Denklem 21 tekrar düzenlediğinde aşağıdaki gibi olur.

$$V_{p0} = \frac{\sqrt{2gL_{10}A_{o1}}}{k_p} \quad (22)$$

L_{10} sıvı seviyesi nominal pompa gerilimine göre 15 cm, $k_p = 3.3 \text{ cm}^3/\text{s/V}$ ve $g = 981 \text{ cm/s}^2$ olarak alınıp denklem 22’de yerine yazıldığında $V_{p0} = 9.26 \text{ V}$ olarak bulunur. $L_{10} = 15 \text{ cm}$ ve $V_{p0} = 9.26 \text{ V}$ belirlenen denge noktaları için küçük bir gerilim artımına (V_{p1}) karşın küçük bir sıvı seviyesi artışı (L_{11}) verildiğinde tank 1’de meydana gelen sıvı seviyesi ve pompa gerilimi denklem 23-24’teki gibi ifade edilir.

$$L_1 = L_{10} + L_{11} \quad (23)$$

$$V_p = V_{p0} + V_{p1} \quad (24)$$

Denklem 20’de görüleceği üzere tank 1 düzeneğinin matematiksel modelinde kare köklü terim vardır. Dolayısıyla tank 1 doğrusal olmayan bir sistemdir. Tank 1 düzeneğinin transfer fonksiyonunu bulmak için denklem 20’nin belirli koşullar altında doğrusallaştırılması gerekmektedir. Doğrusallaştırma işlemi için sistemin denge noktası etrafındaki (V_{p0}, L_{10}) küçük sapmaların bir fonksiyonu oluşturulmuştur. Denklem 20, denklem 25’te verilen Taylor yakınsama yöntemi kullanılarak doğrusallaştırılmıştır.

$$f(L_1, V_p) \cong f(L_{10}, V_{p0}) + \left(\frac{\partial f(L_{10}, V_{p0})}{\partial L_1} \right) (L_1 - L_{10}) + \left(\frac{\partial f(L_{10}, V_{p0})}{\partial V_p} \right) (V_p - V_{p0}) \quad (25)$$

Denklem 26’da tank 1 sisteminin doğrusallaştırılmış modeli verilmiştir.

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = \frac{k_p V_{p0} - \sqrt{2gL_{10}A_{o1}}}{At_1} - \frac{\sqrt{2}A_{o1}gL_{11}}{2\sqrt{gL_{10}A_{t1}}} + \frac{k_p V_{p1}}{At_1} \quad (26)$$

$$\frac{\partial L_{11}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{A_{o1} \sqrt{2g} L_{11}}{\sqrt{g} L_{10} A_{t1}} + \frac{k_p V_{p1}}{A_{t1}} \quad (27)$$

Denklem 27'den sistemin açık çevrim transfer fonksiyonuna geçebilmek için Laplace dönüşümü uygulanmıştır.

$$sL_{11} = -\frac{1}{2} \frac{A_{o1} \sqrt{2g} L_{11}(s)}{\sqrt{g} L_{10} A_{t1}} + \frac{k_p V_{p1}(s)}{A_{t1}} \quad (28)$$

Denklem 28 düzenlendiğinde ve açık çevrim transfer fonksiyonu K_{dc1} ve T_1 cinsinden ifade edildiğinde transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$G_1(s) = \frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} = \frac{K_{dc1}}{T_1 s + 1} \quad (29)$$

Burada $K_{dc1} = \frac{\sqrt{2g} L_{10} k_p}{A_{o1} g}$ ve $T_1 = \frac{\sqrt{2g} L_{10} A_{t1}}{A_{o1} g}$ olarak bulunur.

1.8.2. Tank 2 Düzenliğinin Matematiksel Modeli

Kütlenin korunumu ilkesi kullanılarak tank 2'nin sıvı seviye değişiminin matematiksel modeli denklem 30'da verilmiştir.

$$\dot{L}_2 = \frac{F_{2giriş} - F_{2çıkış}}{A_{t2}} \quad (30)$$

$$F_{2giriş} = A_{o1} \sqrt{2g L_1} \quad (31)$$

$$F_{2çıkış} = A_{o2} \sqrt{2g L_2} \quad (32)$$

Denklem 31-32'deki matematiksel ifadeler denklem 30'da tekrar yerine yazıldığında tank 1 için matematiksel model aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{L}_2 = \frac{A_{o1} \sqrt{2g L_1} - A_{o2} \sqrt{2g L_2}}{A_{t2}} \quad (33)$$

Denklem 33'te görüleceği üzere tank 2'nin matematiksel modelinde kare köklü terim vardır. Dolayısıyla tank 2 doğrusal olmayan bir sistem olup Laplace domeninde transfer fonksiyonunun bulunması için belirli koşullar altında doğrusallaştırılması gerekmektedir.

$$L_{10} = \frac{A_{02}^2}{A_{01}^2} L_{20} \quad (34)$$

L_{10} sıvı seviyesi 15 cm olduğunda L_{20} sıvı seviyesi de 15 cm olmaktadır. Bu statik denge noktaları kullanılarak denklem 33, denklem 35'te verilen Taylor yakınsama yöntemine göre doğrusallaştırılması yapılmıştır. Tank 2 sistemi için doğrusallaştırılmış model denklem 36'da verilmiştir.

$$f(L_1, L_2) \cong f(L_{10}, L_{20}) + \left(\frac{\partial f(L_{10}, L_{20})}{\partial L_1} \right) (L_1 - L_{10}) + \left(\frac{\partial f(L_{10}, L_{20})}{\partial L_2} \right) (L_2 - L_{20}) \quad (35)$$

$$\frac{\partial L_{21}}{\partial t} = -\frac{\sqrt{2g}A_{02}L_{21}}{2\sqrt{gL_{20}A_{t2}}} + \frac{\sqrt{2g}A_{01}L_{11}}{2\sqrt{gL_{10}A_{t1}}} \quad (36)$$

Denklem 37'de verilen tank 2 düzeneğinin açık çevrim transfer fonksiyonu bulabilmek için Laplace dönüşümü uygulanmıştır.

$$sL_{21} = -\frac{\sqrt{2g}A_{02}L_{21}(s)}{2\sqrt{gL_{20}A_{t2}}} + \frac{\sqrt{2g}A_{01}L_{11}(s)}{2\sqrt{gL_{10}A_{t1}}} \quad (37)$$

Yukarıda verilen denklem 37 düzenlendiğinde ve açık çevrim transfer fonksiyonu K_{dc2} ve T_2 olarak ifade edildiğinde tank 2 düzeneğinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$G_2(s) = \frac{L_{21}(s)}{L_{11}(s)} = \frac{K_{dc2}}{T_2s+1} \quad (38)$$

Burada $K_{dc2} = \frac{A_{01}\sqrt{L_{20}}}{A_{02}\sqrt{L_{10}}}$ ve $T_2 = \frac{\sqrt{2gL_{20}A_{t2}}}{A_{02}g}$ olarak bulunur.

Tablo 1'de verilen parametre değerleri denklem 29 ve 38'de yerine yazıldığında tank 1 ve tank 2'nin transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi olur.

$$G_1(s) = \frac{3.24}{15.23s+1} \quad (39)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{15.23s+1} \quad (40)$$

Tablo 1. İkili tank sisteminin parametre değerleri

Parametreler	Değerleri
k_p (Pompa akış sabiti)	3.3 cm ³ /s/V
A_{o1} (Tank 1 çıkış deliğinin kesit alanı)	0.1781 cm ²
A_{o2} (Tank 2 çıkış deliğinin kesit alanı)	0.1781 cm ²
A_{1t} (Tank 1 iç kesit alanı)	15.5179 cm ²
A_{2t} (Tank 2 iç kesit alanı)	15.5179 cm ²
g (Yerçekimi sabiti)	981 cm/s ²

1.8.3. BRO Algoritmasının İkili Tank Sistemine Uygulanması

Bu bölümde ölüm oyunu optimizasyonu algoritması tabanlı önerilen denetleyicilerin ikili tank sistemine uygulanması anlatılmıştır. İlk olarak her iki tank düzeneğinde de ITAE amaç fonksiyonu kullanılmıştır. ITAE amaç fonksiyonu diğer hata tabanlı amaç fonksiyonlarına göre daha az aşım miktarı ve yerleşme zamanı gibi avantajlara sahiptir. ITAE amaç fonksiyonun matematiksel ifadesi denklem 41’de verilmiştir.

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t|r(t) - y(t)| = \int_0^{t_{sim}} t|e(t)| \quad (41)$$

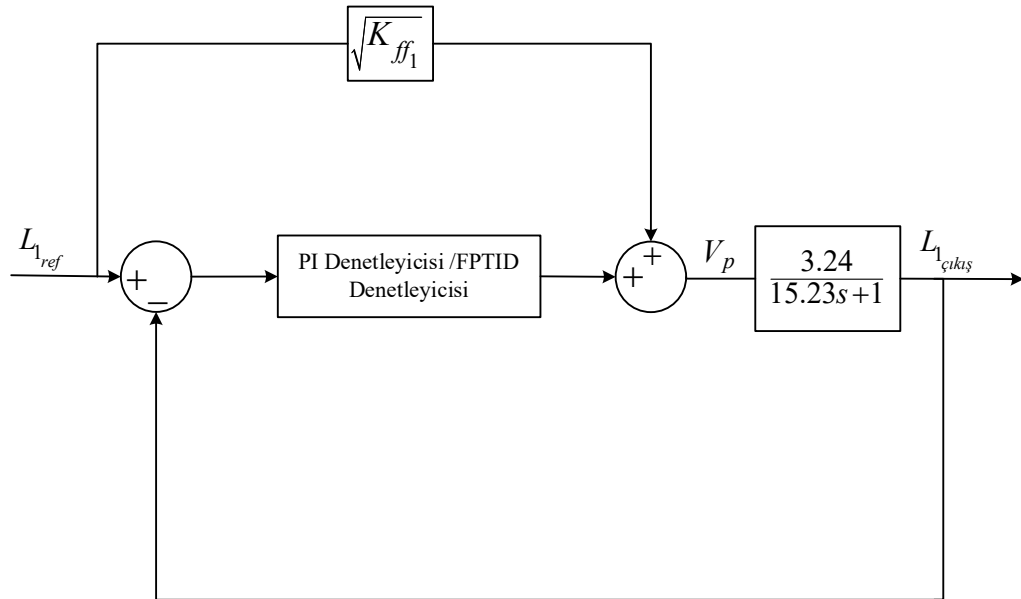
Denklem 41’de t_{sim} simülasyon süresini, $r(t)$ referans değeri, $y(t)$ çıkış değeri, $e(t)$ ise referans değer ile çıkış değeri arasındaki farkı belirten hatayı temsil etmektedir. Bu çalışmada t_{sim} tank 1 düzeneği için 60 saniye olarak alınmış olup tank 2 düzeneğinde 160 saniye olarak alınmıştır. $r(t)$ ise her iki tank düzeneği içinde 15 cm olarak belirlenmiştir.

Tablo 2’de ise kullanılan BRO algoritmasının parametre değerleri listelenmiştir. Tank 1 düzeneği tablo 2’de verilen denetleyici parametre sınır değerleri göz önüne alınarak her iki denetleyici içinde en uygun değerler belirlenmiştir. Şekil 8’de görüleceği üzere tank

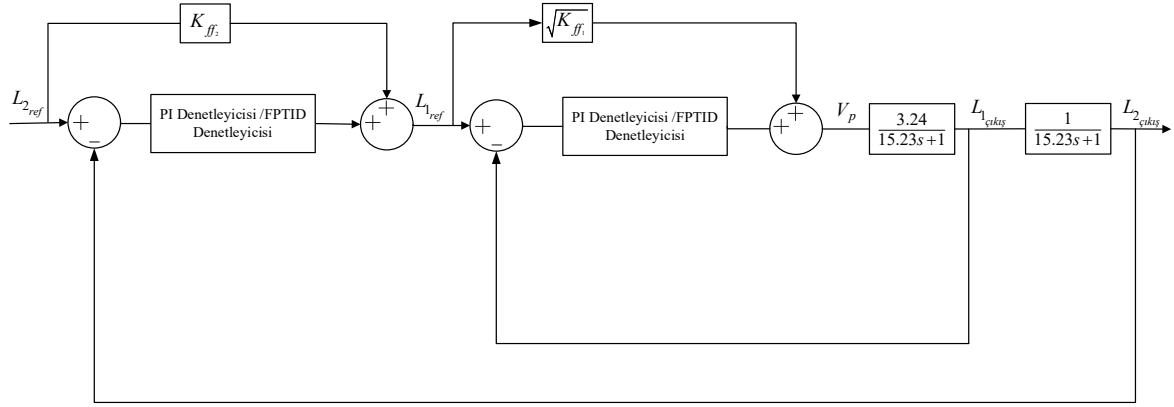
1’de bulunan denetleyici parametre değerleri de tank 2 düzeneğine etki etmektedir. Burada tank 1 için bulunan her iki denetleyicinin parametre değerleri sırasıyla girilmiştir. Bu parametre değerleri girildikten sonra tank 2 düzeneğinde her iki denetleyici içinde tablo 2’deki parametre sınır değerleri göz önüne alınarak en uygun değerleri bulunmuştur.

Tablo 2. BRO algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerleri
Popülasyon Sayısı	30
İterasyon Sayısı	30
Tank 1 Düzeneği için PI+FF alt sınır değerleri	[0.1 0.1 1.25]
Tank 1 Düzeneği için PI+FF üst sınır değerleri	[25 5 2]
Tank 1 Düzeneği için FPTID+FF alt sınır değerleri	[0.1 0.1 1 0.1 0.1 0.01 0.1 1.25]
Tank 1 Düzeneği için FPTID+FF üst sınır değerleri	[25 1 10 5 1 0.1 1 2]
Tank 2 Düzeneği için PI+FF alt sınır değerleri	[0.1 0.1 0.8]
Tank 2 Düzeneği için PI+FF üst sınır değerleri	[25 5 1]
Tank 2 Düzeneği için FPTID+FF alt sınır değerleri	[0.1 0.1 1 0.1 0.1 0.01 0.1 0.8]
Tank 2 Düzeneği için FPTID+FF üst sınır değerleri	[25 0.2 10 5 1 0.1 1 1]



Şekil 7. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi



Şekil 8. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi

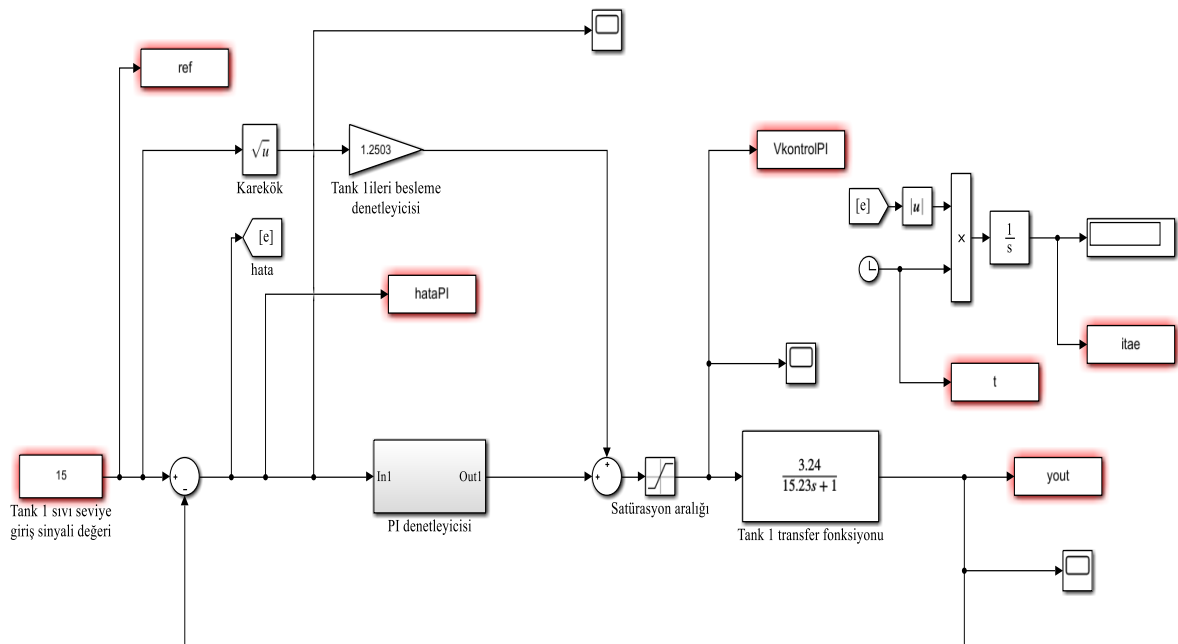
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Giriş

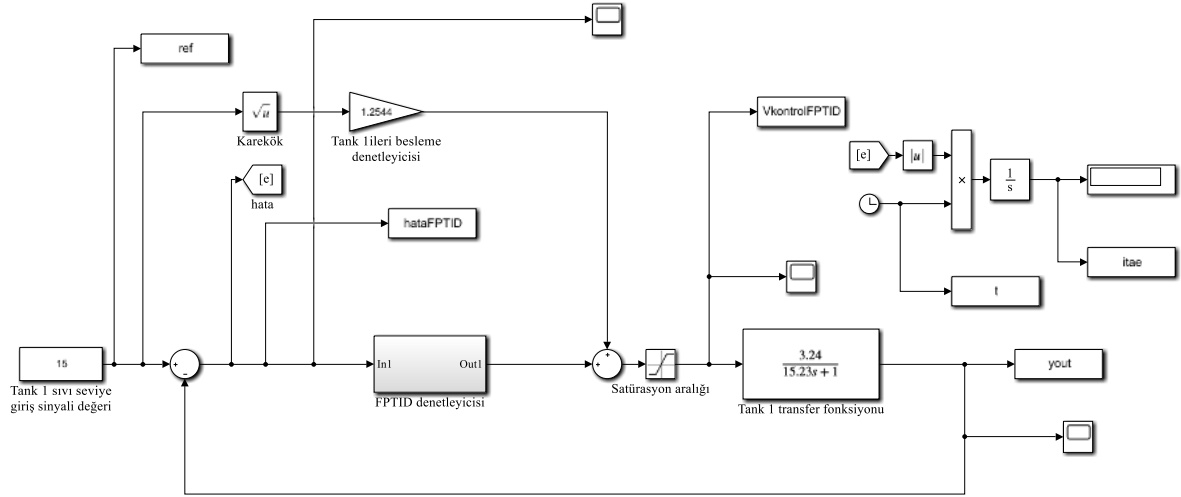
Yapılan tez çalışmasında tank 1 ve tank 2 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında sırasıyla benzetimi yapılmıştır.

2.2. Tank 1 Düzeneğinin Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi

PI+FF denetleyicisi ve FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi şemaları Şekil 9-10'da sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 9 ve 10'da gösterilen şematik diyagramlar Matlab/Simulink ortamı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Tank 1 düzeneği için referans değeri 15 cm ve T_s örnekleme zamanı ise 1 milisaniye olarak belirlenmiştir. Denetleyici sinyalinin çıkışı ise gerçek zamanlı uygulamada kullanılan motor pompasının nominal değeri dikkate alınarak 0-22 volt arasında satürasyon değeri konulmuştur.



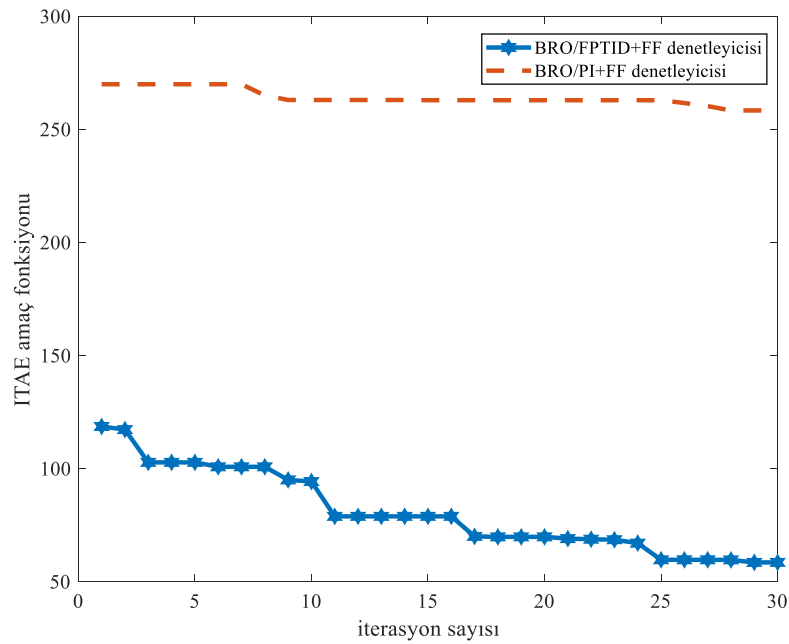
Şekil 9. PI+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi



Şekil 10. FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi

2.2.1. Tank 1 Düzeneğinin Yakınsama Eğrisi Analizi

İkili tank sıvı seviye sisteminin Tank 1 düzeneği için önerilen BRO tabanlı PI+FF ve önerilen BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicilerinin yakınsama eğrileri Şekil 11’de gösterilmiştir. BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin önerilen PI+FF denetleyicisine göre daha düşük ITAE amaç fonksiyonuna sahip olduğu Şekil 11’de görülmektedir.

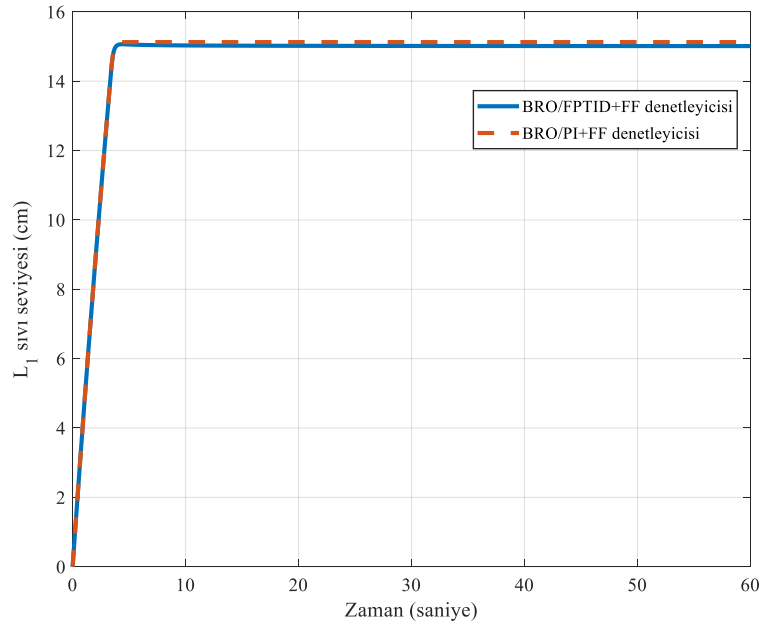


Şekil 11. Tank 1 düzeneği için önerilen denetleyicilerin yakınsama eğrisi analizleri

BRO algoritması tank 1 düzeneği için tasarlanan her iki denetleyici içinde 3'er kez rastgele olarak çalıştırılmıştır. İki denetleyici içinde en düşük ITAE amaç fonksiyonuna karşılık gelen parametre değerleri alınmıştır. Tank 1 düzeneği için BRO/FPTID+FF denetleyicisinin parametre değerleri $K_{P_1} = 24.4413$, $K_{T_1} = 0.5264$, $n_1 = 7.6463$, $K_{I_1} = 0.6388$, $\lambda_1 = 0.1153$, $K_{D_1} = 0.0722$, $\mu_1 = 0.5840$ $K_{FF_1} = 1.2544$ ve BRO/PI+FF parametre değerleri ise $K_{P_1} = 24.9754$, $K_{I_1} = 4.4310$, $K_{FF_1} = 1.2503$ olarak bulunmuştur.

2.2.2. Tank 1 Düzeneğinin Birim Basamak Tepkisi Analizi

Tank 1 düzeneği için elde edilen PI+FF ve FPTID+FF parametre değerleri Şekil 9-10'da gösterilen Matlab/Simulink modellemelerinde sırasıyla girilmiş olup sistemin çıkış tepki yanıtları Şekil 12'de sırasıyla verilmiştir. BRO tabanlı FPTID+FF ve BRO tabanlı PI+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin geçici karakteristik değerlerini hesaplayabilmek için Matlab ortamında 'stepinfo' komutu kullanılmıştır. Her iki denetleyici içinde elde edilen maksimum aşım yüzdesi (M_p), yerleşme zamanı (t_s), yükselme zamanı (t_r) ve tepe zamanı değerleri (t_p) tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüleceği üzere her iki denetleyicinin de yükselme zamanı değerinin aynı olduğu elde edilen yerleşme zamanı hariç, maksimum aşım ve değeri tepe zamanı değeri bakımından ise BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin BRO tabanlı PI+FF denetleyicisine göre daha üstün olduğu görülmüştür.

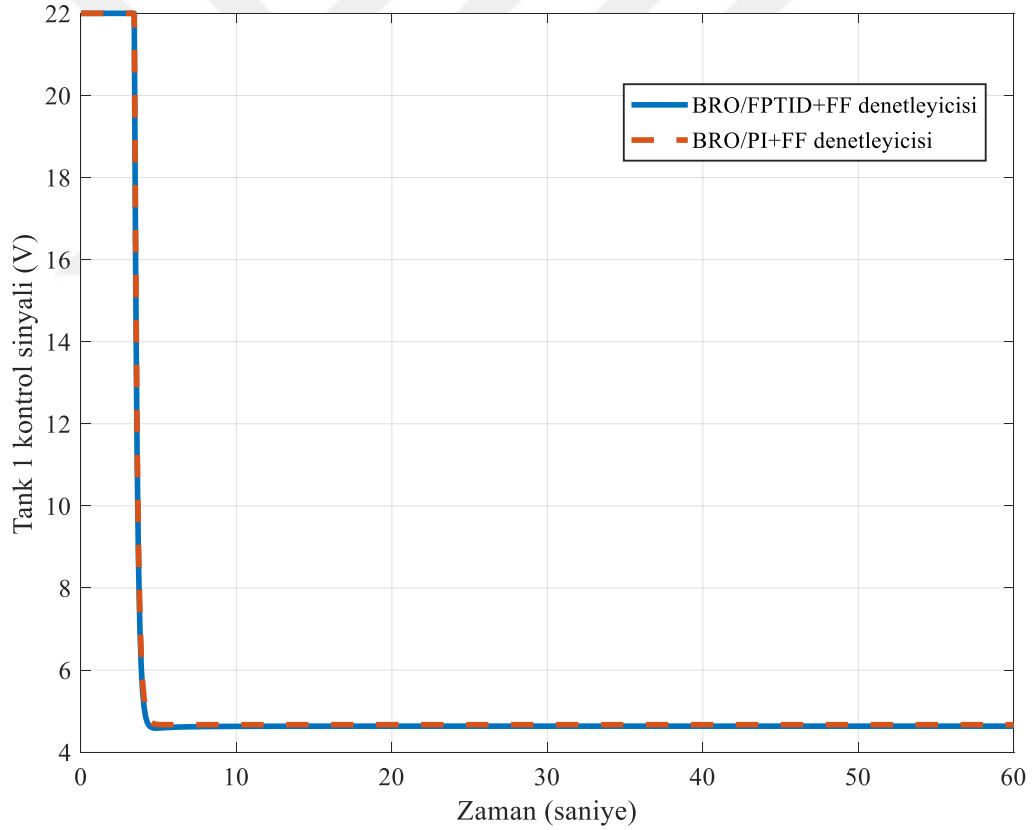


Şekil 12. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 1 düzeneğinin birim basamak tepkisi

Tablo 3. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 1 düzeneği sıvı seviyesinin geçici karakteristik değerleri

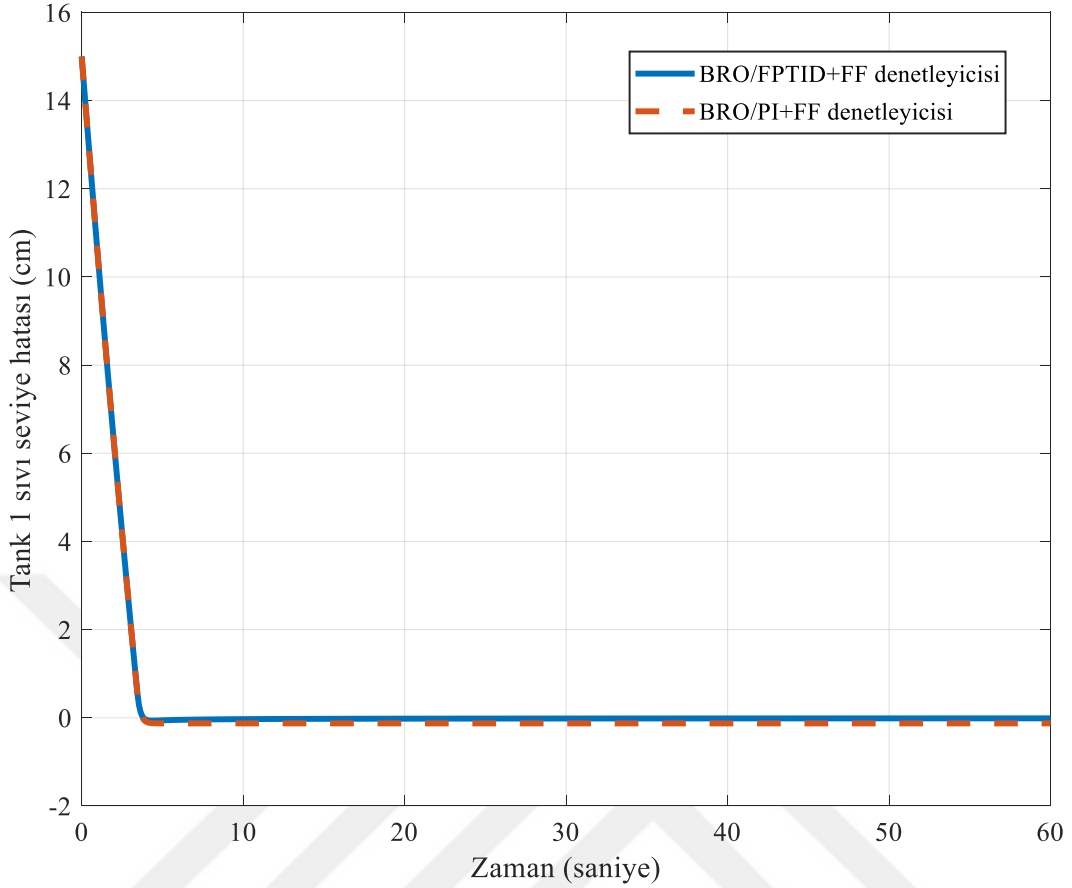
Denetleyici	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm\%2$)	t_r (sn) (0.10→0.90)	t_p (sn)
BRO/FPTID+FF	0.4260	3.5410	2.8740	4.3800
BRO/PI+FF	0.8471	3.5360	2.8740	8.7100

Şekil 13'te ise PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerin kontrol sinyalleri verilmiştir. Şekil 13'te görüleceği üzere her iki denetleyici içinde gerilim değerlerinin 0-22 volt arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 13. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin kontrol sinyali

Şekil 14'te önerilen denetleyicilere sahip tank 1 düzeneğinin hata sinyalleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere her iki denetleyicinin de hata değerlerinin sıfır olduğu görülmüştür.

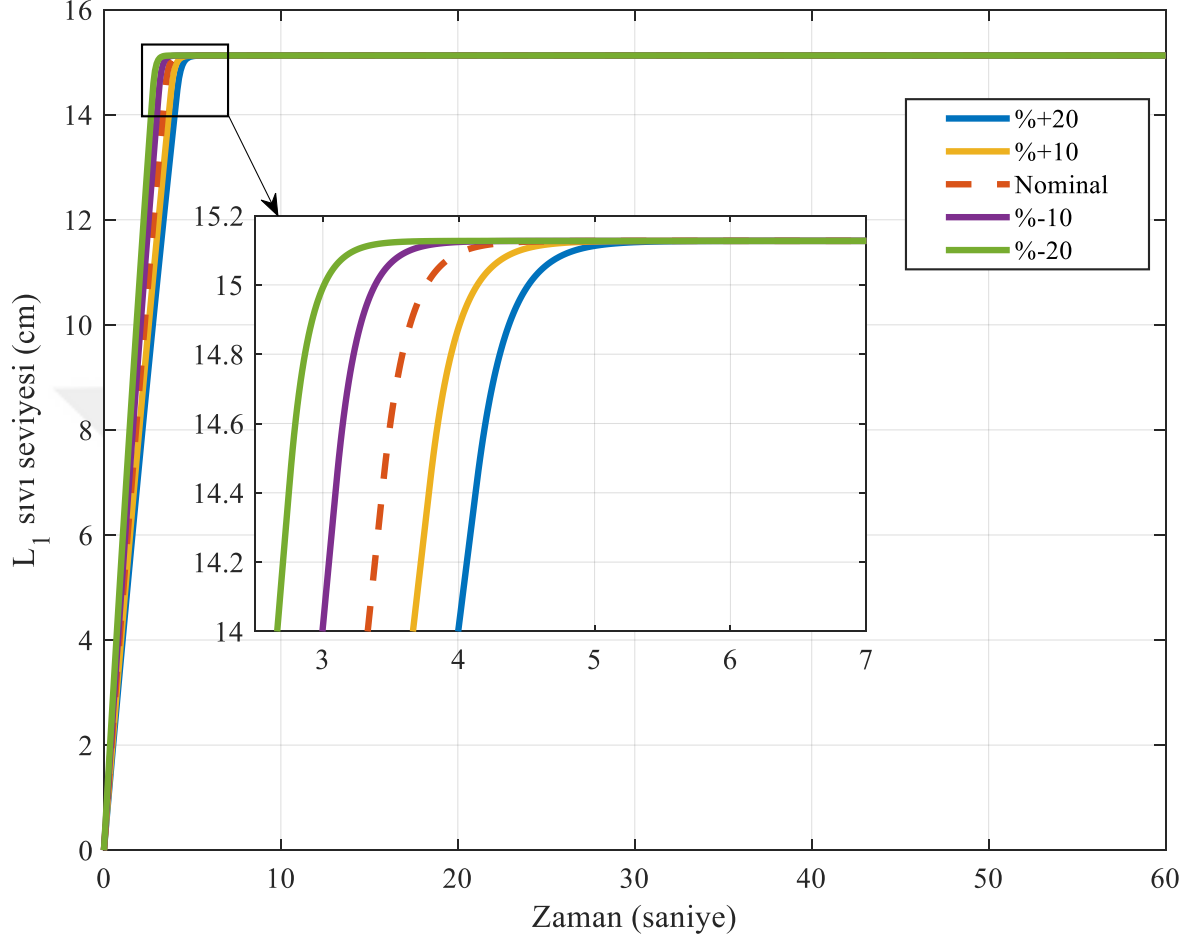


Şekil 14. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 1 düzeneğinin hata sinyali

2.2.3. Tank 1 Düzeneği İçin Gürbüzlük Analizi

Sistem belirsizliği oluşan anormal durumlarda sistemin kabul edilebilir tepkisini sürdürebilmesi için sağlam bir denetleyici tasarımının yapılması oldukça önemlidir. Sistemdeki parametrelerden kaynaklanan değişimler gürbüzlük analizi aracılığıyla gözlemlenir. Bu tezde ise BRO algoritması ile en uygun parametre değerleri bulunan PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerin tank 1 düzeneğindeki parametre değişikliğine karşı gürbüzlük analizi yapılmıştır. Tank 1 düzeneğinin gürbüzlük analizi için τ_1 değeri $\%+20$ ile $\%-20$ arasında değiştirilip sırasıyla her bir denetleyicinin geçici yanıt karakteristikleri incelenmiştir. τ_1 parametre değişimine karşı PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine ait geçici yanıt karakteristik değerleri tablo 4-5'te sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca PI+FF ve FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 1 düzeneğinin sıvı seviye tepkileri Şekil 14-15'te sırasıyla gösterilmiştir. Tank 1 düzeneğindeki gürbüzlük analizinden elde edilen sonuçlara göre $\%+20$ ile $\%-20$ arasında bile tank 1 düzeneğini kararsızlaştırmadığı ve FPTID+FF

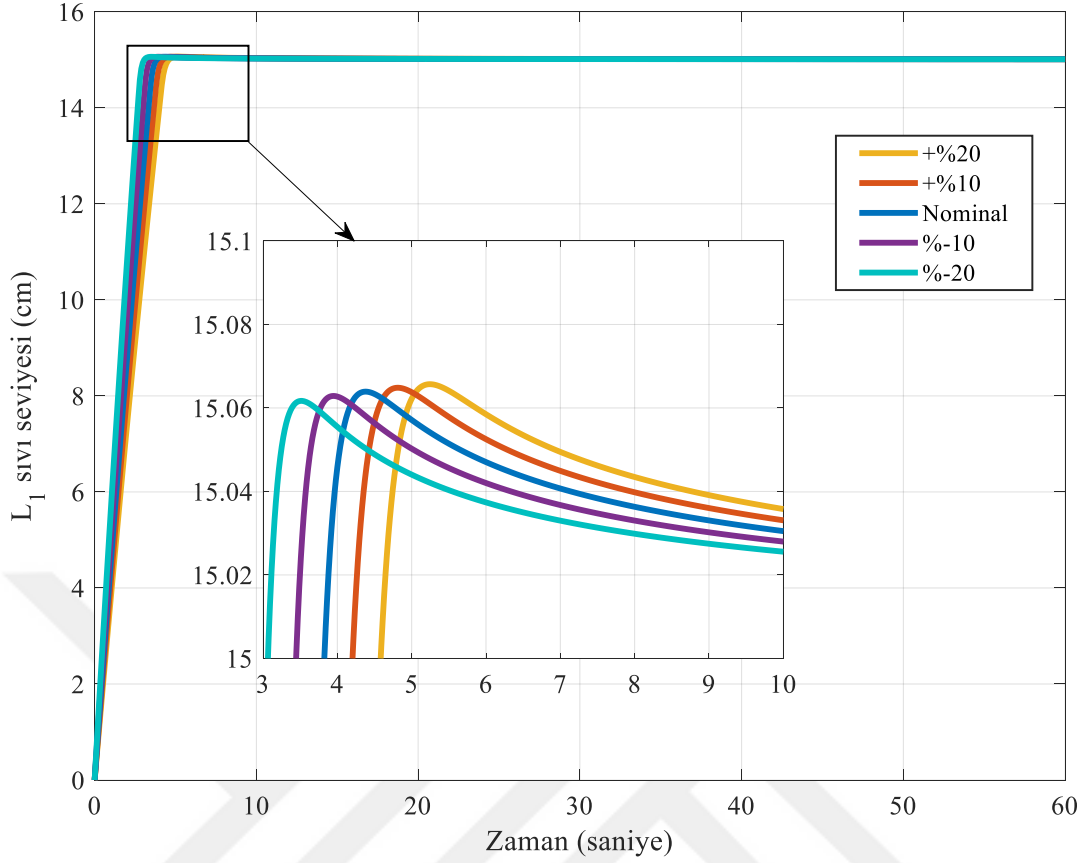
denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre daha üstün bir performans gösterdiği görülmüştür.



Şekil 15. PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için birim basamak tepkisi

Tablo 4. BRO/PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları

Model Parametresi	Değişim Oranı (%)	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm 2\%$)	t_r (sn) (0.10→0.90)	t_p (sn)
τ_1	% +20	0.8471	4.2430	3.4490	10.4510
	% +10	0.8471	3.8890	3.8890	9.5800
	% -10	0.8471	3.1820	2.5870	7.9560
	% -20	0.8471	2.8280	2.2990	7.0710



Şekil 16. FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için birim basamak tepkisi

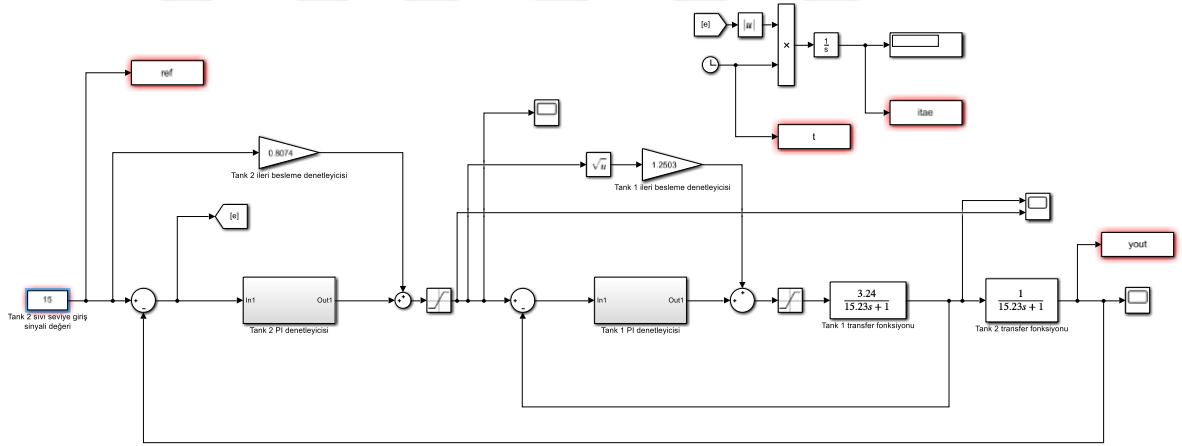
Tablo 5. BRO/FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 1 düzeneğinin τ_1 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları

Model Parametresi	Değişim Oranı (%)	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm 2\%$)	t_r (sn) (0.10→0.90)	t_p (sn)
τ_1	% +20	0.4379	4.2480	3.4490	5.2450
	% +10	0.4322	3.8950	3.1610	4.8130
	% -10	0.4191	3.1870	2.5870	3.9480
	% -20	0.4113	2.8330	2.2990	3.5150

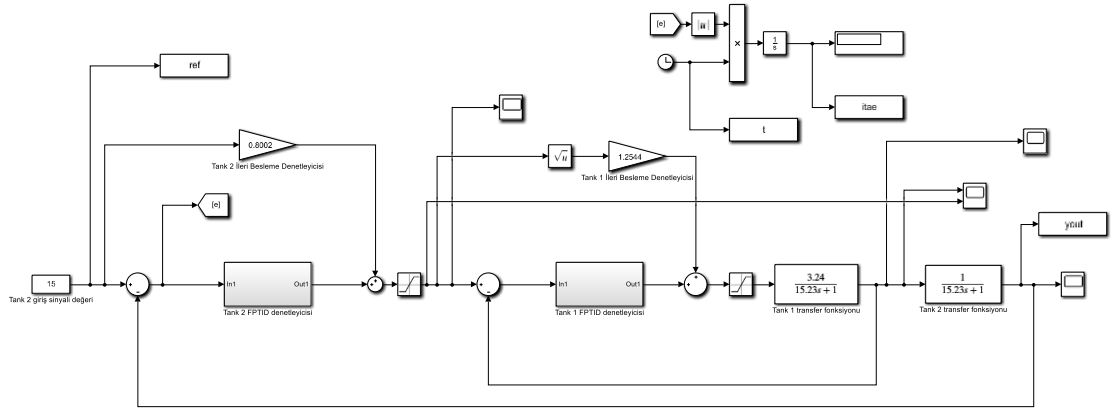
2.3. Tank 2 Düzeneğinin Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi

PI+FF denetleyicisi ve FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 2 düzeneğinin kapalı çevrim denetimi şemaları Şekil 17-18’de sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 17 ve 18’de gösterilen

şematik diyagramlar dikkate alınarak Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. Şekil 17 ve 18’de kaskad yapıda PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerinin olduğu görülmektedir. Burada iç döngüde PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileri tank 1 düzeneği için kullanılan denetleyicileri belirtmektedir. Dış döngüdeki denetleyiciler ise tank 2 düzeneğini kontrol etmek için kullanılmıştır. İç döngüdeki tank 1 düzeneğini kontrol etmek için bulunan denetleyici parametre değerleri girildikten sonra dış döngüdeki denetleyici parametre değerleri sırasıyla optimize edilmiştir. Burada dikkat edilecek diğer önemli bir husus tank 1 sıvı seviyesinin dinamik etkileri tank 2 düzeneğine de etki etmesidir. Tank 2’nin giriş sinyali değeri 15 cm ve örnekleme zamanı ise 1 milisaniye olarak belirlenmiştir. Denetleyici sinyalinin çıkışı ise gerçek zamanlı uygulamada kullanılan tank 1’deki sıvı seviye aralığı dikkate alınmış olup 0-25 cm aralığında satürasyon değeri konulmuştur.



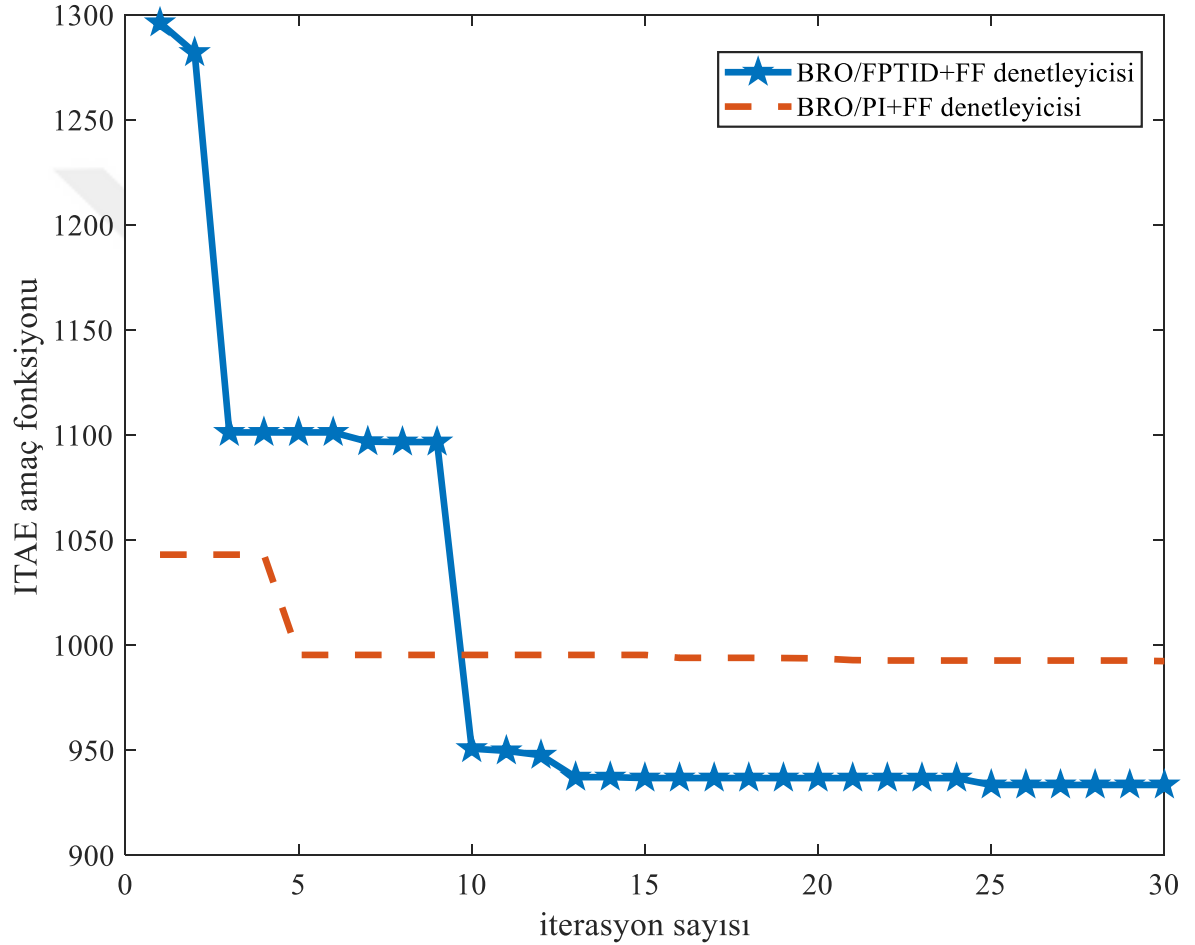
Şekil 17. PI+FF denetleyicisine sahip tank 2 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi



Şekil 18. FPTID+FF denetleyicisine sahip tank 2 düzeneğinin Matlab/Simulink ortamında modellenmesi

2.3.1. Tank 2 Düzenneğinin Yakınsama Eğrisi Analizi

İkili tank sıvı seviye sisteminin tank 2 düzenneği içinde önerilen BRO tabanlı FPTID+FF ve önerilen BRO tabanlı PI+FF denetleyicilerinin yakınsama eğrileri Şekil 19’da gösterilmiştir. BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisinin önerilen PI+FF denetleyicisine göre daha düşük ITAE amaç fonksiyonuna sahip olduğu Şekil 19’da görülmektedir.

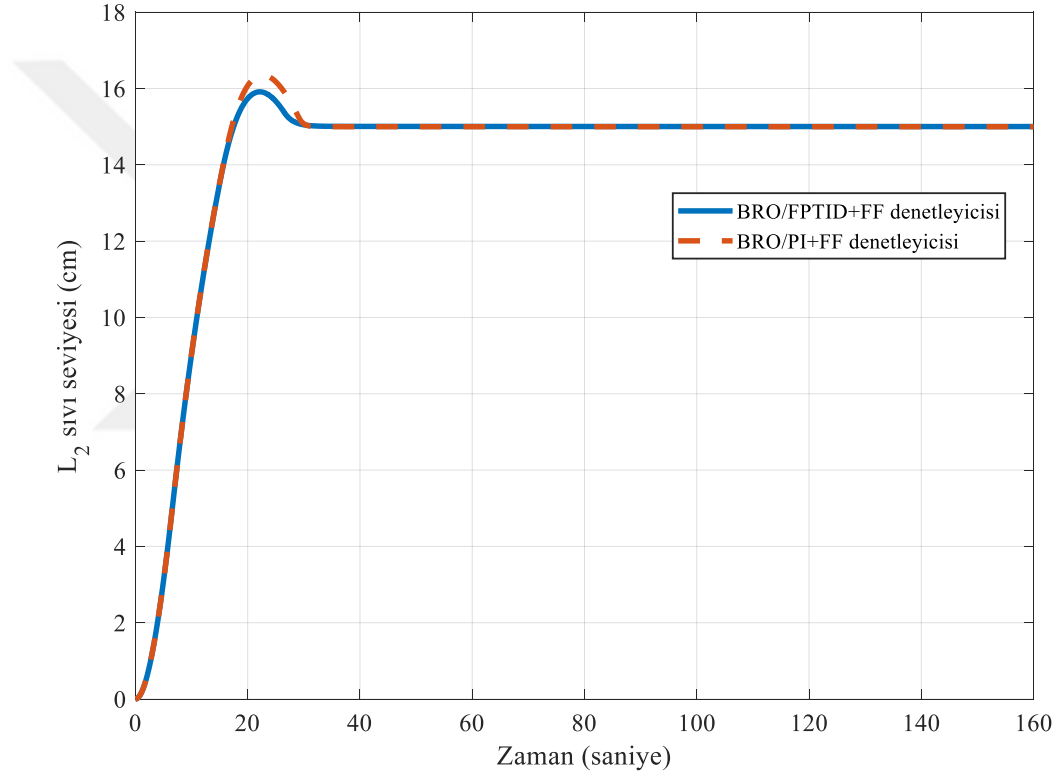


Şekil 19. Tank 2 düzenneği için önerilen denetleyicilerin yakınsama eğrisi analizleri

BRO algoritması tank 2 düzenneği için tasarlanan her iki denetleyici içinde 3'er kez rastgele olarak çalıştırılmıştır. İki denetleyici içinde en düşük ITAE amaç fonksiyonuna karşılık gelen parametre değerleri alınmıştır. Tank 2 düzenneği için BRO/FPTID+FF denetleyicisinin parametre değerleri $K_{P_2} = 7.3459$, $K_{T_2} = 0.1192$, $n_2 = 9.3512$, $K_{I_2} = 3.4964$, $\lambda_2 = 0.9039$, $K_{D_2} = 0.0475$, $\mu_2 = 0.3586$, $K_{FF_2} = 0.8002$ ve BRO/PI+FF parametre değerleri ise $K_{P_2} = 15.2865$, $K_{I_2} = 4.0705$, $K_{FF_2} = 0.8074$ olarak bulunmuştur.

2.3.2. Tank 2 Düzeneginin Birim Basamak Tepkisi Analizi

Tank 2 düzenegi için elde edilen PI+FF ve FPTID+FF parametre değerleri Şekil 17-18’de gösterilen MATLAB/Simulink modellemelerinde sırasıyla girilmiş olup sistemin çıkış tepki yanıtları Şekil 20’de gösterilmiştir. Her iki denetleyici içinde elde edilen maksimum aşım yüzdesi (M_p), yerleşme zamanı (t_s), yükselme zamanı (t_r) ve tepe değerleri (t_p) tablo 6’da verilmiştir. Tablo 6’da görüleceği üzere yükselme zamanı hariç diğer değerler bakımından FPTID+FF denetleyicisinin üstün bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

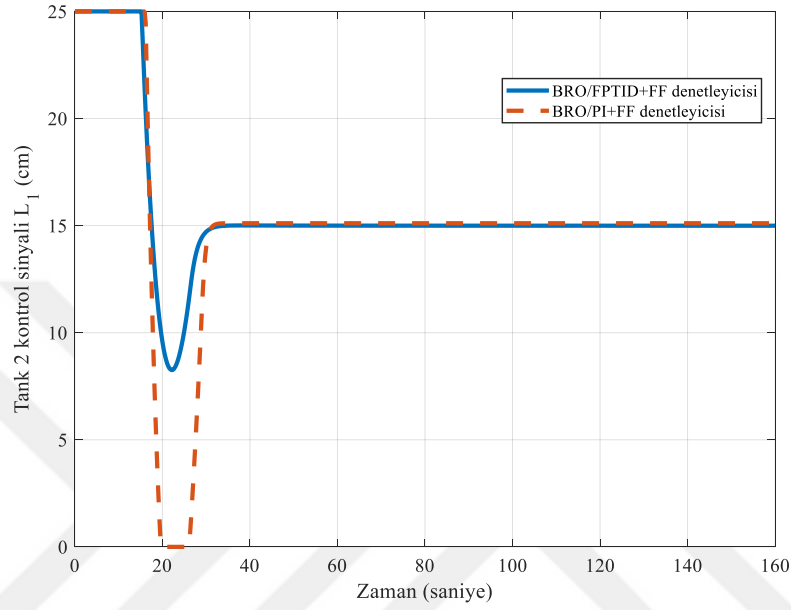


Şekil 20. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileri tarafından elde edilen tank 2 düzeneginin birim basamak tepkisi

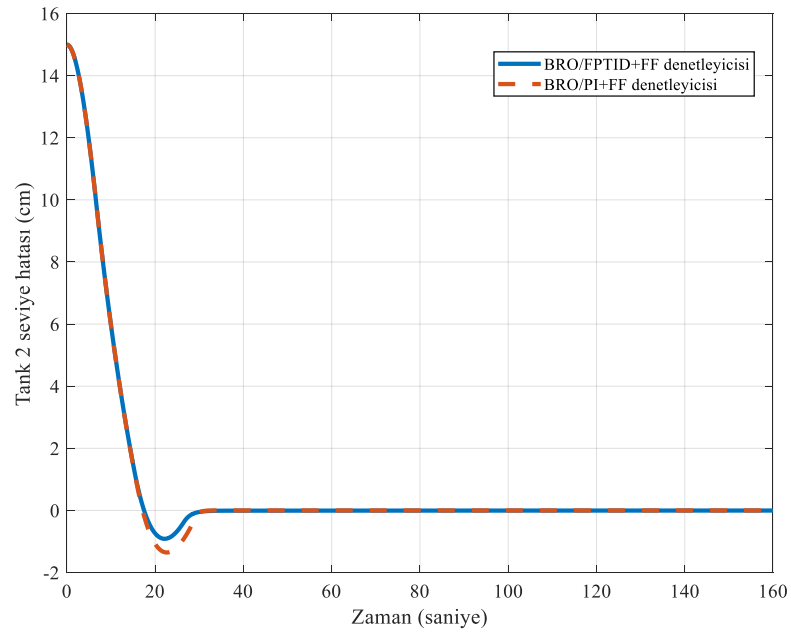
Tablo 6. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileriyle elde edilen tank 2 düzeneginin geçici karakteristik değerleri

Denetleyici	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm 2\%$)	t_r (sn) (0.10→0.90)	t_p (sn)
BRO/FPTID+FF	6.0892	26.8790	11.6310	22.1480
BRO/PI+FF	9.0252	28.9030	11.6050	22.6490

Şekil 21’de ise önerilen denetleyicilerin tank 2 düzeneklerine ait kontrol sinyalleri verilmiştir. Burada her iki denetleyiciye de bakıldığında FPTID+FF denetleyicisinin daha kısa sürede 15 cm değerine ulaştığı görülmektedir. Yani FPTID+FF denetleyicisi PI+FF denetleyicisine göre daha kararlıdır.



Şekil 21. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin kontrol sinyali

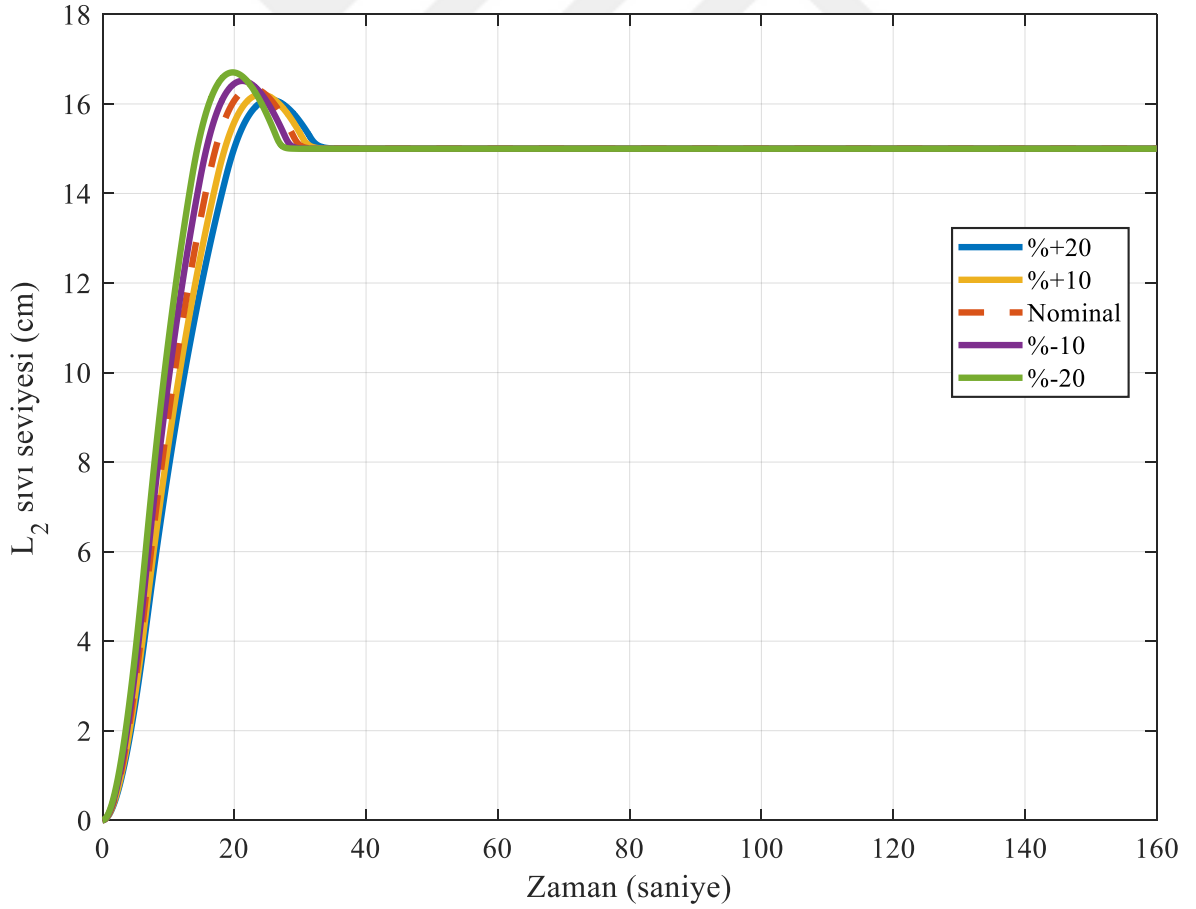


Şekil 22. PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin hata sinyali

Şekil 22’de önerilen denetleyicilere sahip tank 2 düzeneğinin hata sinyalleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre sıfır değerine daha kısa sürede ulaştığı görülmektedir.

2.3.3. Tank 2 Düzeneği İçin Gürbüzlük Analizi

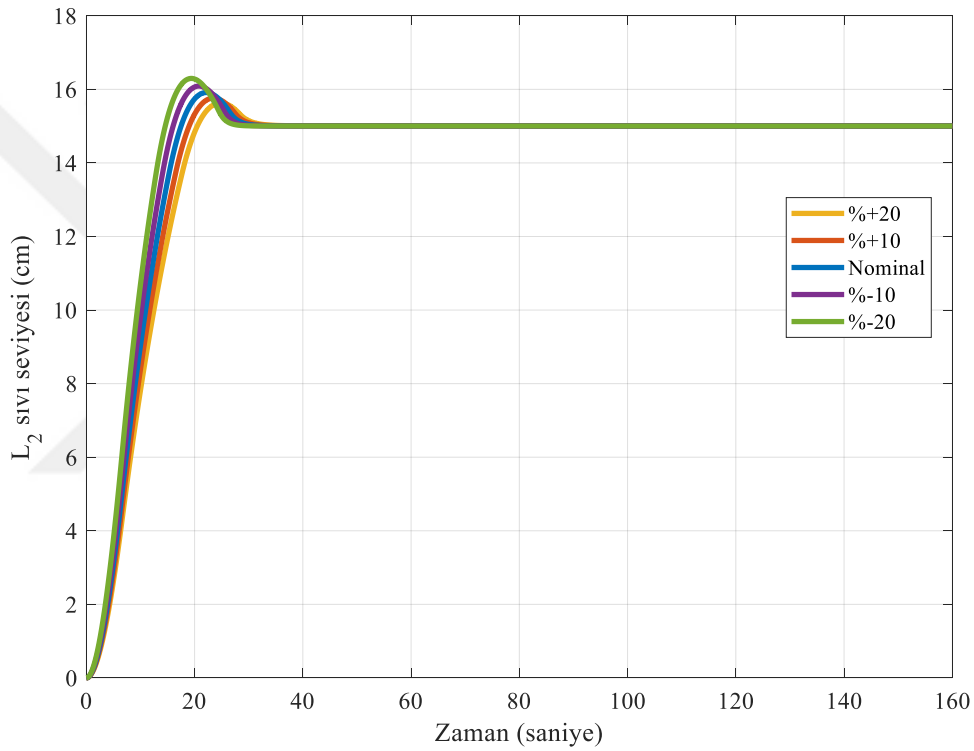
Bu bölümde de tank 2 düzeneği için gürbüzlük analizi yapılmış olup bu analiz yapılırken tank 1 düzeneğinin parametre değerleri sabit tutulurken tank 2 düzeneğinin τ_2 değeri $\%+20$ ile $\%-20$ arasında değiştirilmiştir. τ_2 parametre değişimine karşın PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine ait geçici yanıt karakteristik değerleri tablo 7-8’de sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca PI+FF ve FPTID+FF denetleyicilerine sahip tank 2 düzeneğinin sıvı seviye tepkileri Şekil 23-24’te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 23. PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için birim basamak tepkisi

Tablo 7. BRO/PI+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları

Model Parametresi	Değişim Oranı (%)	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm 2\%$)	t_r (sn) (0.10 $\rightarrow$ 0.90)	t_p (sn)
τ_2	% +20	7.3013	31.3570	13.6200	25.4660
	% +10	8.1024	30.1460	12.6090	24.0650
	% -10	10.1000	27.6250	10.6120	21.2170
	% -20	11.3689	26.3030	9.6320	19.7620



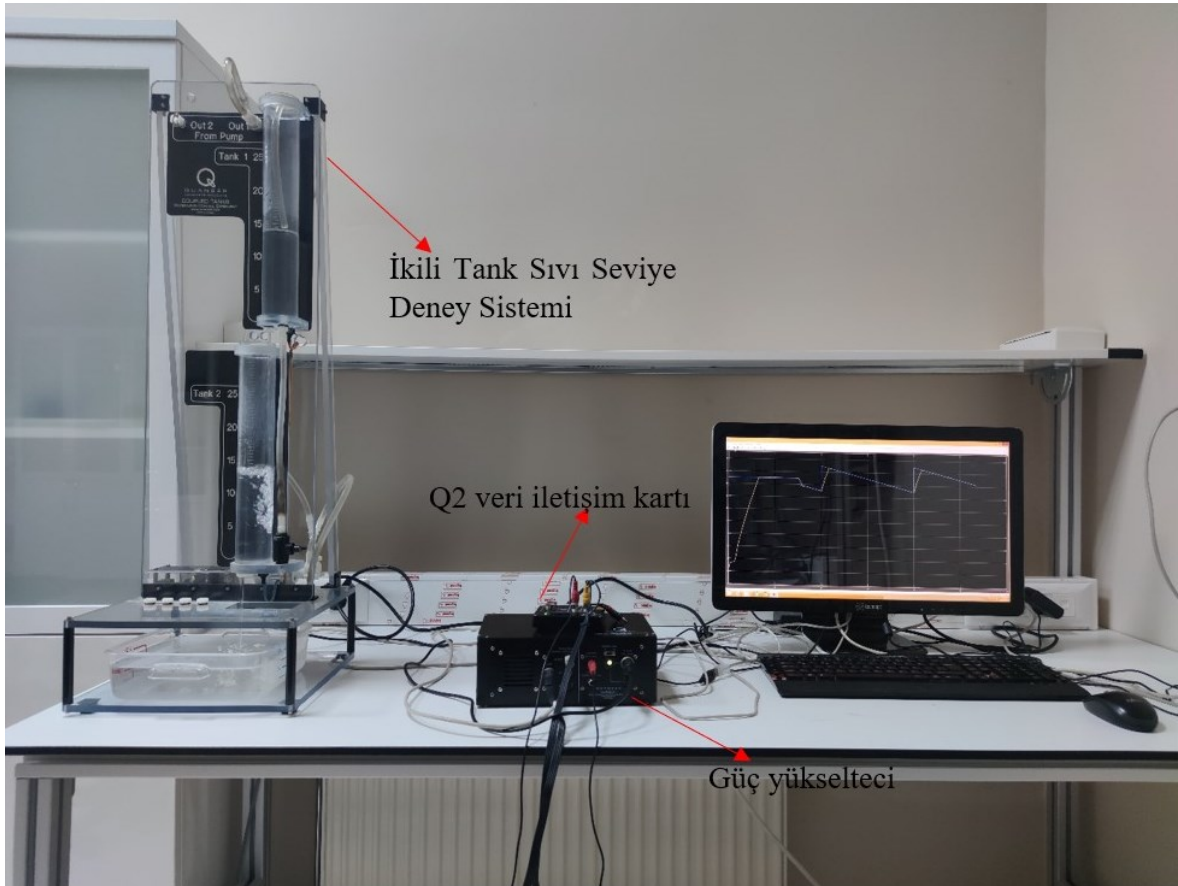
Şekil 24. FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için birim basamak tepkisi

Tablo 8. BRO/FPTID+FF denetleyicisiyle tasarlanan tank 2 düzeneğinin τ_2 değişimi için gürbüzlük analizi sonuçları

Model Parametresi	Değişim Oranı (%)	M_p (%)	t_s (sn) ($\pm 2\%$)	t_r (sn) (0.10 $\rightarrow$ 0.90)	t_p (sn)
τ_2	% +20	4.2056	28.5370	13.6570	24.8240
	% +10	5.0812	27.7530	12.6400	23.4940
	% -10	7.2627	25.9230	10.6320	20.7830
	% -20	8.6468	24.8870	9.6460	19.3950

2.4. Deneysel Sonuçlar

PI+FF ve FPTID+FF denetleyicileri gerçek zamanlı olarak her iki tank düzeneği içinde ele alınmıştır. İkili tank sisteminin deneysel kurulumu Şekil 25’te verilmiştir. Denetleyiciler Matlab/Simulink ortamında modellendikten sonra bilgisayar ile ikili tank sisteminin haberleşmesi için Q2 veri iletişim kartı kullanılmıştır. Ayrıca ikili tank sistemindeki pompa motorunun akım konusunda yetersiz kalmasından dolayı güç amplifikatörü kullanılarak pompa motorunun akımı üç kat yükseltilmiştir. İkili tank sistemindeki deneysel sonuçlarda örnekleme zamanı 1 milisaniye olarak alınmıştır.

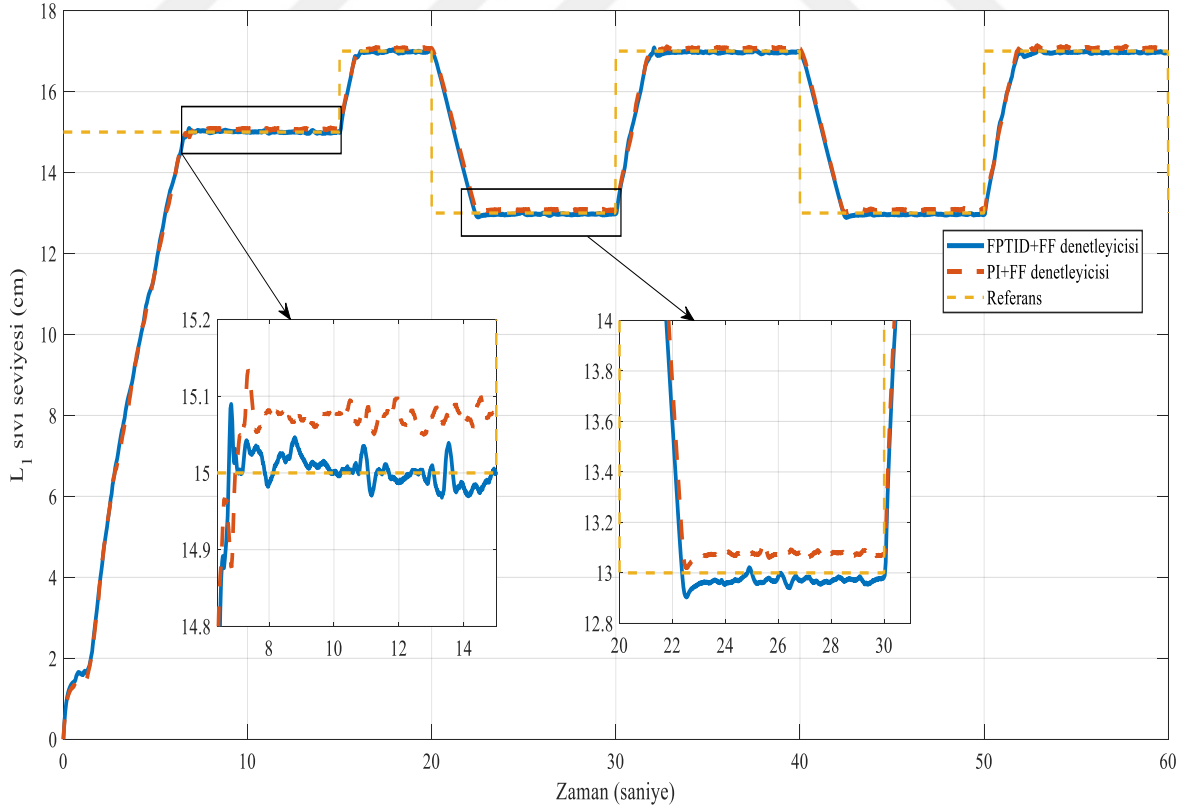


Şekil 25. İkili Tank Sisteminin Deneysel Kurulumu

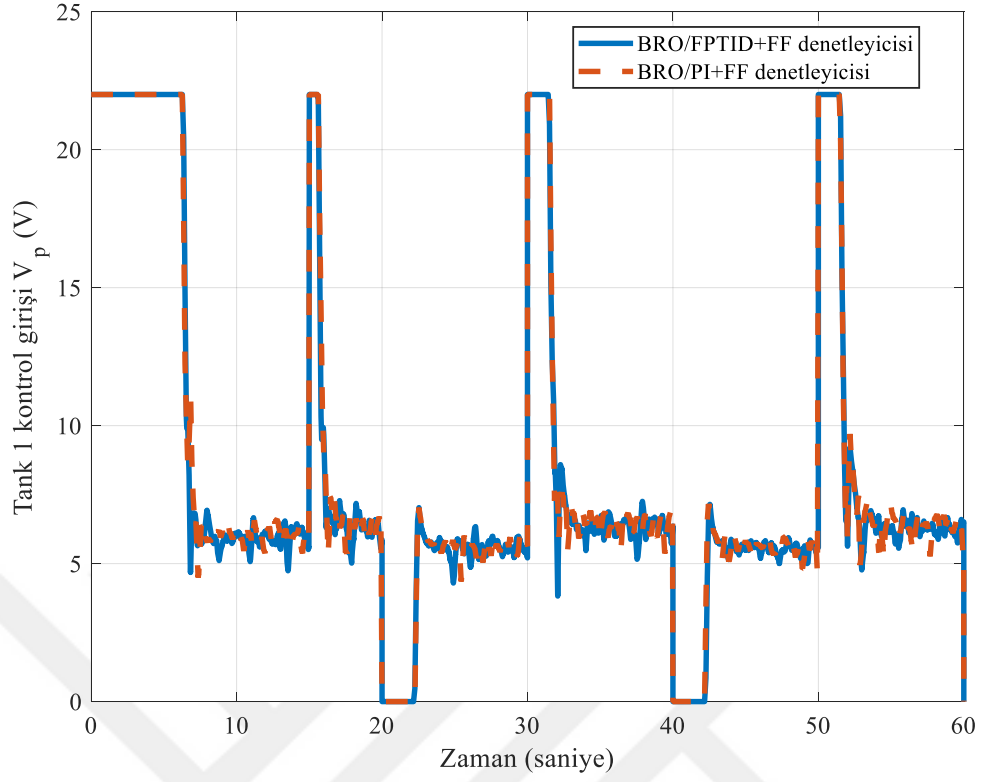
2.4.1. Tank 1 Düzeneği İçin Gerçek Zamanlı Sonuçlar

Sabit + kare ve sabit + testere sırasıyla tank 1 düzeneği için referans girişleri olarak verilmiş olup her iki denetleyicinin de performans karşılaştırması yapılmıştır. Sabit + kare

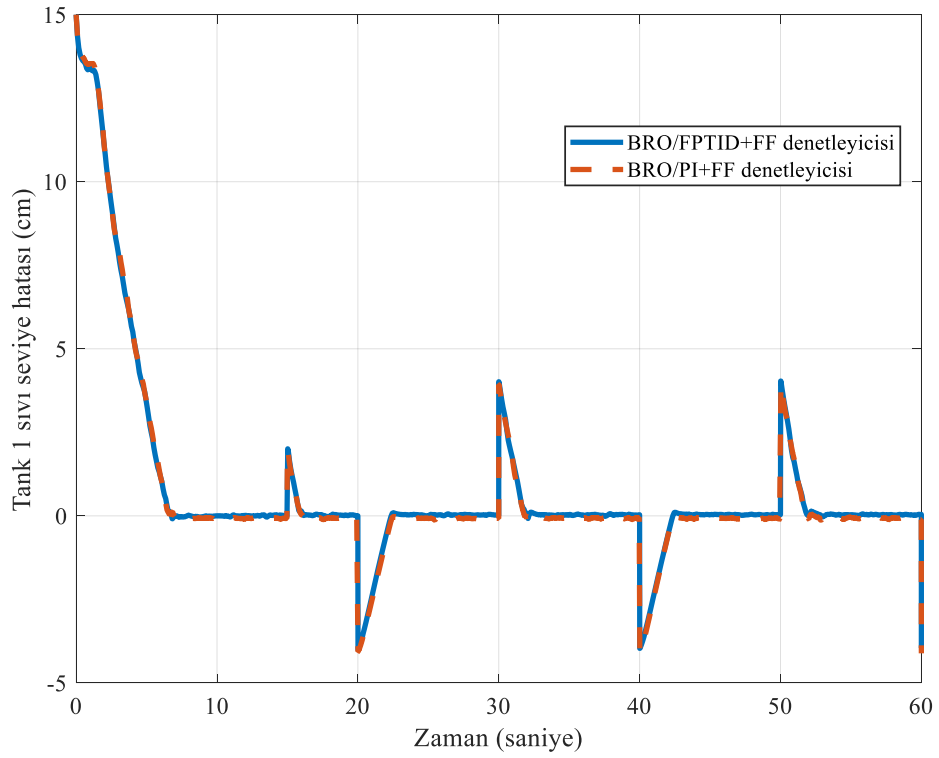
referans girişine karşı elde edilen yörünge izleme yanıtları, kontrol sinyalleri ve yörünge izleme hataları sırasıyla Şekil 26-28’de verilmiştir. Şekil 29-31’de ise sabit + testere referans girişine karşı elde edilen yörünge izleme yanıtları, kontrol sinyalleri ve yörünge izleme hataları sırasıyla verilmiştir. Şekil 26 ve 29’dan da görüleceği üzere FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre referans takiplerinde daha başarılı ve kararlı bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. Ayrıca Tank 1 düzeneği için önerilen FPTID+FF denetleyicisinin üstün bir performans gösterdiğini doğrulayabilmek adına ISE, IAE, ITAE ve ITSE hata tabanlı metrik değerlerinden yararlanılmıştır ve tablo 8’de listelenmiştir. Sabit + kare dalga referans sinyali takibi boyunca FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre ISE değerini %1.71, IAE değerini %3.51, ITAE değerini %7.59 ve ITSE değerini %2.39’luk bir iyileştirme sağlamıştır. Sabit + testere dalga referans sinyali takibi boyunca ise FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre ISE değerini %2.4, IAE değerini %8.33, ITAE değerini %32.11 ve ITSE değerini %3.04’lük bir iyileştirme yapmıştır. Bu da tank 1 düzeneği için önerilen FPTID+FF denetleyicisinin üstünlüğünü göstermektedir.



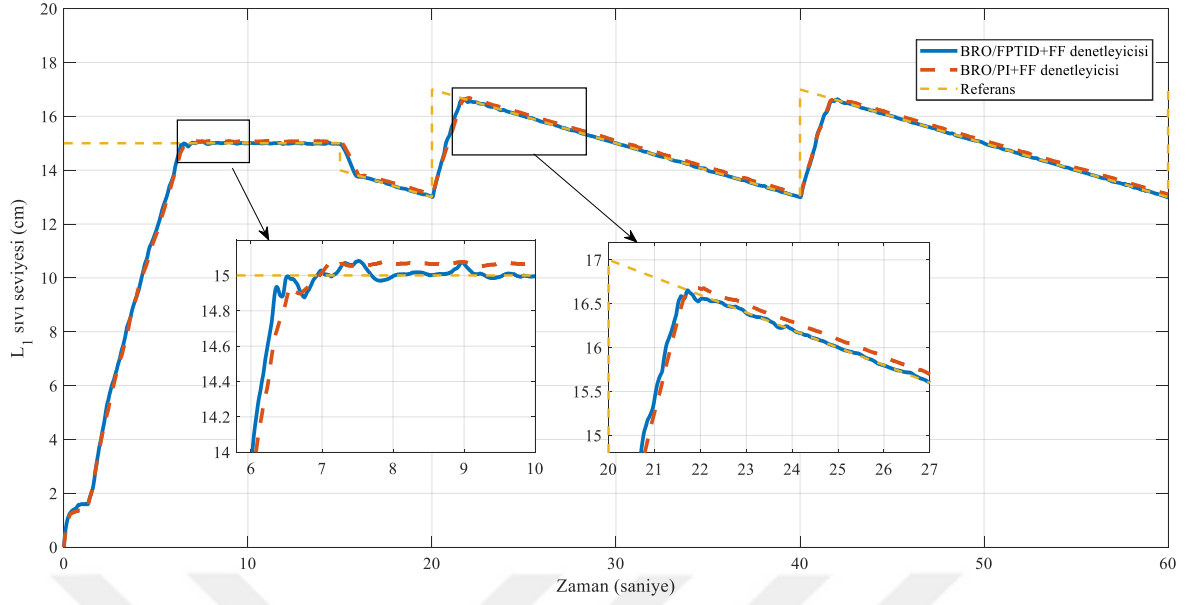
Şekil 26. Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları



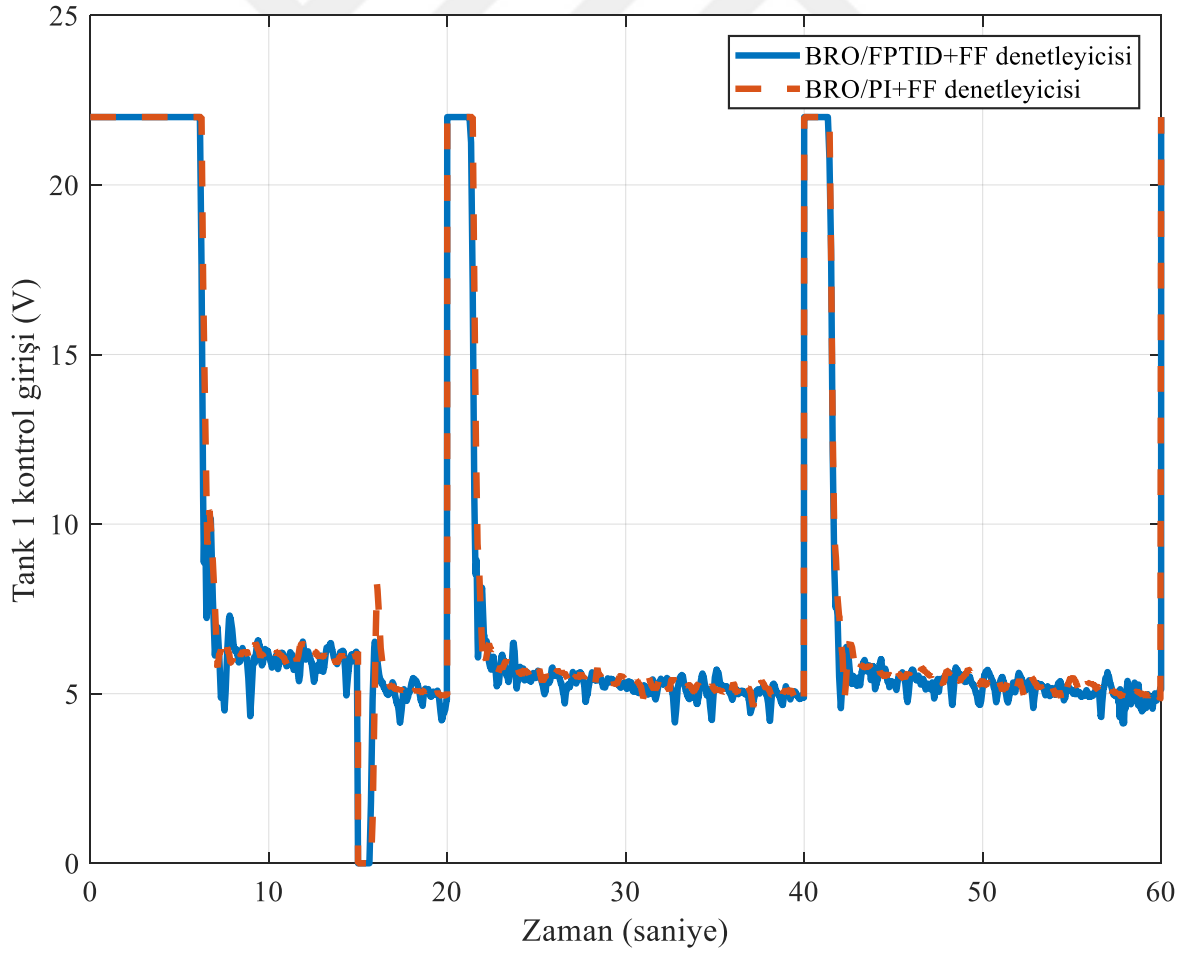
Şekil 27. Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri



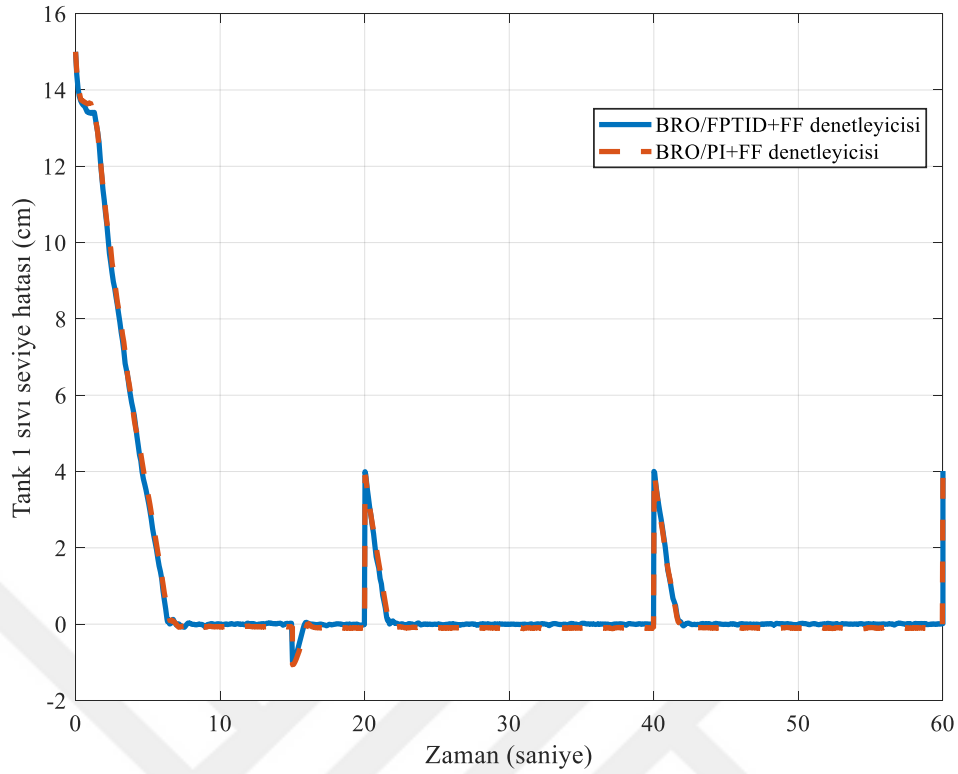
Şekil 28. Tank 1 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları



Şekil 29. Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları



Şekil 30. Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri



Şekil 31. Tank 1 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları

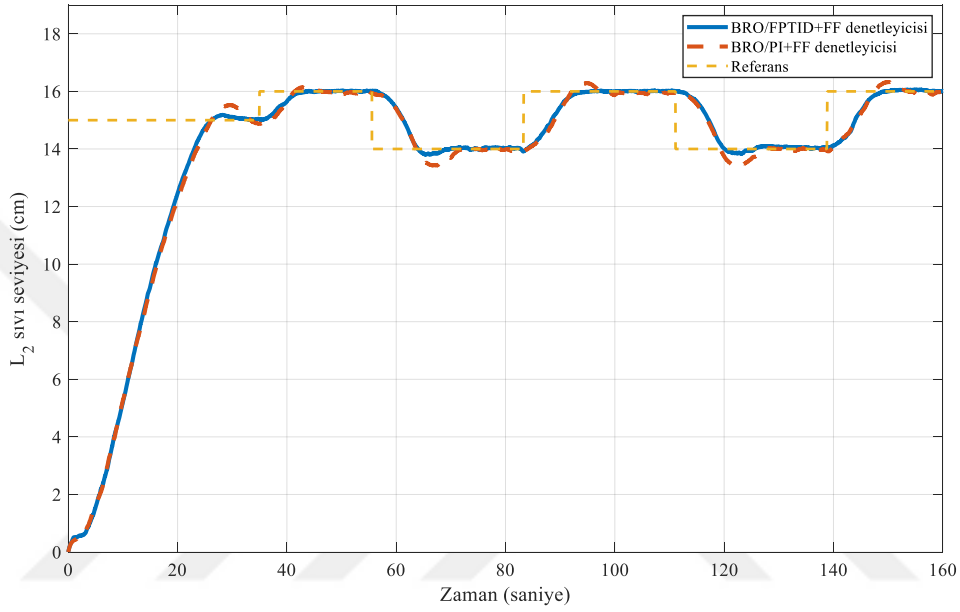
Tablo 9. Tank 1 düzeneği için önerilen denetleyicilerin gerçek zamanlı olarak performans metrislerinin analiz değerleri

Giriş Sinyali Türleri	Denetleyici Türleri	ISE Değeri	IAE Değeri	ITSE Değeri	ITAE Değeri
Sabit + kare dalga referansı	BRO/FPTID+FF	553.5477	68.1707	2383.7917	747.8296
	BRO/PI+FF	563.1825	70.6470	2442.1063	809.2269
Sabit + testere dalga referansı	BRO/FPTID+FF	526.8378	56.5457	1331.6700	320.1403
	BRO/PI+FF	539.7743	61.6819	1373.4890	471.5488

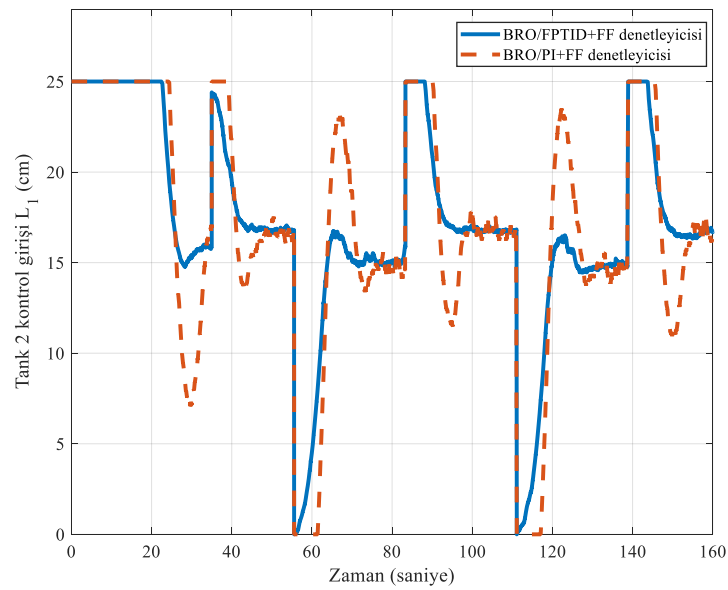
2.4.2. Tank 2 Düzeneği İçin Gerçek Zamanlı Sonuçlar

Sabit + kare ve sabit + testere sırasıyla tank 2 düzeneği içinde referans girişleri olarak verilmiş olup her iki denetleyicinin de yine performans karşılaştırması yapılmıştır. Sabit + kare referans girişine karşı elde edilen yörünge izleme yanıtları, kontrol sinyalleri ve yörünge izleme hataları sırasıyla Şekil 32-34'te verilmiştir. Şekil 35-37'de ise sabit + testere referans girişine karşı elde edilen yörünge izleme yanıtları, kontrol sinyalleri ve yörünge izleme hataları sırasıyla verilmiştir. Şekil 32 ve 35'ten de görüleceği üzere FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre ani referans değişimlerinde daha başarılıdır.

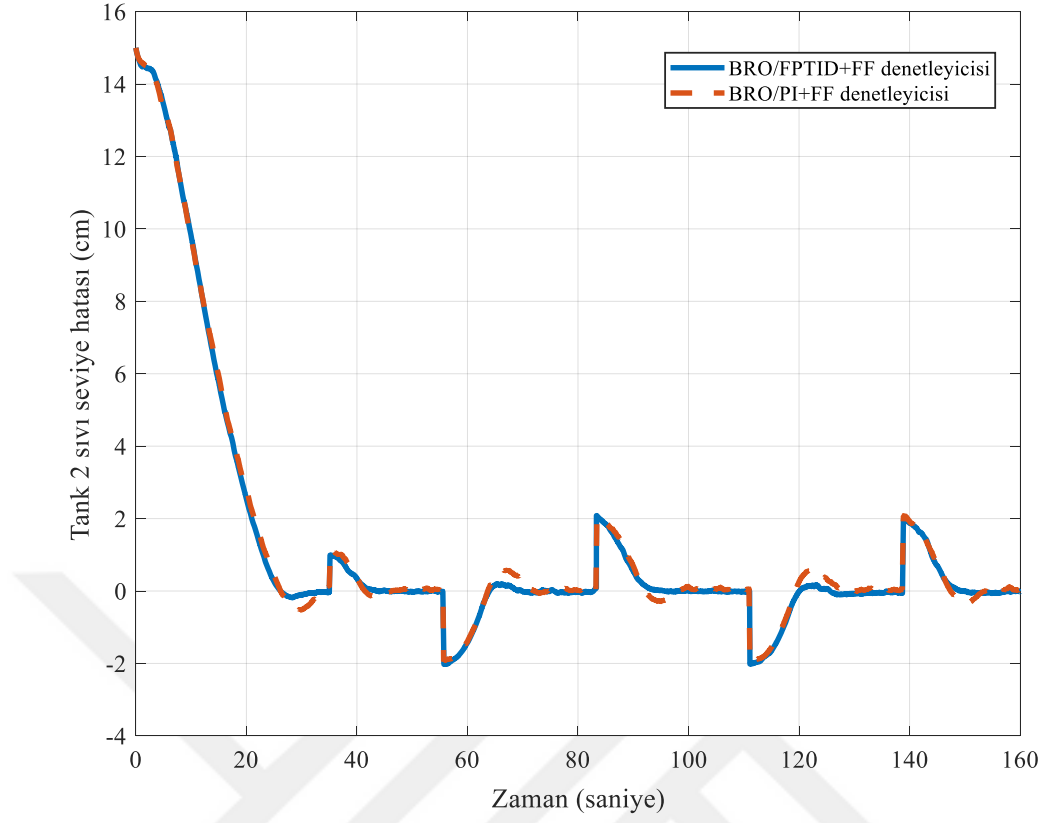
Sabit + kare dalga referansı boyunca performans metrikleri incelendiğinde FPTID+FF denetleyicisi PI+FF denetleyicisine göre ISE değerini %0.79, IAE değerini %4.47, ITAE değerini %11.24 ve ITSE değerini %2.77'lik bir iyileştirme sağlamıştır. Sabit + testere dalga referansı boyunca ise FPTID+FF denetleyicisinin PI+FF denetleyicisine göre ISE değerini %0.25, IAE değerini %2,89, ITAE değerini %13,17 ve ITSE değerini %0.18'lik bir iyileştirme yapmıştır.



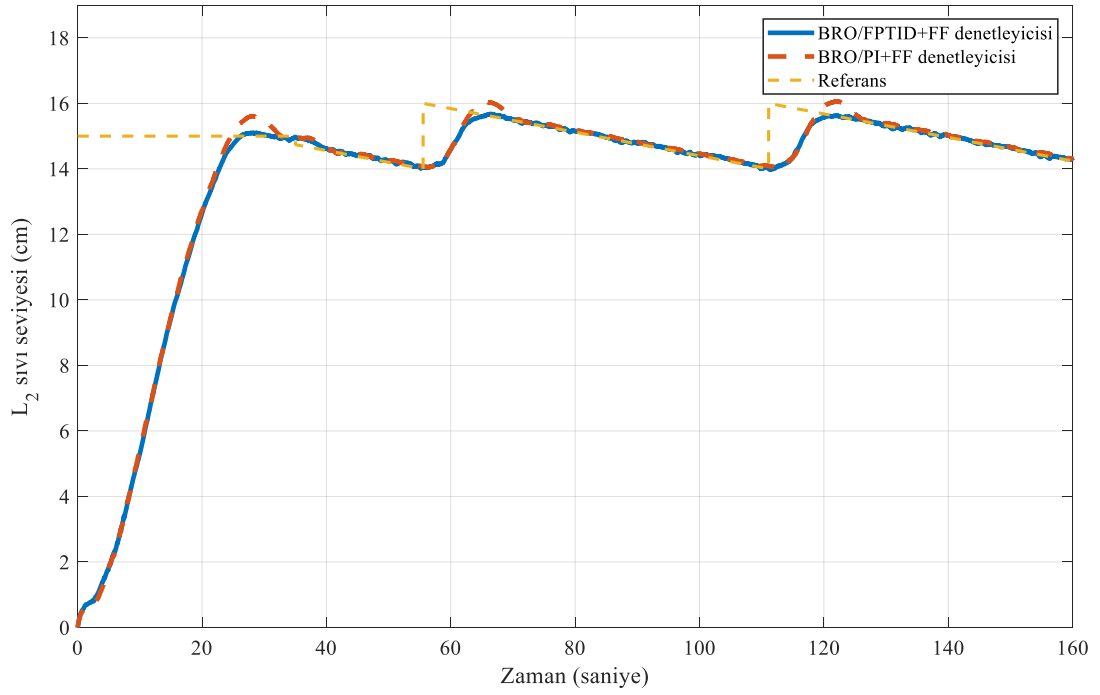
Şekil 32. Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları



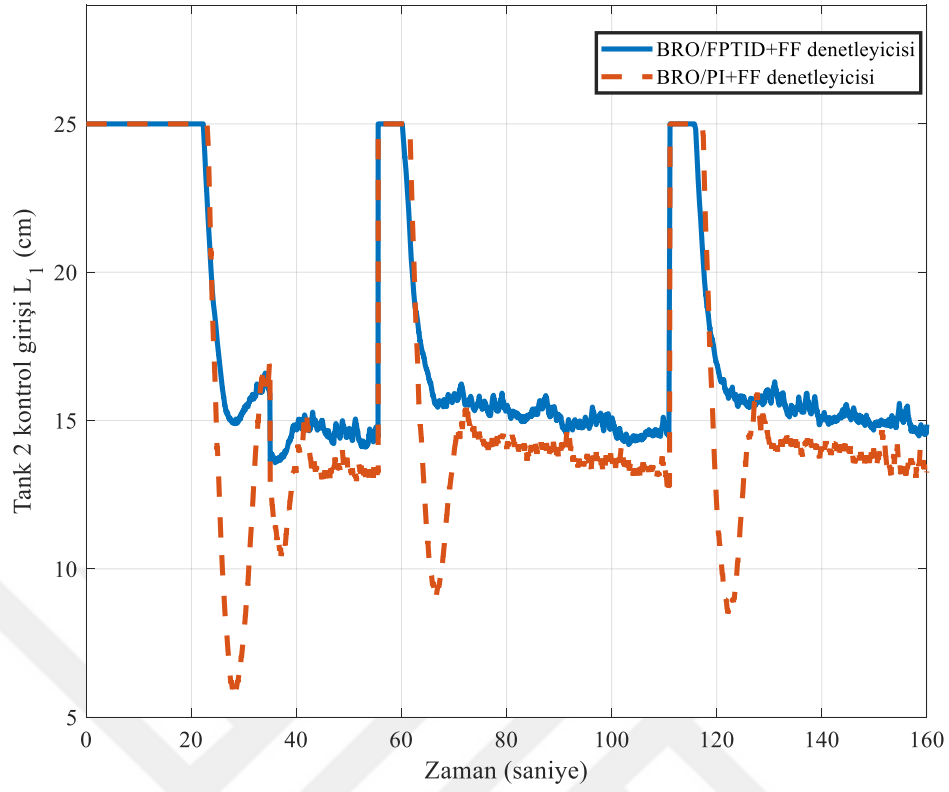
Şekil 33. Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri



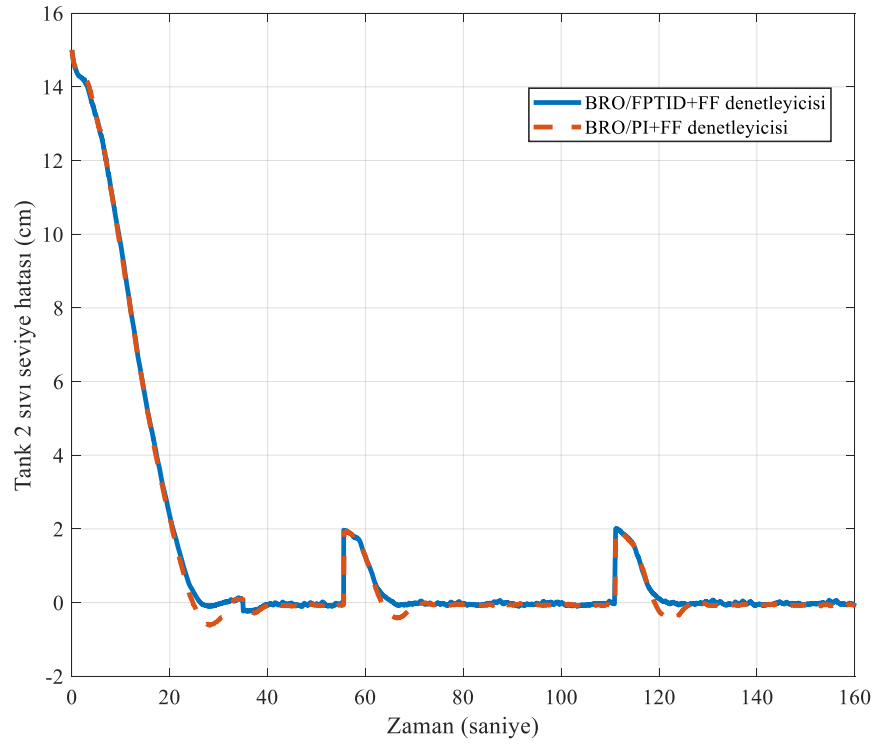
Şekil 34. Tank 2 için sabit + kare referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları



Şekil 35. Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme yanıtları



Şekil 36. Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin kontrol sinyalleri



Şekil 37. Tank 2 için sabit + testere referansına dayalı olarak denetleyicilerin yörünge izleme hataları

Tablo 10. Tank 2 düzeneği için önerilen denetleyicilerin gerçek zamanlı olarak performans metrislerinin analiz değerleri

Giriş Sinyali Türleri	Denetleyici Türleri	ISE Değeri	IAE Değeri	ITSE Değeri	ITAE Değeri
Sabit + kare dalga referansı	BRO/FPTID+FF	2187.7814	246.6657	19651.0006	6393.0491
	BRO/PI+FF	2205.1728	258.2113	20209.9984	7202.4786
Sabit + testere dalga referansı	BRO/FPTID+FF	2076.9412	217.2400	15067.7400	3735.6576
	BRO/PI+FF	2082.1533	223.7139	15096.3142	4302.1293

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında süreç endüstrisinde sıklıkla kullanan ikili tank sistemindeki sıvı seviyesini kararlı bir şekilde dengede tutabilmek için BRO tabanlı FPTID+FF ve BRO tabanlı PI+FF denetleyicileri önerilmiş olup bu denetleyicilerin tasarımı Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önerilen denetleyiciler hem simülasyon sonuçları ile hem de gerçek zamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada hem simülasyonda hem de uygulamada ikili tank sistemindeki iki farklı düzenek olan tank 1 ve tank 2 düzenekleri kullanılmıştır.

Elde edilen simülasyon ve gerçek zamanlı sonuçlara göre BRO tabanlı FPTID+FF denetleyicisi hem tank 1 düzeneği hem de tank 2 düzeneğinde meydana gelen ani sıvı değişimlerine karşı daha kararlı ve iyi sonuçlar vermektedir.

4. ÖNERİLER

İleriki çalışmalarda sistemin performansını iyileştirmek adına BRO algoritması geliştirilerek FPTID+FF denetleyicisinin parametre ayarlanmasında kullanılıp daha iyi sistem tepkileri elde edilebilir. Ayrıca sistemin kararlılığını arttırmak adına kesir yüksek dereceli diferansiyel geri besleme ile yüksek dereceli diferansiyel geri besleme denetleyicilerinin tasarımları ikili tank sıvı seviye sistemine uygulanabilir.



5. KAYNAKLAR

1. Dumlu, A. ve Ayten, K. K., A Combined Control Approach for Industrial Process Systems using Feed Forward and Adaptive Action Based on Second Order Sliding Mode Controller Design, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 41, 4 (2019) 1160-1171.
2. Ayten, K. K., Dumlu, A. ve Kaleli, A., Real-Time Implementation of Self Tuning Regulator Control Technique for Coupled Tank Industrial Process System, Journal of Systems and Control Engineering, 232, 8 (2018) 1039-1052.
3. Dumlu, A. ve Ayten, K. K., Real Time Fractional Order Control Technique for Coupled Tank Liquid Level Control Process, International Journal of Advanced Applied Science, 4, 11 (2017) 127-132.
4. Khalkhali A., İkili Tank Sisteminin Genetik Algoritma ile Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2016.
5. Yılmaz, M., Can K. ve Başçı, A., PI Feed Forward Controller Tuning Based on Genetic Algorithm for Liquid Level Control of Coupled-Tank System, Journal of the Institute of Science and Technology, 11, 2 (2021) 1014-1026.
6. Musmade, B. B. ve Patre, B. M., Feedforward Plus Sliding Mode Controller Design with Experimental Application of Coupled Tank System, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 35, 8 (2013) 1058-1067.
7. Sekban, H. T., İkili Tank Sisteminde Sıvı Seviye Kontrolünün Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü ile Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2017.
8. Başçı, A. ve Derdiyok, A. Implementation of An Adaptive Fuzzy Compensator for Coupled Tank Liquid Level Control System, Measurement, 91 (2016) 12-18.
9. Sekban, H. T., Can, K. ve Başçı, A., İkili Tank Sıvı-Seviye Sisteminin PI ve Geri Adımlamalı Kontrol Yöntemleri ile Kontrolü ve Performans Analizi, International Conference on Electrical and Electronic Engineers, Aralık 2016, Erzurum, Bildiriler Kitabı, 272-277.
10. Esmaeili, J. S. ve Başçı, A., LMI-based H2 Control of Vertical Nonlinear Coupled-tank System, International Conference on Control Automation and Diagnosis, Temmuz 2019, Grenoble, Bildiriler Kitabı, 1-7.
11. Keerthana, P. G. G. ve Gnanasoundharam, J., Comparison of PI Controller Model Reference Adaptive Controller and Fuzzy Logic Controller for Coupled Tank System, Indian Journal of Science and Technology, 9,12 (2016), 1-5.

12. Barat, P. ve Mandal, S., Robust Control of Coupled-Tank System using Uncertainty and Disturbance Estimator, IEEE Second International Conference on Control Measurement and Instrumentation, Ocak 2021, Kolkata, Bildiriler Kitabı, 128-132.
13. Goyal, J. K., Aggarwal, S., Ghosh, S., Kamal, S. ve Vuyyuru, U., R_{∞} Based PI Controller Design for Coupled Tank System through Polytopic Modeling, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Ocak 2019, Lisbon, Bildiriler Kitabı, 383-388
14. Derdiyok, A., ve Başçı, A., The Application of Chattering Free Sliding Mode Controller in Coupled Tank Liquid-Level Control System, Korean Journal of Chemical Engineering, 30,3 (2013) 540-545.
15. Valand, P. A., Patel, A. ve Solanki, H., An Analysis of Self-Tuning Fuzzy PID IMC for Coupled Water Two Tank System, International Journal of Engineering Development and Research, (2014).
16. Pan, H., Wong, H., Kapila, V. ve Queiroz, M. S., Experimental Validation of a Nonlinear Backstepping Liquid Level Controller for a State Coupled Two Tank System. Control Engineering Practice, 13,1 (2005), 27-40.
17. Gulzar, M. M., Munawar, M., Dewan, Z., Salman, M. ve Iqbal, S., Level Control of Coupled Conical Tank System using Adaptive Model Predictive Controller, 17th International Conference on Smart Communities Improving Quality of Life Using ICT IoT and AI, Aralık 2020, Charlotte, Bildiriler Kitabı, 236-240.
18. Gopiseti, A. R., Anusha, K., Reddy, B. A. ve Kumar, B. P., Performance Evaluation of Second Order Sliding Mode Control Strategies for a Coupled Tank System, International Conference on Current Trends Towards Converging Technologies, Mart 2018, Coimbatore, Bildiriler Kitabı, 1-7.
19. Selamat, N. A., Daud, F. S., Jaafar, H. I. ve Shamsudin, N. H. Comparison of LQR and PID controller tuning using PSO for Coupled Tank System, 11th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, Mart 2015, Kuala Lumpur, Bildiriler Kitabı, 46-51.
20. Katal, N., Kumar, P. ve Narayan, S., Optimal PID Controller for Coupled-Tank Liquid-Level Control System using Bat Algorithm. International Conference on Power, Control and Embedded Systems, Aralık 2014, Allahabad, Bildiriler Kitabı, 1-4
21. Singh, S. K., Katal, N. ve Modani, S. G., Multi-Objective Optimization of PID Controller for Coupled Tank Liquid Level Control System using Genetic Algorithm, Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving, Aralık 2012, New Delhi, Bildiriler Kitabı, 59-66.
22. Ayten, K. K. ve Dumlu, A., Implementation of a PID Type Sliding Mode Controller Design Based on Fractional Order Calculus for Industrial Process System, Elektronika ir Elektrotehnika, 27,6 (2021), 4-10.

23. Rahkar F. T., Battle Royale Optimization Algorithm. Neural Computing and Applications, 33 (2021) 1139-1157.
24. Sahin, A. K., Tas, T., Bertug, E. ve Ayas, M. S., Metaheuristic Algorithm Based PI Controller Design for Linearized Quadruple-Tank Process, 3rd International Congress on Human Computer Interaction Optimization and Robotic Applications, Haziran 2021, Ankara, Bildiriler Kitabı, 1-6.
25. Şahin, A. K., Akgül, T., ve Çakır, O., Battle Royale Optimization Based PID Controller Design for Vehicle Cruise Control System, 5th International Conference on Advances in Natural and Applied Science, Eylül 2021, Ağrı, Bildiriler Kitabı, 181-190
26. Aström, K. J. ve Hagglund, T., The Future of PID Control, Control Engineering Practice, 9,11 (2001) 1163-1175.
27. Podlubny, I., Fractional Differential Equations an Introduction to Fractional Derivatives Fractional Differential Equations to Methods of Their Solution and Some of Their Applications, First Edition, Academic Press, California, 1999.
28. Şahin, E., Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity, IEEE Access, 8 (2020) 12327-12342.
29. Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B. ve Nanot, F. M., Frequency-Band Complex Non Integer Differentiator Characterization and Synthesis, IEEE Transactions on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications, 47,1 (2000) 25-39.
30. Oustaloup, A., Moreau, X. ve Nouillant, M., The Crone Suspension, Control Engineering Practice, 4,8 (1996) 1101-1108.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2019 yılında da Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi İşletme Bölümünden mezun oldu. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Elektrik Mühendisliği Alanında yüksek lisans yapmaktadır. 2019 Aralık ayından itibaren Erzurum Teknik Üniversitesinde Elektronik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Kontrol Kumanda Sistemleri Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dil olarak iyi seviyede İngilizce bilmektedir. Hobileri ise yabancı hayat belgeselleri izlemek, doğa yürüyüşleri yapmak ve masa tenisi oynamaktır.

Diğer Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Şahin, A. K., Akyazı, Ö., Şahin, E. ve Çakır, O., DC Motorun Hız Kontrolü İçin Meta-Sezgisel Algoritma Tabanlı PID Denetleyici Tasarımı, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10, 2 (2021) 533-549.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

1. Şahin, A. K., Taş, T., Bertuğ, E. ve Ayas, M. S., Metaheuristic Algorithm Based PI Controller Design for Linearized Quadruple-Tank Process, 3rd International Congress on Human-Computer Interaction Optimization and Robotic Applications, Haziran 2021, Bildiriler Kitabı: 1-6.
2. Şahin, A. K., Akgül, T., ve Çakır, O., Battle Royale Optimization based PID Controller Design for Vehicle Cruise Control System, 5th International Conference on Advances in Natural and Applied Science, Eylül 2021, Ağrı, Bildiriler Kitabı: 181-190.
3. Çavdar, B., Dinçer, K., Şahin, A. K., Nuroğlu F. M., Farklı Penetrasyon Seviyelerine Sahip PV Santralin LVRT'ye Göre Frekansa Etkisi, Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi, 05-06 Kasım 2020, Şanlıurfa, Bildiriler Kitabı: 134.