

**İKİLİ TANK SİSTEMİNDE SIVI SEVİYE
KONTROLÜNÜN KESİR DERECELİ KAYAN
KİPLİ KONTROLÇÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Hayriye Tuğba SEKBAN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI**

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İKİLİ TANK SİSTEMİNDE SIVI SEVİYE KONTROLÜNÜN KESİR
DERECELİ KAYAN KIPLI KONTROLÇÜ İLE
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Hayriye Tuğba SEKBAN

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı**

ERZURUM

2017

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

İKİLİ TANK SİSTEMİNDE SIVI SEVİYE KONTROLÜNÜN KESİR
DERCELİ KAYAN KIPLI KONTROLÇÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Yrd. Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI danışmanlığında, Hayriye Tuğba SEKBAN tarafından hazırlanan bu çalışma 10/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı – Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ **(3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Birol SOYSAL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun **03./08./2017**... tarih ve **31./21**.....
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İKİLİ TANK SİSTEMİNDE SIVI SEVİYE KONTROLÜNÜN KESİR DERECELİ KAYAN KIPLI KONTROLCÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Hayriye Tuğba SEKBAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI

Bu çalışmada, endüstriyel prosesler de sıklıkla kullanılan, ikili tank sıvı seviye sisteminin matematiksel analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sistemin doğrusal olmayan yapısına uygun olarak tasarlanan kesir dereceli kayan kipli kontrolcü (KDKKK) ile sistemin gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiş ve kontrolcünün farklı referans girişlerine karşı verdiği tepkiler için performansı incelenmiştir.

Kayan kipli kontrolcü (KKK), doğrusal olmayan sistemlere rahatlıkla uygulanabiliyor olması, belirsizliklerden ve bozucu etkilerden etkilenmemesi gibi sahip olduğu avantajlardan dolayı günümüzde pek çok alanda kullanılmasıyla birlikte sistemlerde çattırtı meydana getirmesi KKK'nin sahip olduğu bir dezavantajdır. Bu çattırtı etkisi çeşitli metotlar kullanılarak azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir. Fakat bu işlemlerin uygulanması kontrolcünün bazı özelliklerinin kaybolmasına yol açabilmektedir. Hem kontrolcünün sağladığı avantajlardan maksimum seviyede yararlanmak hem de çattırtı etkisini minimum seviyelere indirmek amacıyla KKK, kesir dereceli olarak tasarlanmıştır.

2017, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: İkili Tank Sıvı Seviye Sistemi, Kayan Kipli Kontrol (KKK), Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrol (KDKKK)

ABSTRACT

Master Thesis

IMPLEMENTATION OF A FRACTIONAL ORDER SLIDING MODE CONTROLLER FOR COUPLED TANK LIQUID LEVEL CONTROL SYSTEM

Hayriye Tuğba SEKBAN

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronic Engineering
Department of Control and Automation

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Abdullah BAŞÇI

In this study, the mathematical analyze of a coupled tank liquid-level system which is widely used in industrial processes, has been investigated. Then, the real time liquid level control applications of the system has been realized by fractional order sliding mode controller (FOSMC) that is designed depending on the nonlinearity of the system also and the performance of the controller has been investigated for different reference signals.

Today, due to its advantages such as robustness to disturbances, designed and applied easily to the nonlinear systems, the SMC has been widely used in many research areas. On the other hand, the chattering is the most known disadvantages of the SMC. This unwanted movement can be reduced or eliminated by using some methods. However, while using such methods to overcome this unwanted movement, some useful properties of the controller can be lost. To design the controller effectively and to keep the chattering effect at minimum level, the SMC has been designed with fractional order instead of integer order.

2017, 62 pages

Keywords: Coupled Tank Liquid Level System, Sliding Mode Controller (SMC), Fractional Order Sliding Mode Controller (FOSMC).

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	15
3.1. Materyal.....	15
3.1.1. İkili tank sisteminin modeli	15
3.1.2. Tek tank modeli	15
3.1.3. İkili tank modeli	17
3.2. Yöntem	19
3.2.1. Kesir dereceli hesaplama.....	19
3.2.2. Kesir dereceli sistemlerin yaklaşıklıkları	22
3.2.3. Crone yaklaşımı (Oustaloup yaklaşımı)	22
3.2.4. Kesir dereceli kontrolcü	24
3.2.5. Kayan kipli kontrolcü	26
3.2.6. Kayan kipli kontrolcünün çalışma prensibi.....	27
3.2.7. Kayan kipli kontrolcünün tasarlanması	30
3.2.8. Kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı.....	32
3.2.8.a. Tank 1 için kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı	32
3.2.8.b. Tank 2 için kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı	36
3.2.9. Kararlılık analizi.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	42
4.1. Tek Tank Konfigürasyonu için Klasik PI Kontrolcü ve Kesir Dereceli PI Kontrolcüye Ait Bulgular	42
4.2. Tek Tank Konfigürasyonu İçin Kayan Kipli Kontrolcü ve Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü ile İlgili Bulgular	47

4.3. İkili Tank Konfigürasyonu İçin Klasik PI Kontrolcü, Kesir Dereceli PI Kontrolcü, Kayan Kipli Kontrolcü ve Kesir Dereceden Kayan Kipli Kontrolcülere Ait Bulgular.....	52
5. SONUÇ	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

D_o	Çıkış Yolunun Çapı
f	Hacimsel Akış Oranı
e	Hata
${}_t D_0^r(\cdot)$	Kesir Dereceli Hesaplama Operatörü
$\eta = K_p / A_{t1}$	Sabit
w_b	Yaklaşıklığın Geçerli Olduğu Frekans Bandının Alt Limiti
\hat{H}	Yaklaşım Fonksiyonu
γ	s^γ 'nın Derecesi
u_d	Anahtarlama Sinyali
u_{eq}	Eşdeğer Kontrol Sinyali
$\Gamma(\cdot)$	Gamma Fonksiyonu
λ	İntegral Derecesi
$s(t)$	Kayma Yüzeyi
k_p	Kayma Yüzeyi Kazancı
K	Kazanç
n	Kontrol Edilecek Sistemin Derecesi
K_p	Pompa Debi Sabiti
$V_p = u(t)$	Pompaya Uygulanan Gerçek Gerilim
k	Sabit
a, t	Sınır Değerler
A_o	Sıvı Akış Yolunun Kesit Alanı
L	Sıvı Seviyesi
$\text{sgn}(s)$	Signum Fonksiyonu

A_t	Tankın İç Kesit Alanı
f_i	Tanklara Giren Sıvının Hacimsel Akış Oranı
f_o	Tanklardan Çıkan Sıvının Hacimsel Akış Oranı
V_0	Tanktan Sıvının Çıkış Akış Hızı
μ	Türev Derecesi
w_h	Yaklaşıklığın Geçerli Olduğu Frekans Bandının Üst Limiti
N	Yaklaştırma Derecesi
g	Yerçekimi Sabiti

Kısaltmalar

2 DOF	2 Serbestlik Dereceli
ABPI	Adaptif Bulanık PI
AK	Adaptif Kontrolcü
BMK	Bulanık Mantık Kontrolcü
DMRAK	Doğrudan Model Referans Adaptif Kontrol
GAK	Geri Adımlamalı Kontrolcü
İDG	İntegral Durum Geribildirim
KDİDG	Kesir Dereceli İntegral Durum Geribildirim
KDK	Kesir Dereceli Kontrolcü
KDKKK	Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü
KDM	Katsayı Diyagram Metodu
KDPI	Kesir Dereceli PI
KKK	Kayan Kipli Kontrolcü
KOA	Karakteristik Oran Atama
MÖK	Model Öngörülü Kontrolcü
MRAK	Model Referans Adaptif Kontrol
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
TDPI	Tam Sayı Dereceli PI

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Tek tank modeli	16
Şekil 3.2. İkili tank modeli.....	19
Şekil 3.3. Oustaloup algoritması.....	23
Şekil 3.4. PID ve $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 'nin gösterimi.....	25
Şekil 3.5. Genel kayan kipli kontrolcü gösterimi	26
Şekil 3.6. Kayma aşaması ve anahtarlama aşamasının gösterimi.....	28
Şekil 3.7. Kayan kipli kontrolcü'de çatırtı oluşumunun gösterimi.....	29
Şekil 3.8. Sign ve sat fonksiyonlarının gösterimi	30
Şekil 3.9. Kayan kipli kontrolcünün blok diyagramı.....	32
Şekil 4.1. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + kare referans sonuçları	44
Şekil 4.2. Tek tank PI kontrolcü için sabit + kare referans sonuçları	44
Şekil 4.3. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları.....	45
Şekil 4.4. Tek tank PI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları	45
Şekil 4.5. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + testere referans sonuçları.....	46
Şekil 4.6. Tek tank PI kontrolcü için sabit + testere referans sonuçları	46
Şekil 4.7. Tek tank KDPI için sabit + kare referans sonuçları	49
Şekil 4.8. Tek tank KKK için sabit + kare referans sonuçları	49
Şekil 4.9. Tek tank KDPI için sabit + sinüzoidal referans sonuçları.....	50
Şekil 4.10. Tek tank KKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları.....	50
Şekil 4.11. Tek tank KDPI için sabit + testere referans sonuçları.....	51
Şekil 4.12. Tek tank KKK için sabit + testere referans sonuçları.....	51
Şekil 4.13. İkili tank KDPI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçlar	54
Şekil 4.14. İkili tank PI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları	54
Şekil 4.15. İkili tank KDPI için sabit + sinüzoidal referans sonuçları	55
Şekil 4.16. İkili tank KKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları	55

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte birçok alanda kontrol sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Akıllı askeri sistemlerden uzay araçlarına, nükleer santrallerden otomotiv endüstrisine kadar birçok endüstriyel prosesler de kullanılan kontrol sistemleri, geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Kontrol sistemlerini kullanmaktaki amaç ise çeşitli referans işaretlerine karşı, sistemlerin otomatik olarak minimum hata ile referans işaretini takip etmesini ve sistemin maksimum verimde çalışmasını sağlayarak sistemin bozucu etkilerden mümkün olduğunca etkilenmemesini sağlamaktır. Bu işlemlerin gerçekleşmesi için öncelikle kontrol edilecek sistemlerin dinamik analizleri yapılmakta ve daha sonra sistemlerin yapılarına uygun kontrolcüler tasarlanarak sistemlerin kontrolleri gerçekleştirilmektedir.

Çeşitli alanlarda kullanılan kontrol sistemlerinin bir diğer önemli kullanım alanı ise sıvı seviye sistemleridir. Günümüzde nükleer santrallerden petrokimya endüstrisine, ilaç endüstrisinden kâğıt endüstrisine kadar birçok alanda sıvı seviye sistemleriyle karşılaşmaktadır. Kullanım alanlarının gittikçe artmasıyla bu sistemlerin kontrolü de bir o kadar önemli hale gelmiştir.

Temel olarak sıvı seviye sistemlerinde, sıvının tanka pompalanması, tankta depolanması ve daha sonra depolanan sıvının tanktan diğer bir tanka iletimi, hedeflenen durumdur. Bu işlemler gerçekleşirken sıvı seviyesinin istenilen aralıkta tutulması ve tanklar arasındaki akışın düzenlenmesi istenmektedir. Bu sistemlerde karşılaşılan en büyük problem ise tankların çıkışlarındaki sıvı akış hızının zamana bağlı olarak düzensiz değişimidir. Bu durum sıvı seviye sistemlerinin doğrusal olmayan bir davranış sergilemesine neden olduğundan kontrolünü de oldukça zorlaştırmaktadır. Oluşan bu sıvı seviye kontrol problemini ortadan kaldırmak için çeşitli kontrol metotları geliştirilmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan, tasarımı basit, güvenilir ve parametre uyarlaması kolay olan P, PI, PID kontrolcöleri sıvı seviye kontrol problemini ortadan kaldırmak adına kullanılmıştır (Tunyasrirut *et al.* 2007; Gou *et al.* 2008). Ancak bu kontrolcöler sabit parametrelere sahip olduğundan sistemde oluşan hataları elimine etmekte yetersiz kalmakta ve değişen durumlar karşısında kendilerini uyarlayamadıkları için ikili tank sıvı seviye sistemleri gibi doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılmaları uygun olmamaktadır. Bu durumların üstesinden gelebilmek için, sistemin doğrusal olmayan yapısına uygun, parametre belirsizliklerine karşı yüksek doğrulukla çalışan ve doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine başvurulmuştur.

Bulanık mantık kontrol (BMK), geri adımlamalı kontrol (GAK), adaptif kontrol (AK), kayan kipli kontrol (KKK), kesirli dereceden kontrol (KDK) gibi doğrusal olmayan kontrol yöntemleri son yıllarda ikili tank sıvı seviye sistemlerine rahatlıkla uygulanmıştır. Bu tür kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen tanklardaki proses adımları, sıvı seviyesinin kontrolünün minimum hata ile gerçekleştirdiğini göstermiştir.

BMK yöntemi, bir sistemin tam olarak modellenemediği durumlarda belirli bir kural tablosu üzerinden sistemin çalışmasını sağlamaktadır (Jian-Jun 2014). Bulanık mantık kontrolcölerinin kararlılık analizlerinin yapılamaması, sistemin nasıl tepki vereceğinin kestirilememesi, uygun parametre değerlerinin deneme yanılma yöntemiyle bulunuyor olması ve kural tablosundan yapılan matrissel işlemin uzun zaman alması, bu kontrolcölerin kullanımını sınırlamaktadır.

GAK yöntemi, durum denklemlerinin adım adım incelenerek tasarlanması, kararlılık analizinin gerçekleştirilebilmesi ve yinelemeli yapısı gibi avantajlarından dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Benayache *et al.* 2009; Gouta *et al.* 2015; Nail *et al.* 2015). Bu kontrolcünün sahip olduğu en büyük dezavantaj ise karmaşık sistemlerde denklem takımlarını elde etmekteki zorluğudur.

AK yöntemi, kontrol ettiği sistemdeki değişimlere, çevresel değişikliklere ve belirsizliklere, yapısal bozukluklara karşı kendi kontrol parametrelerini otomatik olarak

uyarlayabilmektedir. Ayrıca uygulamalarda ki kullanım kolaylığı sayesinde son yıllarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak değişimin büyük ve sık olduğu ayrıca ölçülemeyen dış etkenlerin fazla olduğu sistemlerde adaptif kontrolcünün kullanımı uygun değildir.

KKK yöntemi, bozuculara ve gürültülere karşı duyarsız olması, kararsız sistemlere uygulanabiliyor olması, tasarımının kolay ve parametre belirsizliklerine karşı yüksek doğruluklu çalışmasından dolayı doğrusal olmayan sistemlere rahatlıkla uygulanmıştır (Utkin 1977; Moshiri *et al.* 2003; Benayache *et al.* 2009; Levant 2010; Floquet *et al.* 2010). Kontrol sinyalini belli bir aralıkta kararsız üretmesi ise en büyük dezavantajıdır. Bu süresiz kontrol işareti sistemlerde çattırtı oluşmasına neden olmaktadır. Çattırtı fiziksel sistem elemanlarına zarar vermektedir. Bu çattırtı etkisini elimine etmek için çeşitli yollar mevcuttur. Bunlardan birisi de KKK'yi kesirli dereceden tasarlamaktır (Faieghi *et al.* 2012).

Kesir dereceli kontrol ve hesaplama olan ilgi son zamanlarda gelişen teknolojiyle birlikte hızla artmıştır. Yapılan araştırmalar, kesir dereceli diferansiyel denklemlerin, karmaşık denklemleri tanımlamak için etkin bir araç olduğunu ve birçok sistemi modellemekte de etkili bir yöntem olarak kullanıldığını göstermiştir (Oustaloup *et al.* 2000).

KDK yönteminde, tam sayı dereceli kontrolcülerdeki gibi kontrolcü kazanç katsayılarının serbest seçilmesine ek olarak kontrolcü türüne bağlı olarak türev ve integralin dereceleri de serbest seçilebilmektedir. Bu sebeple KDK'ler tam sayı dereceli kontrolcülere göre sistemin kontrolünü daha başarılı olarak gerçekleştirmektedir (Zhao *et al.* 2005). Çeşitli sistemler üzerinde gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilen bu kontrol yöntemi, ikili tank sıvı seviye sistemlerinde kontrol problemini çözmek için çeşitli kontrolcülerle birlikte kullanılmıştır (Bhambhani and Chen 2008; Ramkumar and Varghese 2015).

Bu tez çalışmasında KKK'nin doğasında var olan çatırtı etkisini zayıflatmak adına kayma yüzeyi kesir dereceden tasarlanmıştır. Bununla birlikte, kesir dereceli olarak tasarlanan KKK'nin yüksek doğruluk ve yüksek sağlamlık etkisini devam ettirmesi amaçlanmıştır, matematiksel olarak modellenen kontrolcü ikili tank sıvı seviye sistemine çeşitli referanslar için gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım değeri, hatayı elimine edebilme, referans takip başarısı, kontrol işaretinin genlik ve formu kriterleri açısından incelenmiştir. Kesir dereceli PI (KDPI) kontrolcünün performansı klasik PI kontrolcü ile KDKKK'nin performansı da tam sayı dereceli KKK ile kıyaslanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan ikili tank sıvı seviye sistemlerindeki en temel problemlerden biri tanklar arasındaki sıvı seviyesini kontrol etmektir. Bu sıvı seviye kontrol probleminin üstesinden gelebilmek adına literatürde yer alan çeşitli kontrol yöntemleri kullanılmıştır.

Boonsrimuang *et al.* (2009) PI kontrolcünün parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilmek için model referans adaptif kontrol (MRAK) yöntemini ikili tank sıvı seviye sistemine uygulamışlardır. MRAK yöntemi sistemdeki değişimlere ve bozululara cevap olarak kontrolcünün parametrelerini belirtilen referans modelden bakarak gerçek zamanlı olarak ayarlamaya çalışmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar MRAK yönteminin uygun bir kontrol yöntemi olduğunu ve ikili tank sıvı seviye sistemindeki kontrol problemini çözdüğünü göstermiştir.

Senthilkumar *et al.* (2011) PI kontrolcünün parametrelerini karakteristik oran atama metodu (KOA) yardımıyla ayarlayarak ikili tank sıvı seviye sistemini doğrusallaştırmaya çalışmışlardır. Tek giriş tek çıkışlı sistemin kapalı çevrim cevabı ile kontrolcü çıkışının sonuçları KOA-PI kontrolcü kullanılarak karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları ve gerçek zamanlı sonuçlar KOA tabanlı PI kontrolcünün parametrelerinin karakteristik oranının yalnızca bir parametresini seçme avantajıyla kolaylıkla tasarlandığını göstermiştir.

Soumya Ranjan *et al.* (2016) ikili tank sıvı seviye sistemindeki sıvı seviye kontrol probleminin üstesinde gelmek için PI kontrolcü kullanmışlardır. PI kontrolcünün parametrelerini hesaplamak için doğrusal matris eşitsizliği yaklaşımını uygulamışlardır. Bu kontrol algoritmasının performansı Ziegler-Nichols yaklaşım metodu kullanılarak oluşturulan PI kontrolcüsü ile kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları kadar gerçek zamanlı sonuçlar, önerilen bu kontrol metodunun Ziegler-Nichols yaklaşımı

kullanılarak oluşturulan PI kontrolcüsüne göre aşım yapmadan referans işaretini takip ettiğini ve daha iyi bir sıvı seviye kontrol performansı sergilediğini göstermiştir.

Nurnsomrarr *et al.* (2007) iki giriş iki çıkışlı birleştirilmiş tank sistemi için 2 serbestlik dereceli (2 DOF) PI kontrolcüyü deneysel olarak sisteme uygulamışlardır. Deneysel sonuçlar 2 DOF-PI kontrolcüsünün klasik PI kontrolcüsüne göre daha az aşım yaptığını ve birleştirilmiş tank modeli için 2 DOF-PI kontrolcüsünün sistemde oluşan istenmeyen durumları en aza indirdiği gözlemlenmiştir.

Senthilkumar and Vijula (2015) doğrusal olmayan üç tanklı sıvı seviye sistemi için katsayı diyagram metodunu (KDM) kullanan 2 DOF kontrolcü tasarlayarak Matlab/Simulink ortamında sisteme uygulamışlardır. KDM yöntemi kullanılarak oluşturulan 2 DOF kontrolcü klasik PI kontrolcü ile kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları tasarlanan bu kontrolcünün hızlı yükselme zamanına sahip olduğunu ve aşım yapmadan en küçük yerleşim zamanına sahip olduğunu göstermiştir.

Senthilkumar *et al.* (2016) üç tanklı sıvı seviye sisteminin doğrusallaştırılmış matematiksel modelini elde etmişlerdir. Sıvı seviyesini kontrol etmek için klasik PI kontrolcü, KDM yöntemini kullanan 2 DOF kontrolcü ve model öngörülü kontrolcü (MÖK), Matlab/Simulink ortamında sisteme uygulanmıştır. 2 DOF-KMD kontrolcünün performansı klasik PI kontrolcü ile kıyaslanmış ve sonuçlar 2 DOF-KMD kontrolcünün daha az aşım yaptığını ve daha az integral kare hata oranına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca 2 DOF-KMD kontrolcünün performansı MÖK ile kıyaslanmıştır ve MÖK'nin daha iyi yükselme zamanına ve daha az integral kare hata oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar MÖK'nin diğer kontrolcülere göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Choraingern *et al.* (2005) KOA temelinde PID kontrolcü tasarımını doğrusal olmayan ikili tank sıvı seviyesine uygulamışlardır. Simülasyon sonuçları önerilen bu teknikte yalnızca bir parametreyi ayarlayarak istenilen sonuçların elde edilebileceğini göstermiştir.

Holić and Veselý (2011) frekans domaininde ikili tank sıvı seviye sisteminin sahip olduğu belirsizliklerin üstesinden gelebilmek için sağlam bir PID kontrolcü tasarlamışlardır. Bunun için iki yaklaşım kullanmışlardır. İlk yaklaşım Edge Teoremine dayanırken ikinci yaklaşım Neimark'ın D bölümlene yönteminin modifikasyonuna dayanmaktadır. Kontrol kalitesi açısından Neimark'ın D eğrilerini kullanarak oluşturulan kontrolcünün istenen faz marjı ile sağlam bir kontrol gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Ikhlef *et al.* (2016) tank seviye sisteminin uzaktan kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Fiziksel sistem yerel ağ veya internet ağı kullanılarak gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Kullanıcı uzaktan kumanda edilen sistemi, grafiksel kullanımı olan bir ara yüz kullanarak basit bir web tarayıcısıyla kontrol edebilmektedir. PID kontrolcünün parametreleri Ziegler-Nichols metoduyla gerçek zamanlı olarak ayarlanmıştır. PID kontrolcünün parametreleri ayarlandıktan sonra kontrol sistemi intranet ve internet ağı üzerinden başarıyla test edilmiş ve elde edilen sonuçlar tatmin edici düzeyde olmuştur.

Fang *et al.* (2009) ikili tank sisteminde ki kontrol probleminin üstesinden gelebilmek için BMK kullanmışlardır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu çalışma da kontrolcünün hızlı yanıt verme, az aşım ve daha az statik hata karakterine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda kontrolcünün endüstriyel ortamda uygulanabilir olduğunu da göstermiştir.

Liang (2011) çift tanklı sıvı seviyesi kontrol sistemi için bulanık (fuzzy) PID kontrolcü tasarlamıştır. Bu yaklaşımda bulanık PID kontrolcü, bulanık kontrol aritmetiğinin yeni bir uygulama yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Kingview'de izleme arayüzü tasarlanmış, kontrol programı yeni bir yöntemle gerçekleştirilmiş ve sıvı seviye kontrol sistemine uygulanmıştır. Sonuçlar, bu yöntemin etkin bir yol olduğunu göstermiştir.

Gaurav and Kaur (2012) sıvı akış kontrolü için klasik PID ve BMK'nin performanslarını simülasyon ortamında birbirleriyle kıyaslamışlardır. Simülasyon

sonuçları çeşitli referans girişleri altında BMK'nin klasik PID kontrolcüye göre daha az aşım yaptığını ve daha hızlı cevap verdiğini göstermiştir.

Mahmood and Taha (2013) sıvı seviye kontrolü için BMK'yi kullanmayı önermişlerdir. BMK az sayıda kural kullanması ve basit uygulamasıyla ikili tank sıvı seviyesindeki kontrol probleminin üstesinden gelebilmiştir. Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen çalışmada BMK'nin etkileri PID kontrolcü ile karşılaştırılmış ve BMK'nin klasik PID kontrolcüye göre aşımı, yerleşme zamanını ve kararlı hal hatasını azalttığı gözlemlenmiştir.

Mahapatro *et al.* (2014) adaptif bulanık PI (ABPI) kontrolcüyü ikili tank sıvı seviye sistemindeki sıvı seviyesini kontrol etmek için gerçek zamanlı olarak sisteme uygulamışlardır. Klasik PI kontrolcü gerçek zamanlı olarak sisteme uygulandığında büyük bir aşım, yüksek yerleşme zamanı ve daha yüksek hata değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. ABPI kontrolcü ise hem aşımı azaltmış hem de yerleşme zamanını klasik PI kontrolcüye göre kısaltmıştır. Simülasyon sonuçlarının yanı sıra deneysel sonuçlarda göstermiştir ki önerilen ABPI kontrolcünün kontrol performansı yaygın olarak kullanılan klasik PI kontrolcüsüne göre daha iyidir.

Başçi ve Derdiyok (2016) ikili tank sıvı seviye sistemine adaptif bulanık kontrolcüyü gerçek zamanlı olarak uygulamışlar ve parametreleri iyi ayarlanmış PI kontrolcü ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, önerilen yaklaşımın yüksek izleme hassasiyetine sahip olduğunu, PI kontrolcüye göre daha iyi seviye izleme performansı gösterdiğini, bozucu etkilere ve referanstaki değişimlere karşı daha sağlam olduğunu ortaya koymuştur. Önerilen bu tanımlama modeli ve kontrol yapısının, değişen koşullara ve parametre belirsizliklerine hızlı bir şekilde uyum sağladığı ve çok iyi çalıştığı görülmüştür.

Pana *et al.* (2005) ikili tank sıvı seviye sistemindeki sıvı seviyesini kontrol etmek için doğrusal olmayan GAK'yi kullanmışlardır. İkili tank sıvı seviye sisteminde değişen sıvı seviyelerinin kontrolü için model tabanlı GAK ve adaptif GAK tasarlanmıştır.

Lyapunov kararlılık kriterinden yararlanılarak kontrolcülerin sistemi asimptotik kararlılığa götürdüğü ispat edilmiştir. Deneysel veriler önerilen doğrusal olmayan adaptif GAK'nin klasik PI kontrolcüye göre daha iyi referans takibi sağladığı görülmüştür.

Calofir *et al.* (2013) GAK'yi ikili tank sisteminde ki sıvı seviyesini kontrol etmek için kullanmışlardır. Sistemin doğrusal olmayan modeli Simulink ortamında tasarlanmış ve fiziksel sistem üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar bu kontrolün etkin bir teknik olduğunu göstermiş, fakat doğrusal olmayan yapısından ve sistem belirsizliklerinden dolayı kararlı hal hataları oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Sekban vd (2016) PI kontrolcüyü ve GAK'yi ikili tank sıvı seviye sistemine gerçek zamanlı olarak uygulamışlardır. Sisteme uygulanan farklı referans işaretleri iki kontrolcüye de uygulanmış ve referans işareti yakalama başarısı, sistemde meydana gelen hataları elimine edebilme, kararlılık analizleri açısından kıyaslanmıştır. Geri adımlamalı kontrolcü PI kontrolcüye göre referans takip başarısı ve hata eliminasyonu açısından daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Mahyuddin *et al.* (2007) Simulink ortamında simülasyonu gerçekleştirilen ikili tank sıvı seviye sisteminin doğrusal olmayan yapısına doğrudan model referans adaptif kontrolü (DMRAK) uygulamışlardır. DMRAK'nin tüm çalışma noktalarında (tank seviyesinde su seviyesi veya yükseklik) ikili tank sıvı seviye sisteminin doğrusal olmayan yapısıyla baş edebileceği gösterilmiştir. Kontrolcünün, sistemin doğrusal olmayan yapısına, bozulmalara ve ölçüm gürültülerine rağmen sıvı seviyesini kontrol etmek için uygun kontrol sinyalleri üretebildiği gösterilmiştir.

Kangwanrat *et al.* (2010) ikili tank sıvı seviye sistemi için MRAK yöntemini kullanarak PI kontrolcü tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu kontrol yönteminde ki ana amaç sistem değişikliklerine cevap olarak kontrolcü parametrelerini ve istenen kontrol sisteminin özelliklerini belirten referans modelden bakarak gerçek zamanlı olarak ayarlamaktır. Deneysel sonuçlar MRAK yönteminin ikili tank sistemindeki dinamik problemleri

çözdüğünü ve sistemin gereksinimleri altında kontrolcü tasarımı için uygun olduğunu göstermiştir.

Singh and Kumar (2013) doğrusal olmayan ikili tank sistemindeki belirsizliklerin ve zamanla değişen parametrelerin üstesinden gelebilmek adına (Massachusetts Institute of Technology) MIT kuralını kullanarak MRAK'ye dayalı PID kontrolcü kullanımını önermişlerdir. Bu kontrolcü, parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilecek şekilde tasarlanmış ve referans modeli takip etmesi sağlanmıştır. Simülasyon sonuçları, Matlab/Simulink ortamında elde edilmiş olup önerilen bu kontrolcünün sağlam bir performans sergilediğini, referans modeli oldukça iyi bir şekilde takip ettiğini göstermiştir.

Saad *et al.* (2014) ikili tank sıvı seviye sistemindeki ikinci tankın sıvı seviyesini kontrol etmek için PI kontrolcü ve MRAK yöntemine dayalı iki kontrolcü kullanmışlardır. PI kontrolcünün parametreleri tasarımı basit Zeigler-Nichols yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. MRAK'nin kararlılığı ise Lyapunov teorisi kullanılarak ispatlanmıştır. MRAK'nin geçici ve sürekli hal bölgelerindeki cevabı, kararlı hal bölgesinde geliştirilmiş klasik PI kontrolcüsü ile kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları MRAK'nin klasik PI kontrolcüye göre aşımı ve yerleşme zamanını azalttığını göstermiştir.

Keerthana and Gnanasoundharam (2016) ikili tank sıvı seviye sistemindeki sıvı seviyesini kontrol etmek için PI, MRAK ve BMK kullanmışlardır. MRAK, sistem ve referans model değişikliklerine yanıt olarak kontrol parametrelerini değiştirebildiği ve istenen kontrol sisteminin özelliklerini gösterebildiği için sıvı seviyesini ayar noktasına yönlendirmek adına düzgün bir kontrol işareti üretmiştir. Simülasyon sonuçları MRAK'nin, PI kontrolcü ve BMK'ye göre daha az integral kare hata oranına ve daha hızlı yerleşme zamanına sahip olduğunu göstermiştir

Rhif *et al.* (2012) KKK'nin sahip olduğu en büyük dezavantaj olan çatırtı etkisini ortadan kaldırmak için bir PID kayma modu yaklaşımı sunmuşlardır. Simülasyon çalışmaları hidrolik sistem ve ikili tank sistemi üzerinde denenmiştir. PID-KKK ile

KKK ve PID kontrolcüler karşılaştırılmış ve sonuçlar PID-KKK'nin kararlılığının ve referans takibinin daha iyi olduğunu ayrıca çatırtı etkisini de azalttığını göstermiştir.

Abbas *et al.* (2012) ikili tank sıvı seviye sisteminin matematiksel modelini elde etmişler ve bu sistem için KKK tasarlamışlardır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu çalışmada KKK'nin performansı çeşitli giriş sinyallerine karşı verdiği tepkiler açısından incelenmiştir. KKK'nin sistemdeki bozuculara karşı sağlam bir duruş sergilediği ve sistemdeki sıvı seviyesini kontrol etmek için uygun bir kontrol sinyali ürettiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar KKK'nin klasik PID kontrolcüye göre referansı daha iyi takip ettiğini ve bozucu etkileri daha iyi elimine ederek başarılı bir kontrol performans sergilediğini göstermiştir.

Derdiyok ve Başçi (2013) ikili tank sistemi için çatırtısız KKK tasarlamışlardır. Seviye kontrol algoritması, sırasıyla çeşitli referans işaretleri kullanılarak tek ve çift tank için uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yaklaşımın yüksek hassasiyetle sıvı seviye izleme performansı sergilediğini ve aynı zamanda bozuculara ve referanstaki değişimlere karşı dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Toms and Hepsiba (2014) doğrusal olmayan sistemlerde sıklıkla kullanılan KKK'yi ikili tank sisteminde sıvı seviye kontrolünü gerçekleştirmek için kullanmışlardır. Öncelikle sistemin matematiksel modeli elde edilmiş daha sonra Matlab/Simulink ortamındaki sonuçlar KKK'nin klasik PID kontrolcüye göre referansı daha iyi takip ettiğini göstermiştir.

John and Francis (2015) doğrusal olmayan ikili tank sıvı sistemindeki kontrol problemini standart KKK kullanarak ortadan kaldırmaya çalışmışlardır. Standart KKK'nin oluşturduğu çatırtı etkisini ortadan kaldırmak için integral tip KKK sisteme uygulamışlardır. İntegral tip KKK tüm çalışma noktalarında ikili tank sisteminin doğrusal olmayan özellikleriyle başa çıkabilmiştir. Tasarlanan bu kontrolcünün yüksek derecede doğrulukla çalışması, değişen koşullara karşı sağlam bir duruş sergilemesi gibi özellikleriyle iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

Can vd (2016) doğrusal olmayan dörtlü tank sıvı seviye sistemine KKK'yi uygulamışlardır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışma da çeşitli referans işaretleri kullanılmış ve KKK'nin klasik PI kontrolcüye göre hataları daha iyi elimine ederek referansı daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir.

Sekban vd (2016) ikili tank sıvı seviye sistemine KKK'yi sadece birinci tankın ve hem birinci hem de ikinci tankın hesaba katıldığı iki farklı konfigürasyon için gerçek zamanlı olarak uygulamışlardır. Deneysel sonuçlar KKK'nin klasik PI kontrolcüye göre hataları iyi bir şekilde elimine ettiğini, referansı iyi bir şekilde takip ettiğini ve parametre belirsizliklerine karşı iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Parvat *et al.* (2013) doğrusal olmayan ikili tank sıvı seviye sisteminin seviye kontrolü için KKK tasarımı sunmuşlardır. KKK sabit röle kazanç yaklaşımı ile sistemin matematiksel modeli de kütle korunumu prensibine göre elde edilmiştir. KKK'nin ve klasik PID kontrolcünün performansları teorik olarak analiz edilmiştir. KKK'nin klasik PID kontrolcüye göre maksimum aşım, yerleşme zamanı vb. açıdan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Calderón *et al.* (2006) anahtarlama fonksiyonu temelinde kesir dereceli PID (KDPID) ve KDPI yapılarını tanımlamış ve deneysel bir prototip geliştirmişlerdir. Ayrıca deneysel ve simülasyon sonuçları önerilen kontrol stratejilerinin geçerliliğini doğrulamıştır.

Efe ve Kasnakoğlu (2008) adaptif KKK'lerin kullanıldığı sistemlerin performansını geliştirmek için kesir dereceli türev veya integral kullanımını sunmuşlardır. Önerilen bu yöntem 2 DOF robotun dinamik modeli dikkate alınarak simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin daha iyi izleme performansı sergilediği, çok yüksek sağlamlılık derecesine sahip olduğu, bozulmalara karşı duyarsız oluşu gibi özellikleri simülasyon sonuçlarıyla ispatlanmıştır.

Efe (2010) KDKKK incelemiş ve tam sayılı KKK'nin kesir dereceli ifade edilen sistemler için de geçerli olduğunu göstermiştir. KDKKK tasarlanırken kayma yüzeyi, anahtarlama fonksiyonu veya ulaşma fonksiyonu kesir dereceli olarak tasarlanabilmektedir. Simülasyon sonuçları bu durumları doğrulamaktadır.

Sundaravadivu *et al.* (2011) küresel tankın sıvı seviyesini kontrol etmek için KDPID kontrolcü kullanmışlardır. KDPID klasik tam sayı dereceli PID (TDPID) kontrolcü ile simülasyon ortamında test edilmiş, aynı zamanda TDPI kontrolcü ile deneysel olarak kıyaslanmıştır. KDPID kontrolcü integral-kare hata metodunun minimizasyonu kullanılarak dizayn edilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar KDPID kontrolcünün tam sayı dereceden PID kontrolcüye göre yerleşme zamanını, integral kare hatasını, yükselme zamanını vb. azaltması bakımından daha verimli olduğunu göstermiştir.

Efe (2011) kesir dereceli ulaşma kanunu yaklaşımını kullanılarak integral tip KKK'yi yeniden formüle etmiş ve quadrotor tip insansız hava aracına uygulamıştır. Tam sayı dereceli alternatifleri ile karşılaştırıldığında bu yeni kontrol metodunun bozucular ve belirsizliklere karşı sağlam bir duruş sergilediği gözlemlenmiştir.

Faieghi *et al.* (2012) doğrusal olmayan, güçlü belirsizliklere sahip bir kesir dereceli Liu sisteminin kontrolü için KDKKK tasarlamışlardır. KKK, kesir dereceli integral tipli kayma yüzeyi temel alınarak tasarlanmıştır. Kararlılık analizi için Lyapunov kararlılık teoremi kullanılmış ve sistemin belirsizlikler ve bozucu dış etkenler altında kararlı olduğu gösterilmiştir. Çatırtıyı azaltmak için ise BMK kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları bu kontrolcünün yüksek sağlamlılığa sahip olduğunu ve çatırtısız çalıştığını göstermiştir.

Zhang and Pı (2012) klasik birinci dereceden KKK'nin çatırtı sorununu ortadan kaldırmak için bulanık mantık çıkarım algoritmasına dayalı KDKKK sunmuşlardır. PMSM servo sürücü sistemini kullanılarak yapılan simülasyon ve deneysel sonuçlar klasik tam sayı dereceden KKK'nin KDKKK'ye oranla sadece yüksek kontrol

performansı elde etmekle kalmadığını aynı zamanda dış bozuculara karşı da sağlam bir duruş sergilediğini göstermiştir.

Divya and Anbumalar (2014) ikili tank sistemi için KDPI ve TDPI kontrolcüler tasarlamışlardır. Simülasyon ve deneysel çalışmalar, tam sayı dereceli sistemler için, KDPI kontrolcü ile TDPI kontrolcü karşılaştırıldığında, KDPI kontrolcünün ayar noktası takibi, sağlamlılık, bozucuları elimine etme, kararlılık gibi özellikler açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Sekban vd (2016) kontrol mühendisliği alanında sıkça kullanım imkânı bulan kesir dereceli hesaplama yöntemini dörtlü tank sıvı seviye sistemine uygulamışlardır. Bu sayede PI kontrolcünün esnekliğinin artırılması sağlanmış, sistemde oluşan hataları elimine ederek referansı daha iyi bir şekilde takip ettiği simülasyon sonuçlarında gösterilmiştir.

Roy *et al.* (2016) ikili tank sıvı seviye sisteminde seviye kontrolü için kullanılan kesir dereceli integral durum geribildiriminin (KDİDG) performansının integral durum geribildirimine (İDG) göre daha iyi olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Sistemin doğrusal modeli kadar doğrusal olmayan modeli de deneysel açık çevrim cevabı ve fiziksel kanunlar kullanılarak elde edilmiştir. İDG kontrolcü doğrusal model göz önüne alınarak kutup ekleme yöntemi ile elde edilmiştir. KDİDG kontrolcü doğrusal olmayan model göz önüne alınarak parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar KDİDG'nin İDG'ye göre daha iyi yükselme zamanına, yerleşme zamanına, aşım oranına vb. sahip olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. İkili tank sisteminin modeli

Su seviye kontrol sistemi; bir adet pompa, bir adet su havuzu ve iki adet su tankının yer aldığı bir düzeneden oluşmaktadır. Tanklar şeffaf bir zemin üzerine dikey olarak konumlandırılmıştır. Üst kısımda yer alan tank 1 pompa vasıtasıyla doldurulurken, alt kısımda yer alan tank 2'nin doldurulması tank 1 aracılığıyla olmaktadır. Sadece tank 1'in hesaba katıldığı veya tank 1 ile tank 2'nin birlikte hesaba katıldığı iki konfigürasyon mevcuttur. Sıvı seviye kontrolü iki aşamalı olarak yapılabileceği gibi tek aşamalı olarak da yapılabilir.

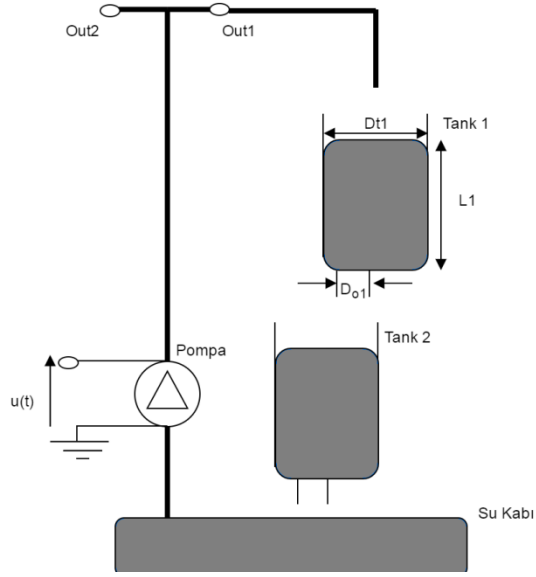
3.1.2. Tek tank modeli

Tek tank modeli Şekil 3.1'de gösterilen ikili tank sisteminde üstte yer alan tank için geçerlidir. Tank 1'in içindeki sıvı seviyesi sadece pompa aracılığıyla kontrol edilir. Tek tank modelinde tank 2 hesaplanmaz. Proses girişi pompa voltajı iken çıkışı tank 1'in sıvı seviyesidir. Tek tank sisteminin matematiksel modeli tank 1'e giren sıvının hacimsel akış oranı f_{il} ve tank 1'den çıkan sıvının hacimsel akış oranı f_{ol} 'e bağlı olarak elde edilir. Tank 1'e giren ve çıkan sıvının hacimsel akış oranı aşağıdaki eşitliklerde belirtildiği gibidir (Quanser 2005).

$$f_{il} = \eta u(t) \quad (3.1)$$

$$f_{ol} = A_{ol} V_{ol} \quad (3.2)$$

A_{o1} sıvı akış yolunun kesit alanı (cm^2), V_{o1} suyun tank 1 dışına çıkış hızı (cm/s), $\eta = K_p/A_{o1}$ sabit, K_p pompa debi sabiti ($\frac{cm^3}{s}$), $u(t) = V_p$ pompaya uygulanan gerçek gerilimdir (*volt*).



Şekil 3.1. Tek tank modeli

Çıkış akış hızı Bernoulli denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{o1} = \sqrt{2\sqrt{gL_1}} \quad (3.3)$$

Yukarıda yer alan g yer çekimi sabitidir. Tank 1 için sıvı çıkış yolunun kesit alanı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_{o1} = \frac{1}{4} \pi D_{o1}^2 \quad (3.4)$$

D_{o1} tank 1 sıvı çıkış yolu çapını göstermektedir. Bu ifadeler denklemlerde yerine yazılırsa sıvı akış oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_{o1} = A_{o1} \sqrt{2} \sqrt{gL_1} \quad (3.5)$$

Kütle korunumu prensibi kullanılarak L_1 için birinci dereceden diferansiyel denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A_{t1} \left(\frac{dL_1}{dt} \right) = f_{i1} - f_{o1} \quad (3.6)$$

A_{t1} tank 1 iç kesit alanı olup ifadeler tekrar toparlanacak olursa tank 1 sistemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{KpVp - A_{o1} \sqrt{2} \sqrt{gL_1}}{A_{t1}} \quad (3.7)$$

3.1.3. İkili tank modeli

İkili tank modeli Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir. Bu konfigürasyon için sistem durumları tank 1 için L_1 ve tank 2 için L_2 sıvı seviyeleridir. Tank 2 için sıvı çıkış akış oranı,

$$f_{o2} = A_{o2} V_{o2} \quad (3.8)$$

ile gösterilebilir. Tank 2 sıvı çıkış akış hızı Bernoulli denklemi kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$V_{o2} = \sqrt{2}\sqrt{gL_2} \quad (3.9)$$

Tank 2 sıvı çıkış yolu kesit alanı,

$$A_{o2} = \frac{1}{4}\pi D_{o2}^2 \quad (3.10)$$

denklemleri ile hesaplanır ve bu denklemler sıvı çıkış akış oranı denkleminde yeniden yazılır ise,

$$f_{o2} = A_{o2}\sqrt{2}\sqrt{gL_2} \quad (3.11)$$

denklemleri elde edilir. Tank 2'ye giren sıvı akış oranı aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

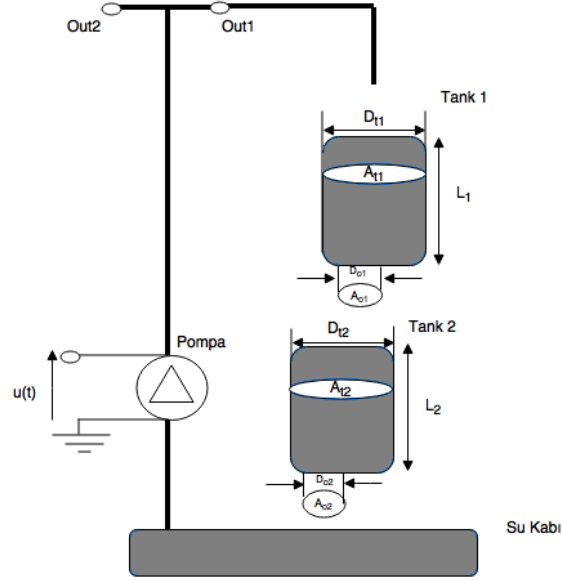
$$f_{i2} = A_{o1}\sqrt{2}\sqrt{gL_1} \quad (3.12)$$

Kütle korunumu prensibi tank 2 için yazılırsa L_2 için birinci dereceden diferansiyel denklem elde edilir.

$$A_{t2}\left(\frac{dL_2}{dt}\right) = f_{i2} - f_{o2} \quad (3.13)$$

İfadeler tekrar toparlanacak olursa tank 2 sistemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{-A_{o2}\sqrt{2}\sqrt{gL_2} + A_{o1}\sqrt{2}\sqrt{gL_1}}{A_{t2}} \quad (3.14)$$



Şekil 3.2. İkili tank modeli

3.2. Yöntem

3.2.1. Kesir dereceli hesaplama

Kesir dereceli hesaplama, türev veya integral ifadelerinin tam sayı olan dereceleri yerine herhangi bir reel sayıdan oluşan derecelerin kullanılması olarak tanımlanabilir. Kesir dereceden hesaplamamanın geçmişi oldukça eskidir. 1695 yılında L'Hospital ve Leibniz arasındaki mektuplaşmada Leibniz, L'Hospital'e "Tam sayılı mertebeden türev, tam sayılı olmayan dereceler için de genişletilebilir mi?" diye sormuş ve böylece kesir dereceden hesaplamamanın temeli atılmıştır (Dalir and Bashour 2010).

Kesir dereceli hesaplamamanın tarihinin bu kadar eski olmasına rağmen ilk çalışmalar 19. yüzyılın ortalarında Liqville, Riemann ve Holmgren tarafından gerçekleştirilmiştir (Oldham and Spanier 1974). Kontrol sistemlerinde ise kesir dereceli hesaplamayı ilk kez kullanan Tustin ve arkadaşları olmuş, kesir dereceli hesaplamayı büyük nesnelere pozisyon kontrolünü gerçekleştirmek için kullanmışlardır (Tustin *et al.* 1958).

Hesaplama sistemlerinin gelişmemiş olmasından dolayı KDK çalışmalarına olan ilgi uzun süre istenilen düzeyde olmamıştır. Fakat 1990'lı yıllarda Oustaloup yaptığı çalışmalar sayesinde literatürde sıklıkla kullanılan Crone (Fransızca “Commande Robuste d’Ordre Non Entier” kelimesinin kısaltması) kesir dereceli hesaplama sistemini geliştirmiştir (Oustaloup 1981; Oustaloup 1990; Oustaloup 1991). Son zamanlarda gelişen teknolojiyle birlikte hesaplama sistemlerinin gelişme kaydetmesi KDK ve modellemeye olan ilginin artmasına neden olmuştur.

Kesir dereceli hesaplamada türev ve integralin tamsayı olmayan dereceleri için ${}_a D_t^r$ gibi genel bir gösterim kullanılmaktadır. Bu gösterimde a ve t işlemin sınırlarını belirtirken $r \in R$ 'dir. Bu işlemin sürekli integro-diferansiyel gösterimi ise aşağıda belirtildiği gibidir.

$${}_a D_t^r = \begin{cases} \frac{d^r}{dt^r} & r > 0 \\ 1 & r = 0 \\ \int_a^t (dt)^{-r} & r < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Grünwald-Letnikov (GL), Riemann-Louville (RL) ve Caputo kesir dereceli integro diferansiyel tanımlamalar içerisinde en sık kullanılan yöntemlerdendir (Podlubny 1999). Bu tanımlamalar aşağıda gösterilmiştir (Caponetto *et al.* 2010).

GL Tanımlaması;

$${}_a D_t^r f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-r} \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-a}{h} \right]} (-1)^j \binom{r}{j} f(t - jh) \quad (3.16)$$

şeklindedir ve $\left[\frac{t-a}{h} \right]$ terimi tam sayıdır.

RL Tanımlaması $n-1 < r < n$ için;

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-r)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau \quad (3.17)$$

şeklindedir. Denklemdede yer alan $\Gamma(\cdot)$ ifadesi Gamma fonksiyonudur. Riemann-Louville tanımının Laplace dönüşümü uygulamalarda ortaya çıkan başlangıç değeri problemini ya da deneysel yolla ölçülebilirlik problemini ortadan kaldırmak için Caputo tarafından Caputo kesirli dereceden türev tanımı geliştirilmiştir.

Caputo Tanımlaması için $n-1 < r < n$;

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-r)} \int_a^t \frac{f^n(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau \quad (3.18)$$

şeklinde yazılabilir. Caputo kesirli dereceli türev denklemleri için başlangıç şartları, tam sayı dereceli türev denklemleri ile aynı yapıdadır. Denklem (3.18)'in Laplace dönüşümü alınır (Na *et al.* 2012);

$$\int_0^\infty {}_a D_t^r f(t) d(t) = \left\{ s^r F(s) - \sum_{k=0}^n s^{r-k-1} f^{(k)}(0) \right\} \quad (3.19)$$

denklemini elde edilir.

Denklem (3.19)'da eğer $f^{(k)}(0) = 0$ ise ikinci kısım ihmal edilebilmektedir. Bu ifade belirli bir noktadaki kesirli diferansiyelin bu noktadaki sürekli fonksiyonunun sınırsız olduğunu belirtmektedir. Bu durum ise başlangıç anından bütün zaman noktalarına fonksiyonlu olmasını sağlamaktadır. Bu sebeple kesirli analizin tam sayılı analize göre en büyük avantajı kuvvetli bir hafızaya sahip olmasıdır (Na *et al.* 2012).

3.2.2. Kesir dereceli sistemlerin yaklaşıklıkları

Kontrol sistemlerinde kullanılması amaçlanan kesir dereceli türev ve integralin uygulanabilir olması için bazı yaklaşımlar yapmak gerekmektedir. Çünkü kesir dereceli ifadelerin tam çözüm yöntemi bulunmadığından ve zaman tanım bölgesinde analiz edilirken türev ve integral ifadeleri sisteme doğrusal olmayan bir yapı kazandırdıklarından sistemin cevabını elde etmek oldukça güçleşmektedir. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek ve kesir dereceli türev ve integral ifadelerinin uygulanabilir olması için bazı yaklaşımlar yapılmıştır (Vinagre *et al.* 2000).

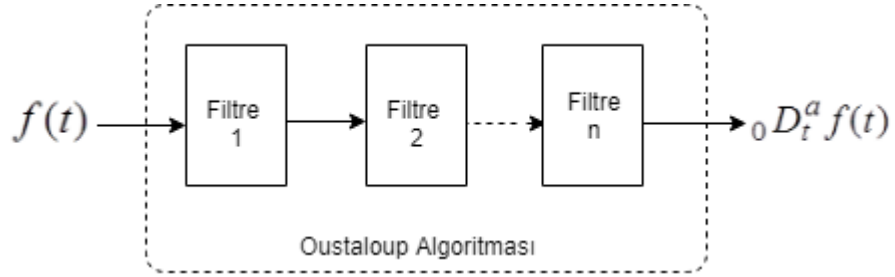
Kesir dereceli hesaplamada tam sayı dereceden yaklaşım yöntemlerini kullanmadan önce kesir dereceli sistemin Laplace dönüşümü elde edilir. Daha sonra Laplace dönüşümü yapılan sistemin çözümü çeşitli yaklaşım yöntemleri kullanılarak elde edilir. Laplace operatörünün seri açılım mantığına dayanan Tustin, Carlson, Matsuda, Simpson yaklaşım yöntemleri en sık kullanılan kesir dereceli yaklaşım yöntemleri arasındadır (Aoun *et al.* 2003; Valerio *et al.* 2005).

Bu yaklaşım yöntemleri birbirleriyle kıyaslandığında birbirleri üzerinde bazı üstünlükleri bulunmaktadır. Örneğin Crone ve Carlson yaklaşım yöntemlerinde sürekli durum hatası oluşmazken Tustin ve Simpson yönteminde sürekli durum hatası oluşmaktadır. Crone yönteminde ise sistem Carlson yöntemine göre sürekli duruma daha hızlı geçmiş fakat Carlson yönteminde Crone yöntemine göre aşım miktarı daha az olmuştur. En iyi performans ise Crone ve Carlson yaklaşımlarında sağlanmıştır (Atan vd 2009). Bu çalışmada Oustaloup'un kesir dereceli hesaplama yapabilmek için geliştirdiği ve literatürde sıklıkla kullanılan Crone yaklaşımı kullanılmıştır.

3.2.3. Crone yaklaşımı (Oustaloup yaklaşımı)

Crone yaklaşımı en sık kullanılan yaklaşım tekniklerinde biridir. Bu yaklaşım yönteminde kesir dereceli transfer fonksiyonunun frekans cevabı elde edilirken özel frekans aralığı içerisinde tekrarlı sıfır ve kutupların dağıtılması yöntemi

kullanılmaktadır (Mazidah *et al.* 2013). Şekil 3.3'te verilen Crone algoritması (Oustaloup algoritması), seçilen frekans bantlarında tamsayı filtrelerinin seri bağlanarak kesirli Laplace operatörünün yaklaşık değerinin elde edilmesi temeline dayanmaktadır. Kesirli analiz filtrelerden sonraki çıkış olan ${}_0D_t^\alpha f(t)$ değerine eşittir. Bu algoritma aşağıdaki gibi gösterilebilir (Na *et al.* 2012).



Şekil 3.3. Oustaloup algoritması

Crone yaklaşım denklemini aşağıdaki formda olan fonksiyonlar için geçerlidir.

$$H(s) = s^\gamma, \gamma \in \mathbb{R}, \gamma \in [-1, 1] \quad (3.20)$$

Uygun frekans bandı aralığı olarak $w_b \cdot w_h = 1$ olacak şekilde (w_b, w_h) seçildiği kabul edilirse, çok katlı filtrenin \hat{H} yaklaşım fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\hat{H} = s^\gamma = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + w'_k}{w_k} \quad (3.21)$$

Sistemin kutup ve sıfırları ile kazanç değeri için aşağıdaki denklem grupları kullanılır.

$$w'_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+0.5((1-\gamma))}{2N+1}} \quad (3.22)$$

$$w_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+0.5(1+\gamma)}{2N+1}} \quad (3.23)$$

$$K = \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{-\gamma}{2}} \prod_{k=-N}^N \frac{w_k}{w_k} \quad (3.24)$$

Burada γ , s^γ 'nin derecesidir ve filtre serisinin sayısıdır. w_b yaklaşıklığın geçerli olduğu frekans bandının alt kesim frekansı iken, w_h üst kesim frekans değerini ifade etmektedir. K değeri ise alt ve üst kesim frekans değerlerine bağlı bir sabit iken N yaklaştırma derecesidir.

Bu çoklu filtre yapısı kuvvetli bir parazit giderici etkiye sahiptir. K kazancı öyle ayarlanır ki $w = 1 \text{ rad/sn}$ frekansında ifadenin genliği 0 dB değerinde tutulmaya çalışılır. Bu yöntem sistemin hangi frekans bandına yaklaştırma yapılacağını ve yaklaştırmanın derecesini kullanarak kutup ve sıfırları en uygun biçimde hesaplar. Ayrıca buradaki N yaklaştırma derecesi arttıkça yaklaştırma başarımı artmakta, buna karşılık karmaşıklık da artmaktadır (Başçi 2013).

3.2.4. Kesir dereceli kontrolcü

Kesir dereceli diferansiyel denklemlerle ifade edilen kontrolcüler KDK olarak adlandırılmaktadır. KDK'ler tam sayı dereceli kontrolcülerin genelleştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Çünkü KDK'ler de kontrolcü kazanç katsayılarının serbest seçilebilmesine ek olarak türev veya integralin dereceleri de serbest seçilebilmektedir. Bu durum da KDK'lerin kontrol edilecek sistemin kontrolünü tam sayılı kontrolcülere göre daha esnek ve daha doğru olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda sistemin parametre değişimlerinden daha az etkilenmesine de sebep olmaktadır (Zhao *et al.* 2005).

KDK ilk kez Podlubny tarafından PID kontrolcü ile kesir dereceli analizin birleştirilmesiyle meydana getirilmiştir. Podlubny kesir dereceli kontrol sisteminin dinamik cevabını inceleyerek klasik PID den daha iyi performans sergilediğini kanıtlamıştır (Podlubny 1999).

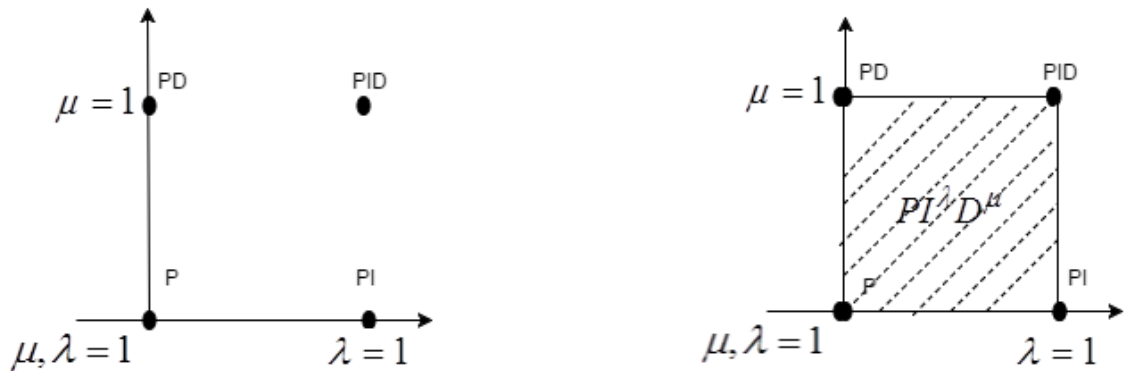
Zaman tanım bölgesinde kesir dereceli bir $PI^\lambda D^\mu$ kontrolcünün aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_{i_0} D_t^\lambda e(t) + K_{d_0} D_t^\mu e(t) \quad (3.25)$$

Denklemlerde yer alan λ ve μ katsayıları $\lambda=1$, $\mu=1$ olarak seçilirse klasik PID elde edilmektedir. Buradan da anlaşıldığı üzere KDK'ler tam sayılı kontrolcülerin bir özel halidir. $PI^\lambda D^\mu$ kontrolcünün transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$G_c(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (3.26)$$

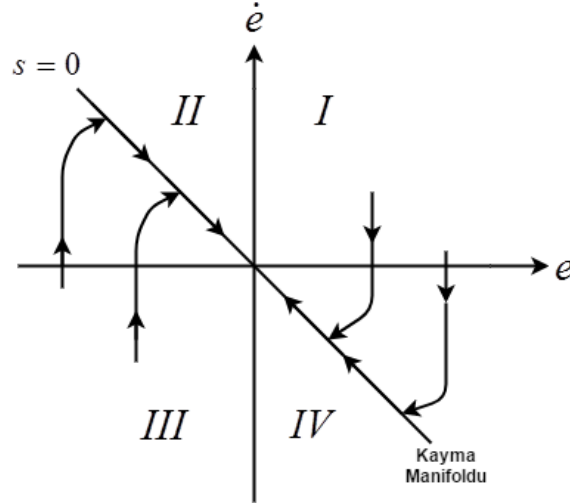
Klasik PID kontrolcü Şekil 3.4'te gösterildiği gibi dereceler düzleminde nokta ile gösterilirken $PI^\lambda D^\mu$ kontrolcü ise bir düzleme karşı düşmektedir.



Şekil 3.4. PID ve $PI^\lambda D^\mu$ 'nin gösterimi

3.2.5. Kayan kipli kontrolcü

Genel gösterimi Şekil 3.5'te verilen KKK ilk olarak 1950'li yılların sonlarına doğru Sovyetler Birliği'nde ortaya çıkmış ve ilk olarak bu konu üzerinde çalışan kişi Emelyanov olmuştur. 1960'lı yılların sonlarına doğru ise Utkin tarafından incelenmiş, 1970'li yılların ortalarında yaptığı çalışmalarla da bütün dünyaya tanıtılmıştır (Utkin 1977). Yeni bir kontrol metodu olarak ortaya çıkan KKK elektrik motorlarının kontrolünden otomatik uçuş kontrolüne kadar çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 3.5. Genel kayan kipli kontrolcü gösterimi

KKK değişken yapıli sistemlere rahatlıkla uygulanabilen doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. KKK yönteminin sahip olduğu en önemli özelliklerden bir tanesi gürbüz olmasıdır. Ayrıca tasarlanan kontrolcü modeli ile kontrolcünün uygulanacağı model arasında meydana gelen uyumsuzlıklardan ve parametre belirsizliklerinden etkilenmemesi, tasarımının kolay olması, sağlam bir kontrol yöntemi olması, yüksek doğrulukla çalışması diğer önemli özellikleri arasındadır.

KKK'nin bir diğer önemli özelliği ise sistemin derecesi ne olursa olsun sistemi kayma yüzeyinde iken birinci dereceye indirgeyecek kontrolcü girişini belirleyerek sistemin

birinci dereceden bir sistem gibi davranmasını sağlamaktır. Bu özelliği ile sistem cevabının istenen bir değere aşım yapmadan gelmesini sağlamaktadır. Kararsız sistemlere uygulandığında ise sistemi kararlı ve kararsız yörüngeler arasında geçiş yaptırarak karalı bir yapıya dönüştürür (Başçı 2013).

KKK'nin en büyük dezavantajı ise uygulanan sistemde çatırtı meydana getirmesidir. Kontrol sinyali, bir değerden başka bir değere sonsuz hızda anahtarlama yaptığı için gerçek zamanlı uygulamalarda buna ayak uydurmak oldukça zordur. Hızlı hareket eden mekanik sistemlere uygulandığı zaman sistemi oluşturan parçalara zarar verebilmektedir. Bu nedenle hızlı değişen sistemlerde KKK önerilebilecek bir kontrol yöntemi değildir.

3.2.6. Kayan kipli kontrolcünün çalışma prensibi

KKK metodunda ana amaç, değişken yapıdaki sistem parametrelerini faz uzayında, faz değişkenlerinden oluşan bir kayma yüzeyi üzerinde tutmaktır. Diğer bir ifade ile durum uzayında uygun bir şekilde tanımlanan kayma manifoldu aracılığıyla seçilen kontrol değişkenlerinin referans ve ölçülen değerleri arasındaki fark (hata) ile bu farkın zamana bağlı türevlerini sıfır yapmak veya durum değişkenlerini tanımlanan bir denge konumuna taşımaktır.

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi KKK'de ulaşma aşaması ve anahtarlama aşaması olmak üzere iki temel aşama mevcuttur. Birinci aşamada sistemin durum değişkenleri buldukları ilk konumdan önce kayma manifoldunun üzerine gelmektedir. Bu aşama ulaşma aşaması (reaching phase) ya da erişim aşaması olarak adlandırılmaktadır. Sistem belirsizliklere ve dış bozuculara karşı duyarlıdır. Ulaşma evresinde sistem durumlarının farklı değerlerinde sürekli olarak tanımlanabilmesi için kayma yüzeyini tanımlayan $s(t)$ 'nin;

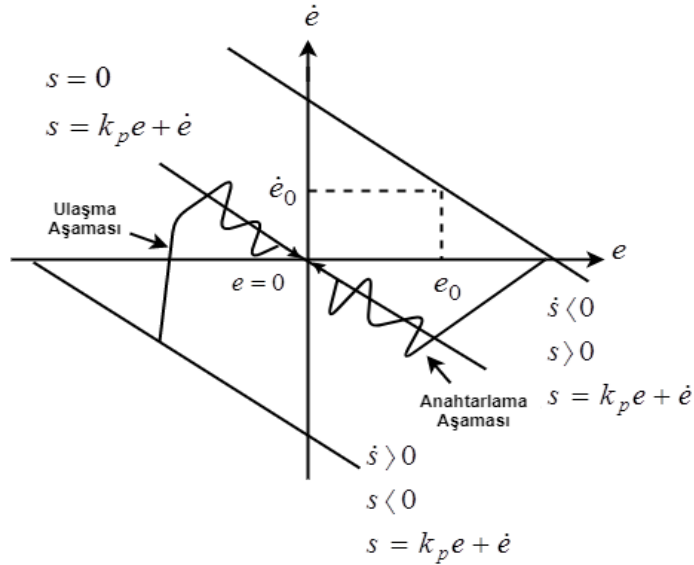
$$s(t) \cdot \dot{s}(t) \leq 0 \quad (3.27)$$

şeklinde olması gerekmektedir.

İkinci aşamada ise manifold üzerine gelen sistemin durum değişkenleri belirlenen denge noktasına taşınmaktadır. Bu aşama anahtarlama aşaması (switching phase) ya da kayma aşaması olarak adlandırılmaktadır (Hung *et al.* 1993; Nguyen 1998). Sistem bu evredeyken dış bozuculardan ve parametre belirsizliklerinden etkilenmez. Kayma aşamasında kayma yüzeyi olarak seçilen $s(t)$ 'nin ;

$$s(t) = 0, \quad \dot{s}(t) = 0 \quad (3.28)$$

koşullarını sağlaması gerekmektedir. Kayma evresi gerçekleştiğinde hata sıfıra ulaşır.

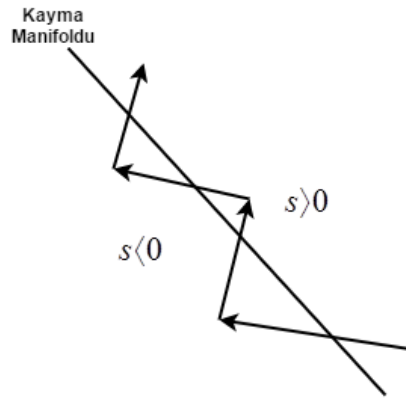


Şekil 3.6. Kayma aşaması ve anahtarlama aşamasının gösterimi

Kayma manifoldu üç durum değişkenli sistemlerde kayma yüzeyi iken iki durum değişkenli sistemlerde kayma doğrusu halini almaktadır.

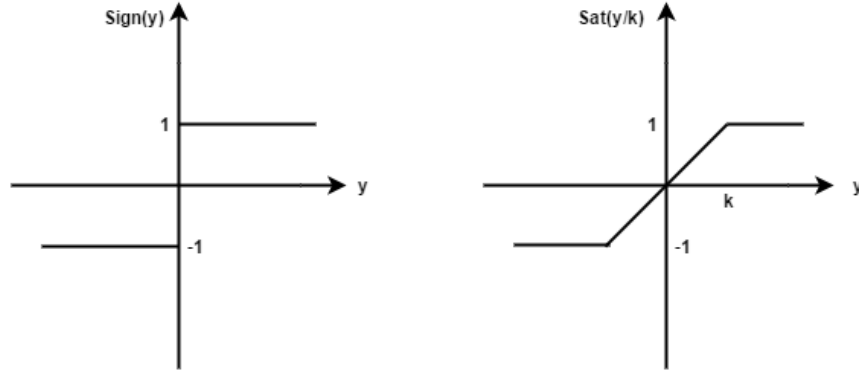
Şekil 3.7'de gösterildiği gibi KKK'de, sistem durumları kayma yüzeyine ulaştıktan sonra sistem durumları bu yüzeyin dışına çıkarlarsa ani bir kontrol işareti üreterek

durumlar yüzey üzerinde tutulmaya çalışılır. Durum böyle olunca kontrol için sistem çok kısa sürede çok fazla yön değiştirir. Sistem durumlarını kayan yüzey üzerinde tutmak için ani yön değiştiren sonsuz frekanslı bu işarete çatırtı (chattering) denir. Çatırtı, uygulamada bazı problemlere neden olmaktadır. Kontrol edilen sistemde yorulmalara sebep olmakta, sistemin ömrünü ciddi oranda azaltmakta ve gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır.



Şekil 3.7. Kayan kipli kontrolcü’de çatırtı oluşumunun gösterimi

Çatırtı etkisi filtreleme, süreksiz yaklaşım, doyma fonksiyonu, bulanık kontrol gibi çeşitli yollar kullanılarak azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir. Ancak bu sefer de KKK gürbüzlük özelliğini kaybeder (Eker 2006; Özdal 2008; Kızmaz 2009). Bu olumsuz çatırtı etkisini önlemenin yollarından bir diğeri ise Şekil 3.8’de gösterildiği gibi KKK işaretinde yer alan “signum” fonksiyonunu “sat” doyma fonksiyonu veya “tanh” sigmoid fonksiyonu gibi yumuşatma fonksiyonları ile değiştirmektir (Palm 1992; Park and Lee 2003).



Şekil 3.8. Sign ve sat fonksiyonlarının gösterimi

Hem çattırtı etkisini azaltmak hem de KKK'nin yüksek sağlamlılık ve yüksek doğruluk özelliklerini devam ettirmesini sağlamak için kontrolcü bu çalışmada kesir dereceli olarak tasarlanmıştır.

3.2.7. Kayan kipli kontrolcünün tasarlanması

Geleneksel KKK tasarlanırken ilk olarak kayma yüzeyi belirlenmektedir (Utkin 1977). Literatür verileri tarandığında hata, hatanın türevi ve diğer sistem değişkenlerinin kullanıldığı çeşitli kayma fonksiyonlarının önerildiği görülmüştür (Camacho *et al.* 2003; Kaya 2007; Eker ve Akınal 2008). Kayma fonksiyonu ilk olarak aşağıdaki denklemdeki gibi önerilmiştir.

$$s(t) = \left(k_p + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (3.29)$$

Denklemden yer alan n ifadesi kontrol edilecek sistemin derecesidir. k_p ise kayma yüzeyinin kazancını ifade etmekte, ulaşma aşaması için öngörülen süreye göre hesaplanmakta ve sistem durum değişkenlerinin kayma yüzeyine ulaşma hızını etkilemektedir. $e(t)$ ise hatayı ifade etmektedir. Hata referans değerinden çıkış

değerinin çıkarılması ile elde edilir ($e(t) = r(t) - y(t)$). İkinci dereceden bir sistem için kayma fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$s(t) = k_p e(t) + \dot{e}(t) \quad (3.30)$$

İkinci dereceden bir sistem için kayma fonksiyonunun zamana göre türevi ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\dot{s}(t) = k_p \dot{e}(t) + \ddot{e}(t) \quad (3.31)$$

Kayma yüzeyinin belirlenmesinden sonraki aşama ise kontrol kuralının bulunmasıdır. Bunun için denklem (3.31) ifadesi sıfıra eşitlenir ve böylece sistemi kayma yüzeyinde tutacak olan “eşdeğer kontrol (u_{eq})” (equivalent control) bileşeni bulunur.

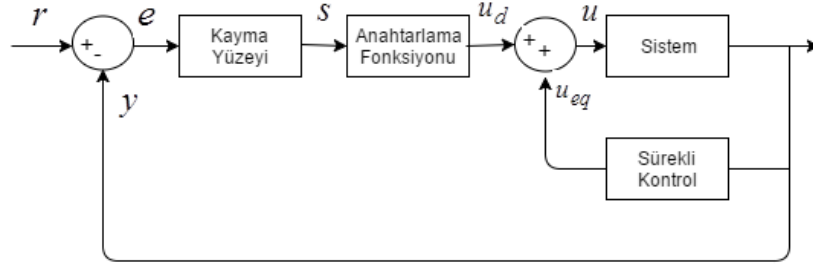
Daha sonra anahtarlama sinyali olan u_d , sabit değişimli anahtarlama sinyali olarak $u_d = k_x \text{sgn}(s)$ şeklinde ifade edilir. Denklemdaki k_x anahtarlama kazancı, $\text{sgn}(s)$ ise sembolik olarak aşağıda belirtildiği gibidir (Longand and Li 2015).

$$\text{sgn}(s(t)) = \begin{cases} 1 & s(t) > 0 \\ 0 & s(t) = 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

Son olarak toplam kontrol sinyali, ulaşma aşaması (u_{eq}) ve anahtarlama aşaması (u_d) sırasında oluşan kontrol sinyalleri toplanarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$u = u_{eq} + u_d \quad (3.33)$$

Denklem (3.33)'da belirtilen kontrol işaretine göre sistemin kontrol blok diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Kayan kipli kontrolcünün blok diyagramı

3.2.8. Kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı

3.2.8.a. Tank 1 için kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı

Akış oranı negatif olamayacağından akış oranını aşağıdaki gibi kabul edebiliriz.

$$f \geq 0 \quad (3.34)$$

Akış oranının yukarıdaki gibi olması için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekmektedir.

$$L_1 \geq L_2 \quad (3.35)$$

Böylece aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} = k_1, \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} = k_2, \quad (3.36)$$

$$k_1 = k_2 = k, \quad (3.37)$$

İkili tank sisteminin dinamik model denklemlerinde bu kabuller yerlerine yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\dot{L}_1 = -k\sqrt{z_1} + \eta u \quad (3.38)$$

$$\dot{L}_2 = k\sqrt{z_1} - k\sqrt{z_2} \quad (3.39)$$

$$y = L_1 \quad (3.40)$$

İkili tank modelinin sistem dinamikleri doğrusal değildir. Bu yüzden ikili tank sisteminin dinamikleri tanımlanabilsin diye dinamik model denklemleri aşağıdaki gibi bir transformasyona tabi tutulur.

Şimdi $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ve $x = T(z)$ dönüşümü yapıldığında,

$$x_1 = L_1 \quad (3.41)$$

$$x_2 = \dot{L}_1 = -k_1\sqrt{z_1} + \eta u \quad (3.42)$$

eşitlikleri elde edilir. İkili tank sisteminin dinamikleri aşağıda gösterildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.43)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-k}{2\sqrt{L_1}} \dot{L}_1 \quad (3.44)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-k}{2\sqrt{L_1}} \left(-k_1 \sqrt{L_1} + \eta u \right) \quad (3.45)$$

Böylece ikili tank sisteminin dinamikleri birleştirilmiş formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.46)$$

$$\dot{x}_2 = f + \phi u = \frac{-k}{2\sqrt{L_1}} \left(-k_1 \sqrt{L_1} + \eta u \right) \quad (3.47)$$

Burada;

$$f = \frac{k^2}{2} \text{ ve } \phi = -\frac{k}{2\sqrt{L_1}} \eta \text{ olarak ifade edilebilir.}$$

Kayma yüzeyi $s(t)$ olarak tanımlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilmiş olur.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + k_p \right)^{n-1} . e = k_p e + \dot{e} \quad (3.48)$$

Burada n kontrol edilecek sistemin derecesi, k_p kayma yüzeyi kazancı, e ise hatadır.

$$e_1 = L_{1r} - L_1 \quad (3.49)$$

$$e_1 = x_{1r} - x_1 \quad (3.50)$$

Hatayı biz referans – ölçülen (measure) olarak alırız ve yukarıdaki eşitlikte elde edilmiş olur. KDKKK için kontrol sinyalini elde etmek adına kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$s = k_p e_1 + {}_t D_0^r \dot{e}_1 \quad k_p \in R^+, r \in (0,1) \quad (3.51)$$

${}_t D_0^r (\cdot)$ ise kesir dereceli hesaplama operatörüdür. Yukarıdaki eşitliğin türevini alacak olursak;

$$\dot{s} = k_p \dot{e}_1 + {}_t D_0^{r-1} \ddot{e}_1 \quad (3.52)$$

$$\dot{s} = k_p \dot{e}_1 + {}_t D_0^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (3.53)$$

Kayma yüzeyinin türevini elde etmiş oluruz. İdeal durumda $s = 0$ olması istenir. Sistem kayma modu üzerinde hareket ettiği zaman kayma yüzeyinin türevinin de sıfıra eşit olması doğaldır, $\dot{s}(t) = 0$.

Hatanın ikinci dereceden türevi yerine yazılıp sıfıra eşitlenir ise aşağıdaki denklem elde edilmiş olur.

$$0 = k_p \dot{e}_1 + D^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (3.54)$$

$$0 = k_p \dot{e}_1 + D^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - f(x) - \phi(x)u_{eq}) \quad (3.55)$$

$D^r (D^{-r}f(t)) = f(t)$ 'yi elde etmek için denklem (3.55)'nin $(1-r)$ dereceden türevini alınız (Podlubny 1999).

$$0 = k_p D^{1-r} \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1r} - f(x) - \phi(x)u_{eq} \quad (3.56)$$

Denklem (3.56) kullanılarak kayma modunda sistemin eşdeğer kontrolü aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$u_{eq} = \frac{-f(x)}{\phi(x)} + \frac{k_p D^{1-r} \dot{e}_1}{\phi(x)} + \frac{\ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} \quad (3.57)$$

Sistem parametreleri ve bozucu büyüklükler göz önüne alındığında aşağıdaki kontrol kanunu elde edilir.

$$u = u_{eq} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.58)$$

u_{eq} ve $k_x \operatorname{sgn}(s)$ eşitlikleri yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa, aşağıdaki kontrol işareti için gerekli olan denklemler elde edilir.

$$u = \frac{-\frac{k^2}{2}}{\frac{-k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + \frac{k_p D^{1-r} \dot{e}}{\frac{-k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + \frac{\ddot{x}_{1r}}{\frac{-k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.59)$$

Denklem (3.59) toparlanarak 1.tankın KDKKK işareti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u = \frac{k\sqrt{L_1}}{\eta} - \frac{2k_p\sqrt{L_1}D^{1-r}\dot{e}}{k\eta} - \frac{\ddot{x}_{1r}2\sqrt{L_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.60)$$

3.2.8.b. Tank 2 için kesir dereceli kayan kipli kontrolcü tasarımı

Aynı şekilde ikili tank sisteminin dinamikleri göz önüne alınarak kontrol kanunu 2. tankın sıvı seviyesini kontrol etmek için uygulanacak olursa aşağıdaki eşitlikler kabul edilir.

$$\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{r1}} = k_1, \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{r2}} = k_2, \quad (3.61)$$

$$k_1 = k_2 = k, \quad (3.62)$$

İkili tank sisteminin dinamik model denklemlerinde bu kabuller yerlerine yazılır ise aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\dot{L}_1 = -k\sqrt{L_1} + \eta u \quad (3.63)$$

$$\dot{L}_2 = k\sqrt{L_1} - k\sqrt{L_2} \quad (3.64)$$

$$y = L_2 \quad (3.65)$$

$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ve $x = T(z)$ dönüşümleri yapılacak olursa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$x_1 = L_2 \quad (3.66)$$

$$x_2 = \dot{L}_2 = k\sqrt{L_1} - k\sqrt{L_2} \quad (3.67)$$

İkili tank sisteminin dinamikleri yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilmiş olur.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.68)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{L_1}} \dot{L}_1 - \frac{k}{2\sqrt{L_2}} \dot{L}_2 \quad (3.69)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{L_1}} (-k\sqrt{L_1} + \eta u) - \frac{k}{2\sqrt{L_2}} (k\sqrt{L_1} - k\sqrt{L_2}) \quad (3.70)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k\eta u}{2\sqrt{L_1}} - \frac{k^2\sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} \quad (3.71)$$

İkili tank sisteminin dinamikleri birleştirilmiş formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.72)$$

$$\dot{x}_2 = f + \phi u = -\frac{k^2\sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} + \frac{k\eta u}{2\sqrt{L_1}} \quad (3.73)$$

Burada;

$$f = -\frac{k^2\sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} \text{ ve } \phi = \frac{k}{2\sqrt{L_1}}\eta \text{ şeklinde ifade edilebilir.}$$

Kayma yüzeyi $s(t)$ olarak tanımlanır ise;

$$s = \left(\frac{d}{dt} + k_p \right)^{n-1} e = k_p e + \dot{e} \quad (3.74)$$

eşitliği elde edilir ve burada n kontrol edilecek sistemin derecesi, k_p kayma yüzeyi kazancı, e ise hatadır.

$$e_2 = L_{2r} - L_2 \quad (3.75)$$

$$e_2 = x_{1r} - x_1 \quad (3.76)$$

Hatayı biz referans-ölçülen olarak alırız ve yukarıdaki eşitlik oluşur.

Kesir dereceli diferansiyel kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$s = k_p e_2 + {}_t D_0^r \dot{e}_2 \quad k_p \in R^+, r \in (0,1) \quad (3.77)$$

${}_t D_0^r (\cdot)$ kesir dereceli hesaplama operatörüdür. Yukarıdaki eşitliğin türevini alacak olursak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\dot{s} = k_p \dot{e}_2 + {}_t D_0^{r-1} \ddot{e}_2 \quad (3.78)$$

$$\dot{s} = k_p \dot{e}_2 + {}_t D_0^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (3.79)$$

İdeal durumda $s = 0$ olması istenir. Sistem kayma modu üzerinde hareket ettiği zaman kayma yüzeyinin türevinin de sifıra eşit olması doğaldır, ($\dot{s}(t) = 0$). Hatanın ikinci derecen türevi yerine yazılıp sifıra eşitlenirse aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$0 = k_p \dot{e}_2 + D^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (3.80)$$

$$0 = k_p \dot{e}_2 + D^{r-1} (\ddot{x}_{1r} - f(x) - \phi(x)u_{eq}) \quad (3.81)$$

$D^r (D^{-r} f(t)) = f(t)$ 'yi elde etmek için denklem (3.83)' ün $(1-r)$ dereceden türevi alınarak denklem (3.82) elde edilir.

$$0 = k_p D^{1-r} \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f(x) - \phi(x)u_{eq} \quad (3.82)$$

Denklem (3.82) kullanılarak kayma modunda sistemin eşdeğer kontrolü aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$u_{eq} = \frac{-f(x)}{\phi(x)} + \frac{k_p D^{1-r} \dot{e}_2}{\phi(x)} + \frac{\ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} \quad (3.83)$$

Sistem parametreleri ve bozucu büyüklükler göz önüne alındığında aşağıdaki kontrol kanunu elde edilir.

$$u = u_{eq} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.84)$$

u_{eq} ve $k_x \operatorname{sgn}(s)$ eşitlikleri yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$u = \frac{\frac{k^2 \sqrt{L_1}}{2 \sqrt{L_2}}}{\frac{k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + \frac{k_p D^{1-r} \dot{e}}{\frac{k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + \frac{\ddot{x}_{1r}}{\frac{k\eta}{2\sqrt{L_1}}} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.85)$$

Denklem (3.85) toparlanarak 2.tankın KDKKK işareti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u = \frac{kL_1}{\eta\sqrt{L_2}} + \frac{2k_p \sqrt{L_2} D^{1-r} \dot{e}}{k\eta} + \frac{\ddot{x}_{1r} 2\sqrt{L_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (3.86)$$

3.2.9. Kararlılık analizi

Kararlılık için kendisi pozitif tanımlı türevi ise negatif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonunu aşağıdaki gibi tanımlarsak;

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.87)$$

Lyapunov teoremine göre biliyoruz ki $\dot{V} < 0$ olunca sistem kayma yüzeyine doğru hareket edecek ve bu kayma yüzeyi üzerinde kalarak orjine oturacaktır. Böylece de asimtotik olarak kararlı olacaktır (Utkin 1977).

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (3.88)$$

Sistemin kararlı olması için yeterli koşul aşağıdaki gibidir.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -|s| \quad (3.89)$$

Burada ki s pozitif sabittir. Bu eşitlik ulaşma modu ya da kayma modu olarak adlandırılır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Hazırlanan tez kapsamında, deneysel sonuçlar ikili tank sıvı seviye sistemindeki sıvı seviye kontrolünü gerçekleştirmek için iki farklı konfigürasyon ile elde edilmiştir. Sadece tek tankın kullanıldığı veya iki tankın birlikte kullanıldığı iki farklı konfigürasyon için klasik PI, KDPI, KKK ve KDKKK metotları çeşitli referans işaretleri için birbirleriyle kıyaslanmıştır. Kontrolcülerin performansları kontrol başarımları, hata oranları, yükselme zamanı ve referans işareti takip etme başarısı açısından incelenmiştir.

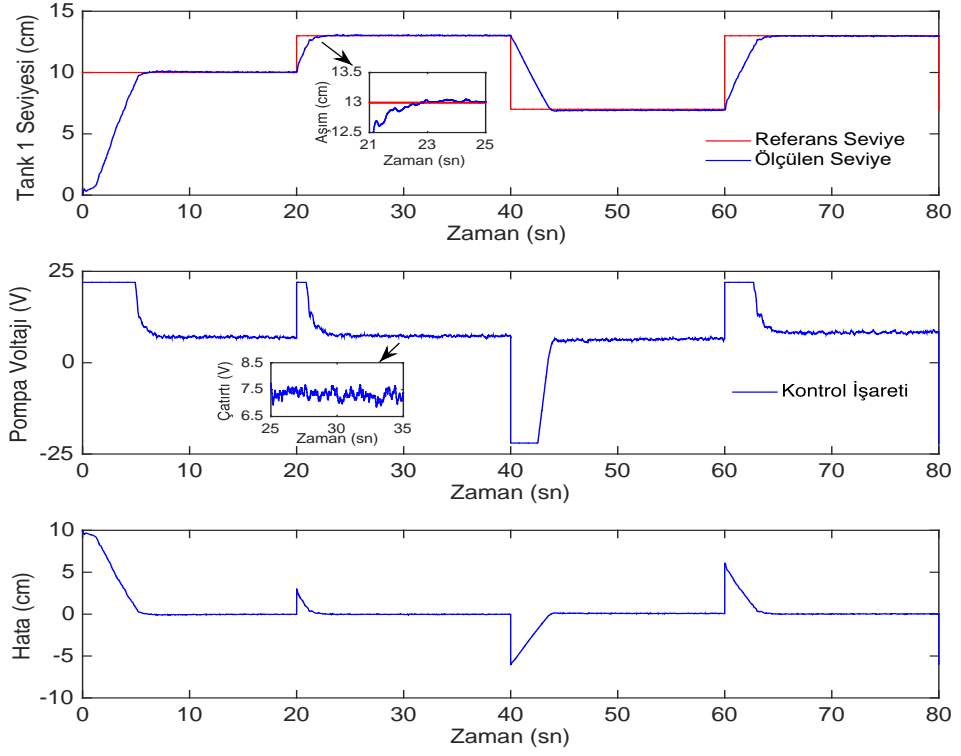
4.1. Tek Tank Konfigürasyonu için Klasik PI Kontrolcü ve Kesir Dereceli PI Kontrolcüye Ait Bulgular

Tek tankın kontrolünün gerçekleştirildiği konfigürasyonda, sıvı seviye kontrolünü gerçekleştirmek adına sisteme klasik PI kontrolcü ve KDPI kontrolcü uygulanmıştır.

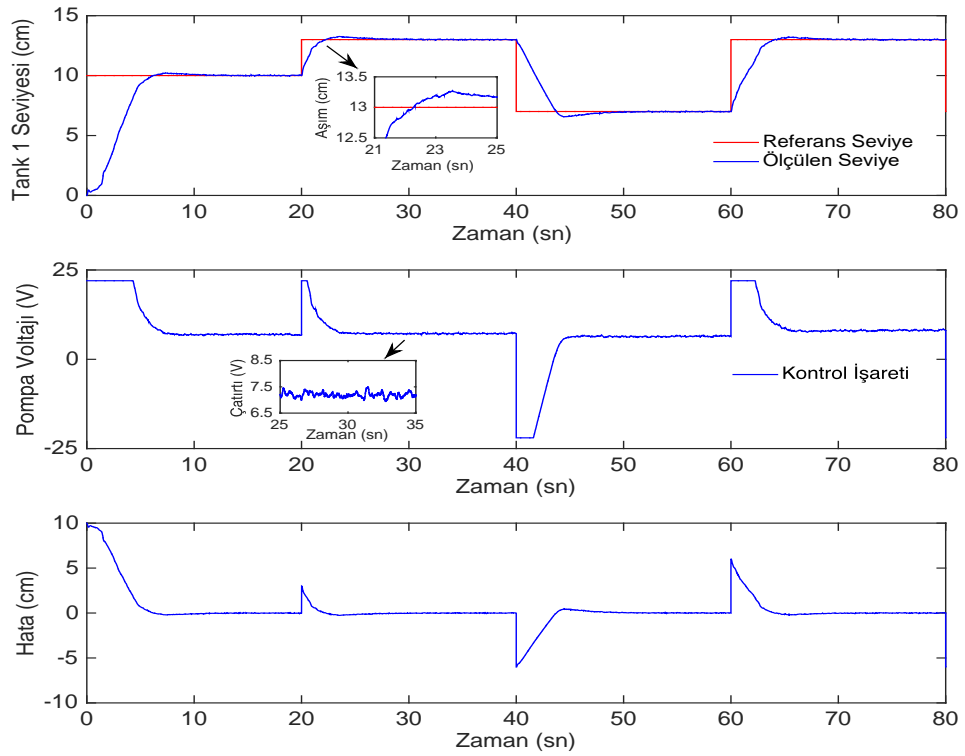
İlk olarak sabit + kare referans işareti için kontrolcü performansları incelenmiş ve deneysel sonuçlar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. PI kontrolcünün, ilk 20 saniyede sisteme uygulanan sabit referans işareti için KDPI kontrolcü ile hemen hemen aynı yükselme zamana sahip olmasına rağmen KDPI kontrolcüye oranla daha büyük bir aşım yaptığı ve KDPI kontrolcüye göre daha geç bir yerleşme zamanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ardından, sisteme 20 ila 80 saniyeleri arasında zamanla değişen ve ani değişim içeren kare referans işareti uygulanmıştır. PI kontrolcünün, KDPI kontrolcüye göre daha geç yükselme zamanına sahip olduğu ve devamında kare referansın sabit ilerlediği kısımlarda KDPI kontrolcüye oranla daha büyük bir aşım yaparak referans işareti takip etmekte zorlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, KDPI kontrolcünün referans işaretin ani değişim noktalarında referans işareti takip etme adına daha uygun kontrol işareti ürettiğini ve bundan dolayı PI kontrolcüye göre hatayı daha iyi elimine ettiği ve daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Ardından, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi sisteme sabit + sinüzoidal referans işareti altında sırasıyla KDPI ve PI kontrolcüler uygulanmıştır. Sisteme 0 ila 15'inci saniyeler arasında sabit referans işareti uygulanmış ve PI kontrolcünün, KDPI kontrolcü ile hemen hemen aynı yükselme zamanına sahip olduğu ancak, PI kontrolcünün aşım yaptığı gözlemlenmiştir. KDPI kontrolcünün ise hemen hemen hiç aşım yapmadığı ve PI kontrolcüye göre daha küçük yerleşme zamanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, sisteme 15 ila 60'ıncı saniyeler arasında zamanla sürekli değişim içeren ve daha yumuşak geçişlere sahip olan sinüzoidal referans işareti uygulanmıştır. PI kontrolcünün sinüzoidal referans işaretinin tepe noktalarındaki geçişlerde hafif aşım yaptığı görülmüştür. KDPI kontrolcü ise uygulanan referans işareti daha iyi takip ettiği ve neredeyse hiç aşım yapmadığı gözlemlenmiştir.

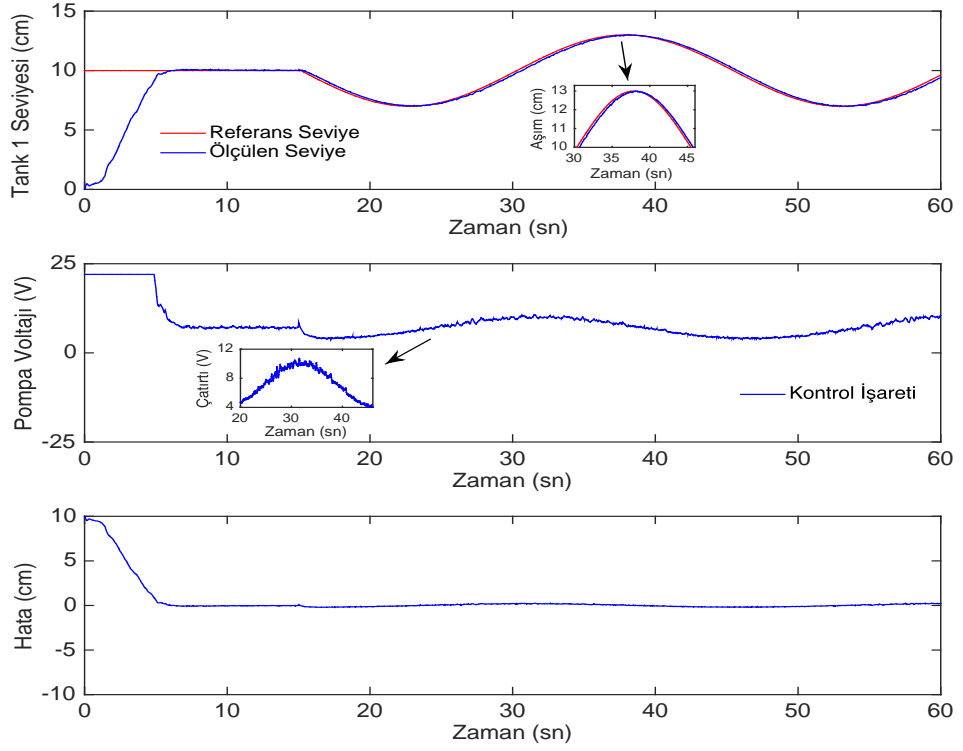
Son olarak, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi sisteme sabit + testere referans işareti altında sırasıyla KDPI ve PI kontrolcüler uygulanmıştır. Sisteme 0 ila 20'inci saniyeler arasında sabit referans işareti uygulanmıştır. Uygulanan sabit referans işaretinde PI kontrolcünün aşım yaptığı görülmüş, KDPI kontrolcü ile kıyaslandığında daha büyük yerleşme zamanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. KDPI kontrolcü ise neredeyse hiç aşım yapmayarak referans işareti yakaladığı ve devamında daha kısa sürede referansa oturduğu gözlemlenmiştir. Ardından, 20 ila 80'inci saniyeler arasında sisteme ani değişim içeren ve devamında sürekli değişim içeren testere işareti uygulanmıştır. PI kontrolcünün, referans işaretinin ani değişim içeren kısmında KDPI kontrolcüye göre daha fazla aşım yaptığı görülmüştür. Ayrıca, KDPI kontrolcü daha kısa zamanda yükseldiği ve devamında daha kısa sürede referans işareti yakaladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, her iki kontrolcü benzer genlik ve formda kontrol işareti üretmelerine rağmen referans işareti takip etme adına ani değişim noktalarında KDPI kontrolcünün daha uygun kontrol işareti ürettiğini ve bundan dolayı PI kontrolcüye göre hatayı daha iyi elimine ettiği ve daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.



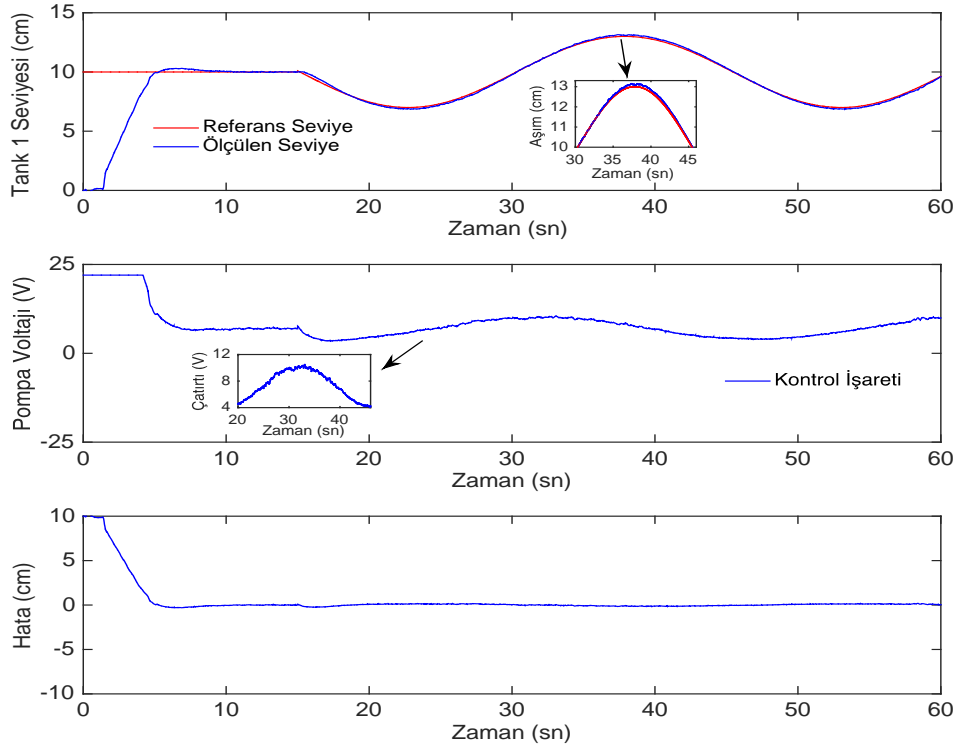
Şekil 4.1. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + kare referans sonuçları



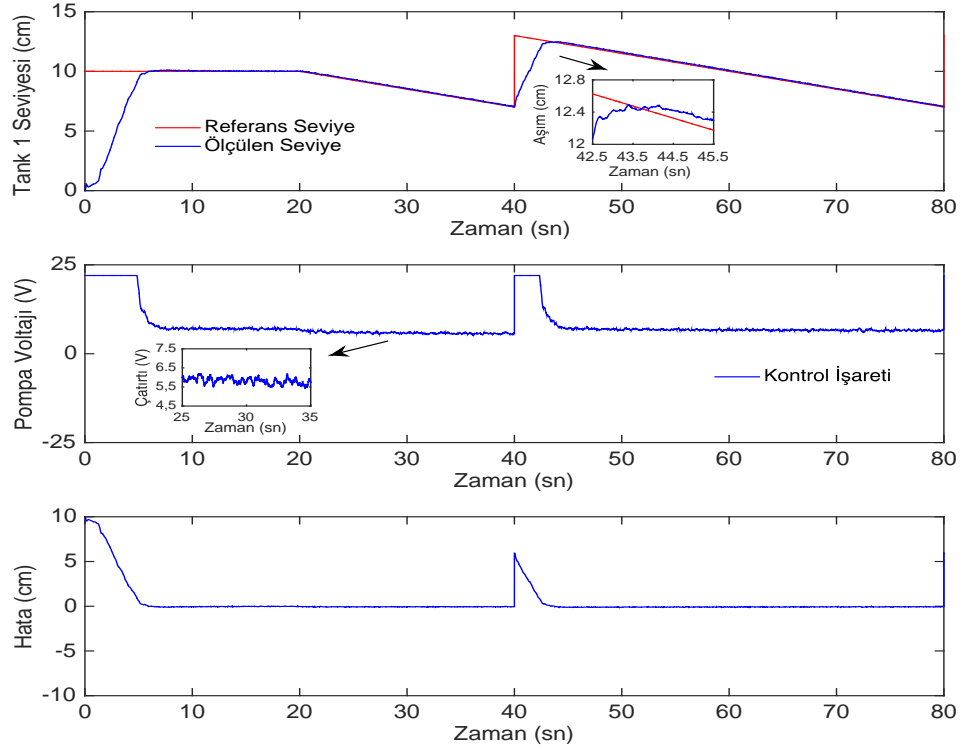
Şekil 4.2. Tek tank PI kontrolcü için sabit + kare referans sonuçları



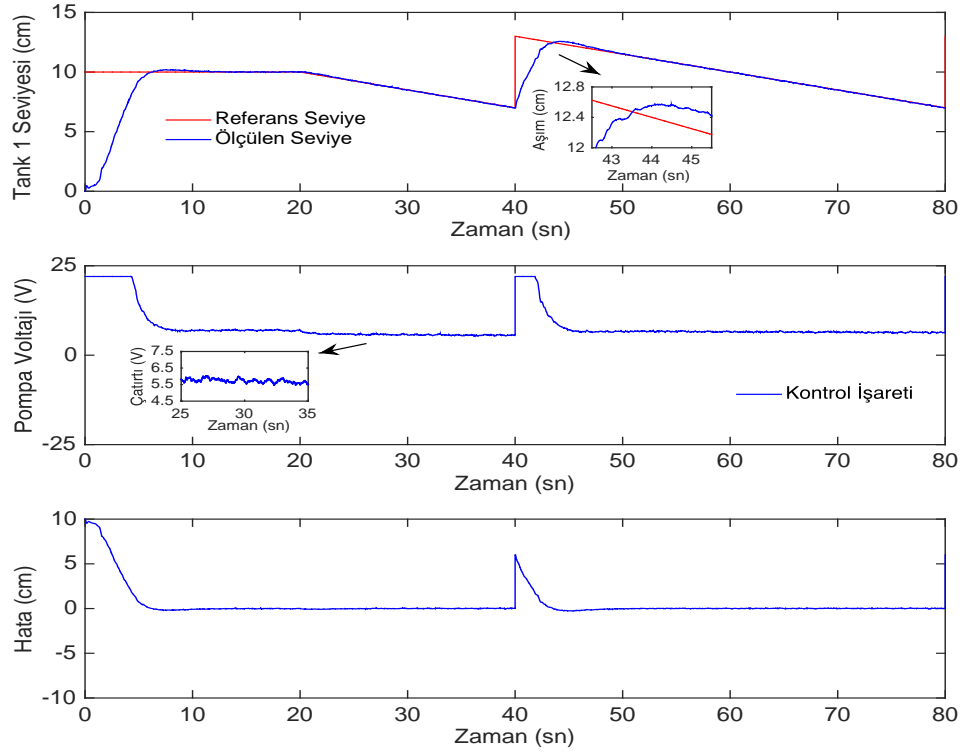
Şekil 4.3. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.4. Tek tank PI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.5. Tek tank KDPI kontrolcü için sabit + testere referans sonuçları



Şekil 4.6. Tek tank PI kontrolcü için sabit + testere referans sonuçları

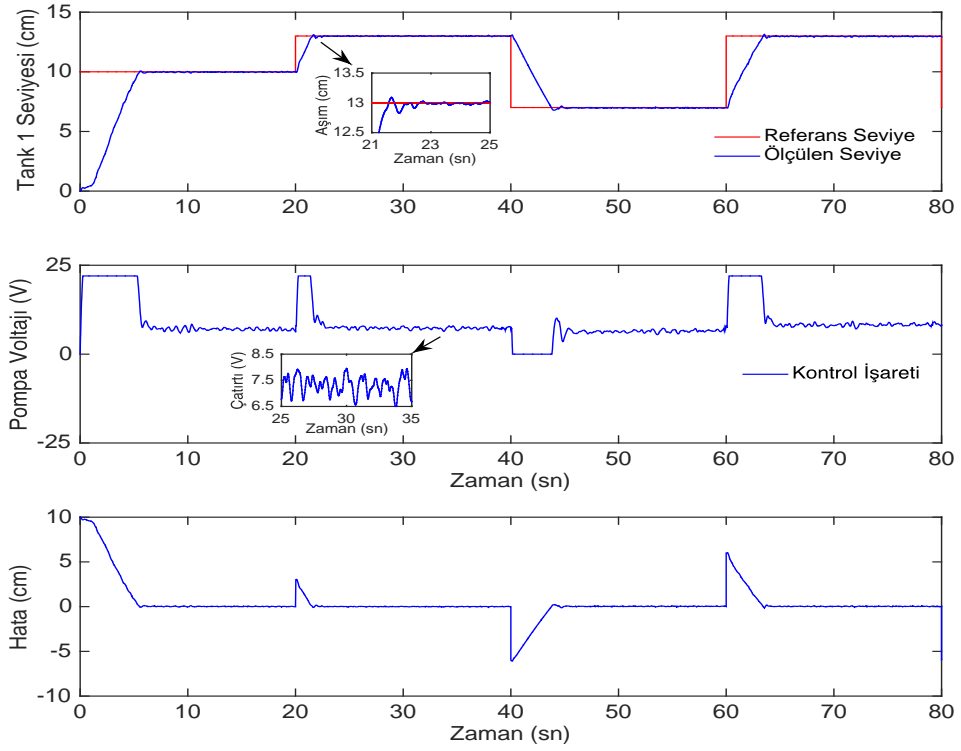
4.2. Tek Tank Konfigürasyonu İçin Kayan Kipli Kontrolcü ve Kesir Dereceli Kayan Kipli Kontrolcü ile İlgili Bulgular

Tek tankın kullanıldığı konfigürasyonda sıvı seviye kontrolünü gerçekleştirmek adına sisteme KKK ve KDKKK metotları uygulanmıştır.

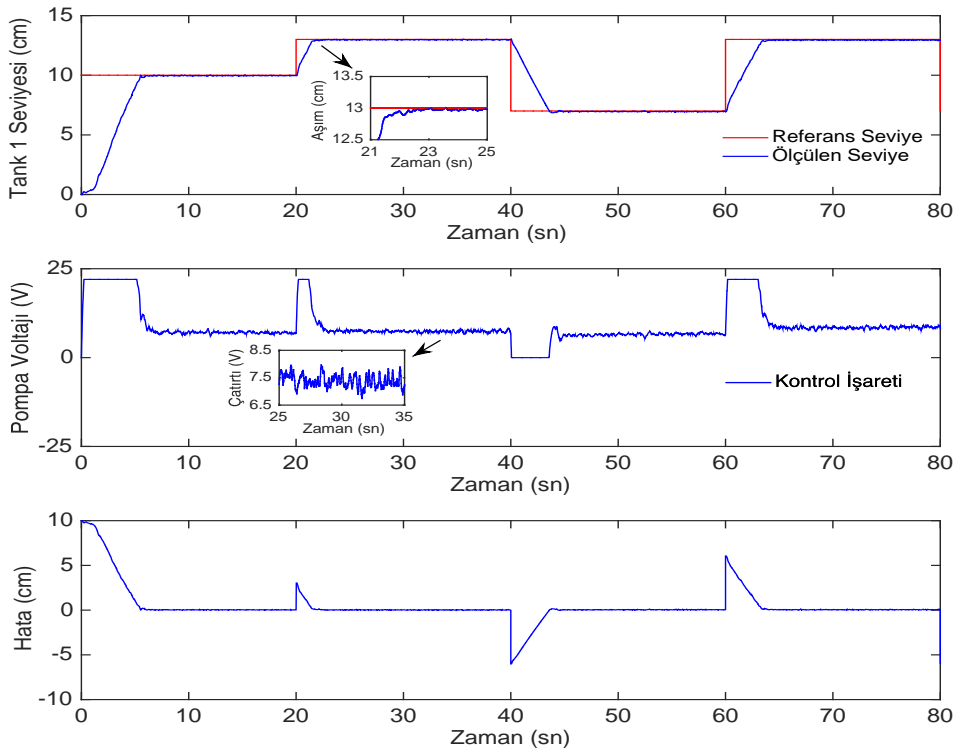
İlk olarak sabit + kare referans işareti için kontrolcü performansları incelenmiş ve deneysel sonuçlar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Sisteme ilk olarak 0 ila 20’inci saniyeler arasında sabit referans işareti uygulanmıştır. Sabit referans işareti için her iki kontrolcünün hemen hemen aynı yükselme zamanı ve yerleşme zamanına sahip olduğu ve benzer bir performans göstererek başarılı bir şekilde referans takibi gerçekleştirdikleri görülmüştür. Daha sonra sisteme 20 ila 80 ‘inci saniyeler arasında ani değişim içeren kare referans işareti uygulanmıştır. KDKKK’nin daha kısa sürede yükseldiği ve hafif aşım ve salınım yaparak referans işareti yakaladığı ancak, KKK’nin daha geç yükseldiği ve devamında referans işareti takip etmekte zorlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca KDKKK, KKK ile kıyaslandığında daha az çattırtı içeren kontrol işareti ürettiği görülmüştür. KDKKK’nin sistemde meydana gelen hataları daha iyi elimine ettiği ve KKK ile kıyaslandığında, daha başarılı referans takibi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Ardından, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sisteme sabit + sinüzoidal referans işareti altında sırasıyla KDKKK ve KKK uygulanmıştır. Sisteme ilk olarak 0 ila 15’inci saniyeler arasında sabit referans işareti uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, her iki kontrolcünün yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve referans takip başarısı bakımından benzer performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Daha sonra, sisteme 15 ila 60’inci saniyeler arasında yumuşak formda ve sürekli değişim içeren sinüzoidal referans işareti uygulanmış ve her iki kontrolcünün yine benzer şekilde referans takibi gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Ancak, her iki kontrolcünün ürettiği kontrol işaretleri incelendiğinde, KDKKK’nin KKK’ye göre daha az çattırtı içeren kontrol işareti ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki kontrolcünün sistemde meydana gelen hatayı iyi bir şekilde elimine etmeyi başardığı gözlemlenmiştir.

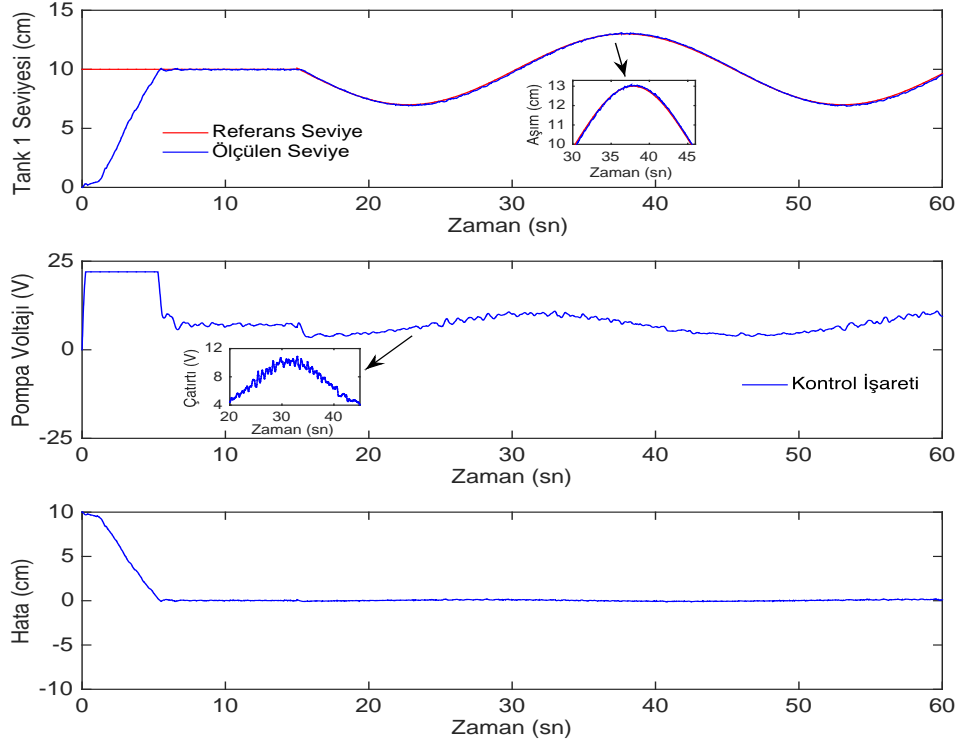
Son olarak, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sisteme sabit + testere referans işareti altında sırasıyla KDKKK ve KKK uygulanmıştır. Sisteme ilk olarak 0 ila 20’inci saniyeler arasında sabit referans işareti uygulanmıştır. Sabit referans altında her iki kontrolcünün hemen hemen aynı performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Ardından, 20 ila 80’inci saniyeler arasında sisteme testere referans işareti uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, ani değişimin meydana geldiği noktada KDKKK ile KKK’nin hemen hemen aynı yükselme zamanına sahip olduğu ancak, referans işaretin sürekli değişim içeren kısmında, KDKKK’nin çok az sapmalarla birlikte referans işareti başarılı bir şekilde takip ettiği, KKK’nin ise referans işareti yakaladıktan sonra aşım yaparak referans işareti takip etmekte zorlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki kontrolcünün aynı formda kontrol işareti üretmelerine rağmen, KDKKK’nin daha az çattırtı içeren kontrol işareti ürettiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, her iki kontrolcünün sistemde meydana gelen hataları istenilen seviyede elimine edebildiği gözlemlenmiştir.



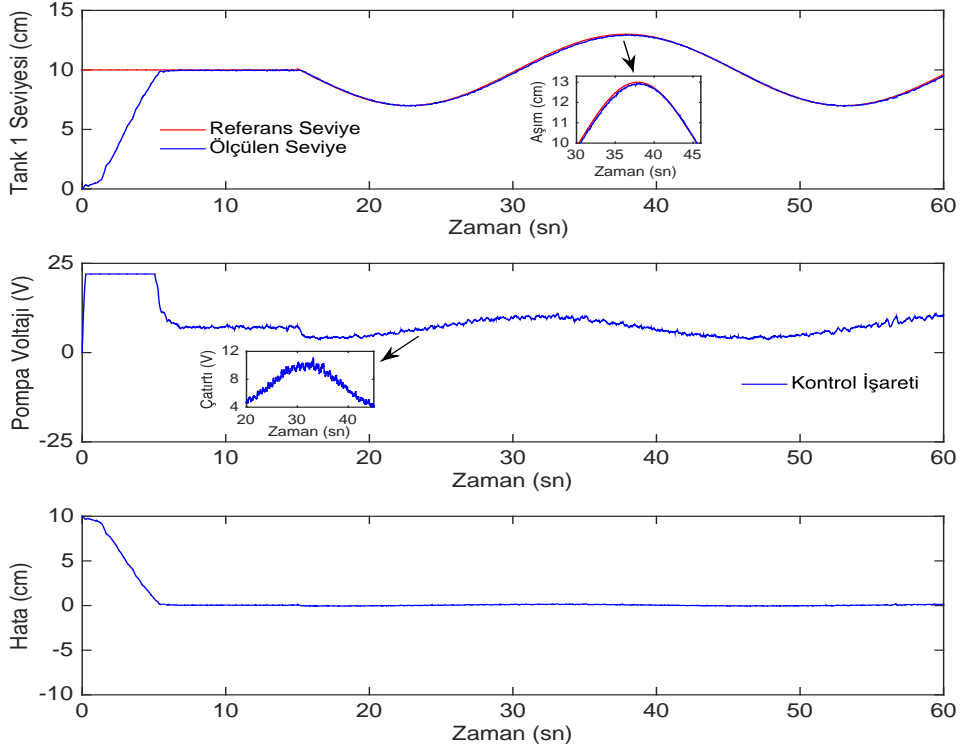
Şekil 4.7. Tek tank KDKKK için sabit + kare referans sonuçları



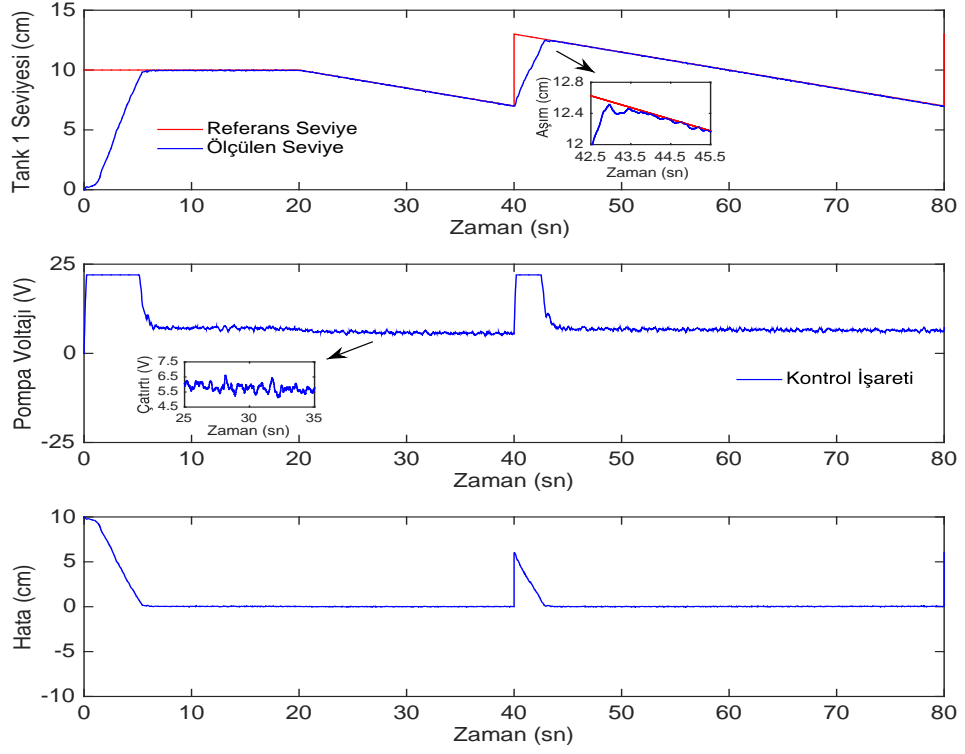
Şekil 4.8. Tek tank KKK için sabit + kare referans sonuçları



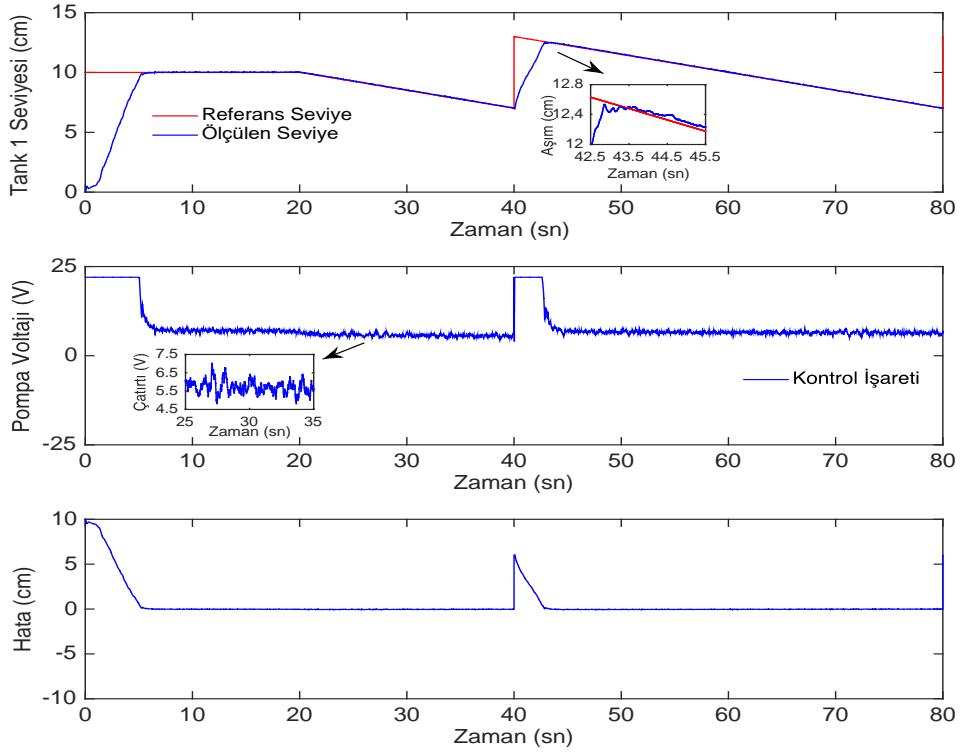
Şekil 4.9. Tek tank KDKKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.10. Tek tank KKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.11. Tek tank KDKKK için sabit + testere referans sonuçları



Şekil 4.12. Tek tank KKK için sabit + testere referans sonuçları

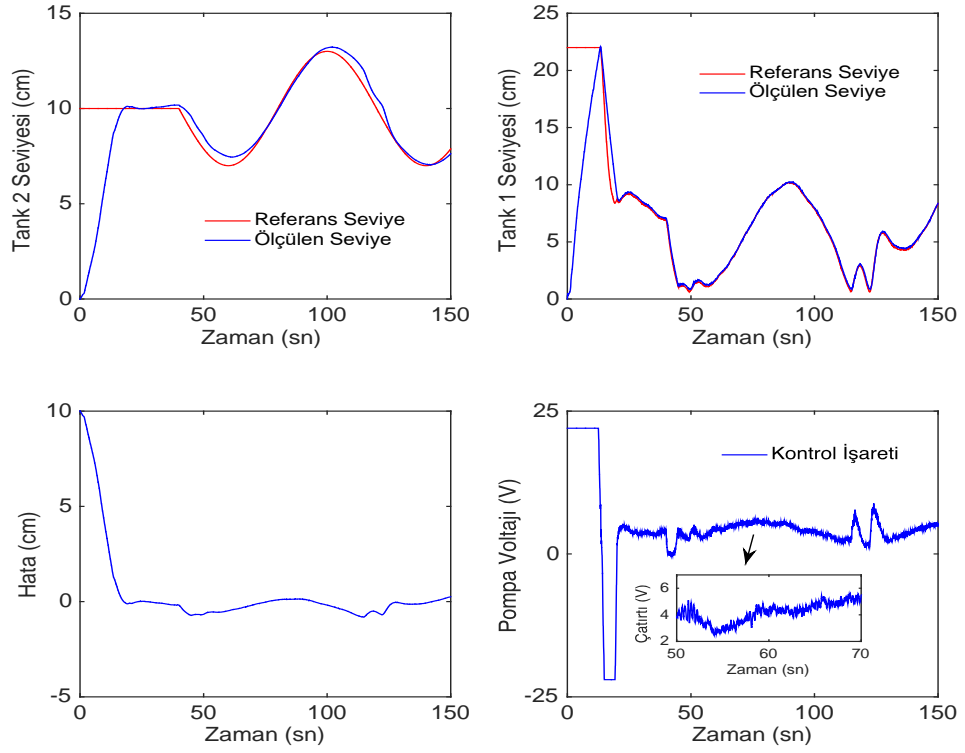
4.3. İkili Tank Konfigürasyonu İçin Klasik PI Kontrolcü, Kesir Dereceli PI Kontrolcü, Kayan Kipli Kontrolcü ve Kesir Dereceden Kayan Kipli Kontrolçülere Ait Bulgular

İkinci tankın kullanıldığı bu konfigürasyonda amaç, alt kısımda bulunan tankın sıvı seviye kontrolünü sağlamak adına üstte bulunan tankın sıvı seviyesi için ihtiyaç duyulan pompa voltajının elde etmektir. Bu konfigürasyon için sıvı seviye kontrolünü gerçekleştirmek adına sisteme PI, KDPI, KKK ve KDKKK metotları uygulanmıştır.

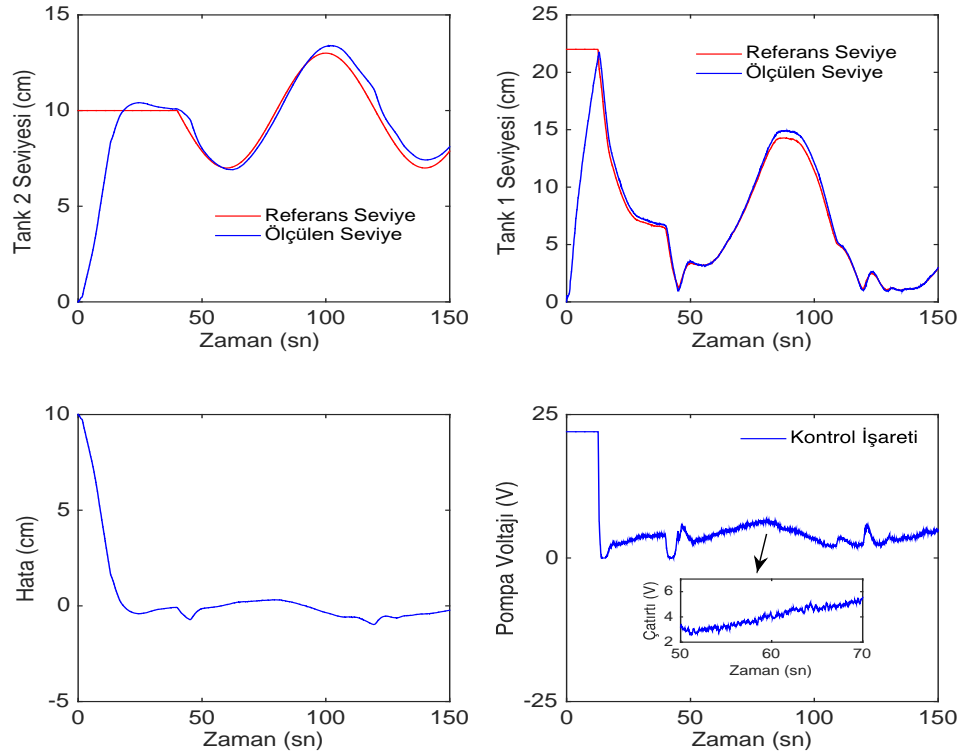
İlk olarak, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sisteme sabit + sinüzoidal referans işareti için sırasıyla KDPI ve PI kontrolcüler uygulanmıştır. Şekil 4.13 incelendiğinde, referans işaretin sabit olduğu kısımda, KDPI kontrolcünün küçük bir aşım yaptıktan sonra referansı yakaladığı ve meydana gelen hatayı elimine edebildiği görülmektedir. Ancak PI kontrolcünün, sabit referansı takip etmekte zorlandığı ve meydana gelen kararlı hal hatasını elimine edemediği görülmektedir. Daha sonra, referans işaretin zamanla değişen kısmında ise her iki kontrolcünün de sinüzoidal referansı takip etmekte zorlandığı ancak, KDPI kontrolcünün meydana gelen hataları ve kopmaları toparlayarak referans takibini PI kontrolcüye göre daha başarılı şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, KDPI kontrolcü tank 1'in ihtiyacı olan sıvı seviyesini PI kontrolcüye göre daha iyi seviyede ayarlayarak, tank 2'nin ihtiyacı olan sıvı seviyesini daha başarılı şekilde sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, PI kontrolcü daha yumuşak kontrol işareti üretmesine rağmen, KDPI kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol işaretinin sistemde meydana gelen hataları daha iyi elimine ettiği gözlemlenmiştir.

Son olarak, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterildiği gibi sisteme sabit + sinüzoidal referans işareti için sırasıyla KDKKK ve KKK uygulanmıştır. Şekil 4.15 incelendiğinde, sabit referans işareti için KDKKK'nin yükselme zamanı ve yerleşme zamanı bakımından KKK'den daha iyi olduğu ve hafif aşım yaptıktan sonra referansı yakaladığı ve meydana gelen hatayı elimine edebildiği görülmüştür. Ancak KKK'nin aşım yapmamasına rağmen sabit referansı takip etmekte zorlandığı ve devamında meydana gelen hatayı elimine edemediği görülmüştür. Referans işaretin zamanla

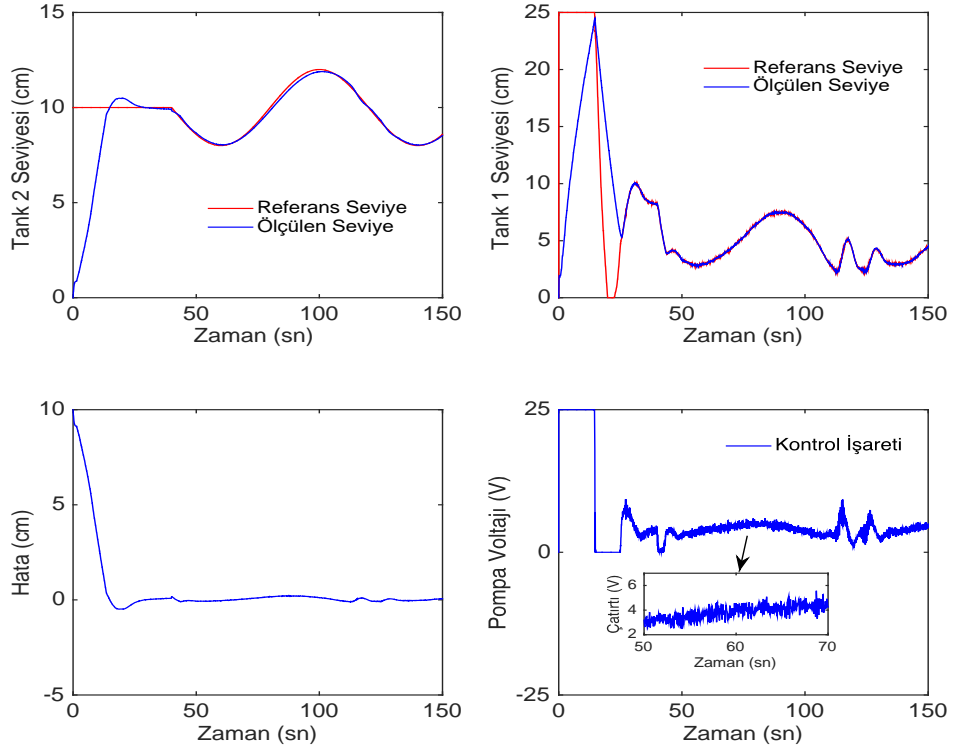
değişim gösteren kısmında ise KDKKK'nin sinüzoidal referansı başarıyla takip ettiği ve meydana gelen hataları elimine etmekte KKK'ye oranla daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. KKK'nin sinüzoidal referansı takibinde sapmalar meydana geldiği, referansı takip etmekte zorlandığı ve KDKKK' ye oranla referans takibinde daha başarısız olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, her iki kontrolcünün tank 1'in ihtiyacı olan sıvı miktarını başarıyla sağladıkları gözlemlenmiştir. Ancak, tank 2 için sıvı girişini KDKKK'nin KKK'ye oranla daha başarılı bir şekilde sağladığı görülmüştür. Ayrıca, KDKKK'nin sistemde meydana gelen hataları daha iyi elimine ettiği ve daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. KKK, KDKKK'ye göre daha az çattırlı kontrol işareti üretmesine rağmen, referans takibi ve sistemde meydana gelen hataları elimine edebilme bakımından yetersiz kaldığı görülmüştür.



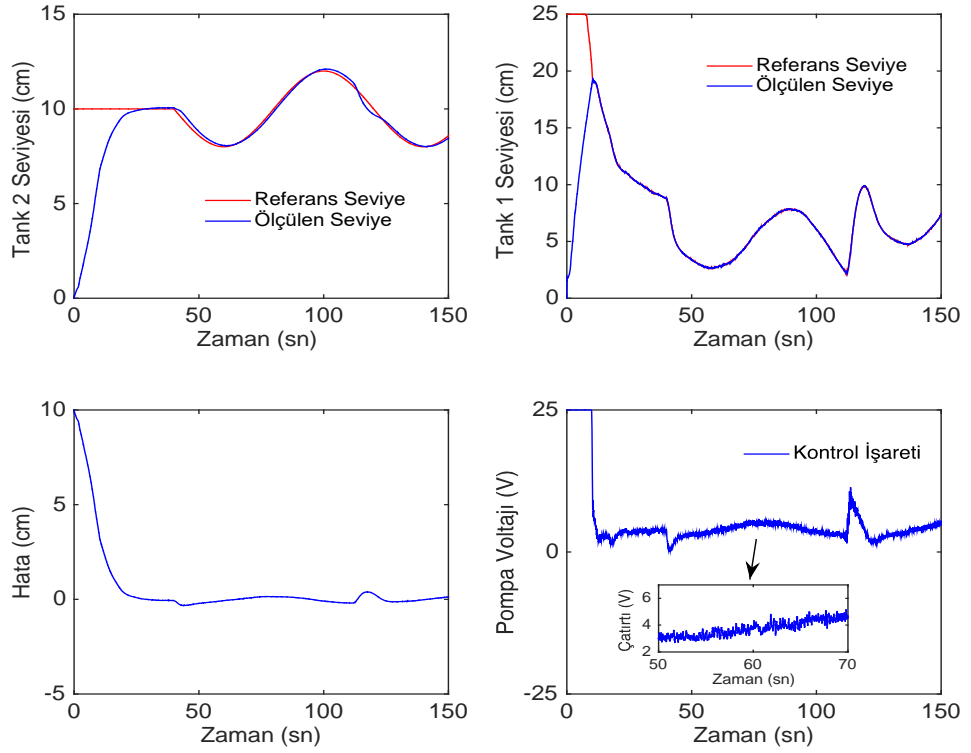
Şekil 4.13. İkili tank KDPI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçlar



Şekil 4.14. İkili tank PI kontrolcü için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.15. İkili tank KDKKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları



Şekil 4.16. İkili tank KKK için sabit + sinüzoidal referans sonuçları

5. SONUÇ

İkili tank sıvı seviye sistemine klasik PI, KDPI, KKK ve KDKKK kontrolcüler gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Sıvı seviye kontrolü için iki farklı konfigürasyon ele alınmış olup ilk konfigürasyonda üstteki tankın sıvı seviyesi kontrol edilmiş, ikinci konfigürasyonda ise alttaki tankın sıvı seviye kontrolü üstteki tank vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar farklı referanslar için yükselme zamanı, hatayı elimine etme başarısı, sistemde meydana gelen değişimlere tepki süreleri ve referans takip başarısı gibi yönlerden kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, KDPI kontrolcü her iki konfigürasyon için klasik PI kontrolcüye oranla sistemde meydana gelen hataları daha iyi elimine ettiği ve daha iyi referans takibi sağladığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan tek tank konfigürasyonunda KDKKK'nin KKK'ye göre daha başarılı bir performans gösterdiği ve daha çattırsız kontrol işareti ürettiği gözlemlenmiştir. İkinci konfigürasyon incelendiğinde KDKKK'nin KKK'ye oranla daha iyi referans takibi sağladığı, özellikle referans sinyalin zamanla değişim gösteren kısımlarında sistemi başarılı bir şekilde referans işareti takip etmeye zorladığı ve meydana gelen hataları elimine edebildiği gözlemlenmiştir. KKK ise, zamanla değişim içeren referans sinyalini takip ederken meydana gelen sapmaları elimine edemediği görülmüştür. Ayrıca, KDKKK daha iyi yükselme zamanına sahip olmakla birlikte, aşım yapmasına rağmen sabit referans işaretini yakaladığı, KKK'nin ise sabit referans işareti takip etmekte daha fazla zorlandığı görülmüştür. Bunun yanında, KDKKK'nin KKK'ye oranla sistemin ihtiyacı olan kontrol işaretini üretirken daha çattırtılı işaret ürettiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak gerek tek tank gerekse de ikili tank konfigürasyonunda KDKKK'nin diğer uygulanan kontrolcülere oranla gerek yükselme zamanı gerekse de hata eliminasyonu ve aşım açısından en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Ardından KKK'nin en iyi performansı sağladığı ve son olarak ta KDPI kontrolcünün performansının PI kontrolcüye göre iyi olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abbas, H., Asghar, S., and Qamar, S., 2012. Sliding mode control for coupled-tank liquid level control system. IEEE 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, India.
- Aoun, M., Malti, R., Levron F. and Oustaloup, A., 2003. Numerical simulation of fractional systems. ASME 2003 Design Engineering Technical Conference Chicago, Illinois, USA.
- Atan, Ö., Türk, M., ve Tuntaş, R., 2009. Serbest uyarımlı bir DC motorun $PI^{\lambda}D^{\mu}$ hız denetimi ve kesir dereceli denetleyicilerin performans analizi. SAÜ Fen bilimleri Dergisi, 13.cilt 1.sayı s.34-41.
- Başçi, A. ve Derdiyok, A., 2016. Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system, Measurement, 91, 12-18.
- Başçi, A., 2013. Otomatik yönlendirmeli bir aracın gövde hızı ve gövde açısının gerçek zamanlı kontrolü. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Benayache, R., Chifi-Alaoui L., Dovifaaz X. and Bussy P., 2009. Real-time nonlinear adaptive backstepping liquid level control for a state coupled three tank system. Proceedings of the European Control Conference. Budapest, Hungary
- Benayache, R., Chifi-Alaoui, L., Bussy, P. and Castelain, J.M., 2009. Design and implementation of sliding mode controller with varying boundary layer for a coupled tanks system. 17th Mediterranean Conference on Cont. & Aut. Thessaloniki, Greece.
- Bhambhani, V., and Chen, Y.Q., 2008. Experimental study of fractional order proportional integral (FOPI) controller for water level control. 47th.IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico.
- Boonsrimuang, P., Numsomran, A., and Kangwanrat, S., 2009. Design of PI controller using MRAC techniques for couple-tanks process. World Academy of Science Engineering and Technology, 3(11), 1385-1390.
- Calderón, A., Vinagre, B.M. and Feliub, V., 2006. Fractional order control strategies for power electronic buck converters. Signal Process, 86(10), 2803-2819.
- Calofir, V., Tanasa, V., Fagarasan, I., Stamatescu, I., Arghira, N. and Stamatescu, G., 2013. A backstepping control method for a nonlinear process- two coupled-tanks. CIEM.
- Camacho, O., Smith, C., and Moreno, W., 2003. Development of internal model sliding mode controller. Industrial & Engineering Chemical Research, 42(3), 568-573.
- Can, K., Sekban, H.T., ve Başçi, A., 2016. Dörtlü tank sıvı-seviye sisteminin kayan kipli kontrolcü ile kontrolü. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eskişehir.
- Caponetto, R., Dongola, G., Fortuna, L., and Petras, I., 2010. Fractional order systems Modeling and Control Applications. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN-13 978-981-4304-19-1.
- Chaoraingern, J., Numsomranana, A, Suesut, T. and Trisuwannawat, T., 2005. PID controller design using characteristics ratio assignment method for coupled tank process. IEEE Conference on Computational Intelligence for Modeling Control and Automation, Vienna, Austria.

- Dalir, M., and Bashour, M., 2010. Applications of fractional calculus. *Applied Mathematical Sciences*, 4(21), 1021-1032.
- Derdiyok, A. ve Başçı, A., 2013. The application of chattering-free sliding mode controller in coupled tank liquid-level control system. *Korean J. Chem. Eng.*, 30(3), 540-545.
- Divya, S., and Anbumalar, P., 2014. Modelling and simulation study on fractional and integer order PI controller for a SISO process. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 3(3), 369-373.
- Efe, M.Ö., 2010. Fractional order sliding mode control with reaching law approach. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 18(5), 731-747.
- Efe, M.Ö., 2011. Integral sliding mode control of a quadrotor with fractional order reaching dynamics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 33(8), 985–1003.
- Efe, M.Ö., and Kasnakoğlu, C., 2008. A fractional adaptation law for sliding mode control. *Int. J. Adapt. Control*, 22(10), 968-986.
- Eker, İ. ve Akınal, Ş.A., 2008. Sliding mode control with integral augmented sliding surface: design and experimental application to an electromechanical system. *Electrical Engineering, Cilt: 90*, 189-197.
- Eker, İ., 2006. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an alectromechanical plant. *ISA Transactions*, 45(1), 109-118.
- Faieghi, M.R., Delavari, H. and Baleanu, D., 2011. Control of an uncertain fractional-order Liu system via fuzzy fractional-order sliding mode control. *J. Vib. Control*, 18(9), 1366-1374.
- Fang, X., Shen, T., and Feng, X., 2009. The bang-bang control of water tank system based on fuzzy decision. *Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. Shenyang, China, China.
- Floquet, T., Spurgeon, S.K. and Edwards, C., 2010. An output feedback sliding mode control strategy for MIMO systems of arbitrary relative degree. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21(2), 119-133.
- Gaurav, and Kaur, A., 2012. Comparisons between conventional PID and fuzzy logic controller for liquid flow control: performance evaluation of fuzzy logic and PID controller by using MATLAB/SIMULINK. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 1(1), 84-88.
- Gou, W., 2008. Research of intelligent PID and its application in the water level control. Heifei: Anhui Agricultural University.
- Gouta, H., Said, S.H., Barhoumi, N., and M'Sahli, F., 2015. Observer based backstepping controller for a state-coupled two-tank system. *IETE Journal of Research*, 61 (3), 259-268.
- Holić, I., and Veselý, V., 2011. Robust PID controller design for coupled tank process. *18th International Conference on Process Control*, Tatranská Lomnica, Slovakia.
- Hung, J.Y., Gao, W., and Hung, J.C., 1993. Variable structure control: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Elect.*, 40(1), 2–22.
- Ikhlef, A., Kihel, M., Boukhezzar, B., Mansouri, N. and Hobar, F., 2016. Online PID control of tank level system. *IEEE Global Engineering Education Conference*. Abu Dhabi, United Arab Emirates.

- Jian-Jun, Z., 2014. Design of Fuzzy control system for tank liquid level based on WinCC and Matlab. 13th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, Xian Ning, China.
- John, J.A., and Francis, R. M., 2015. Modelling and non-linear control design for coupled twin tank level process. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(8), 618-622.
- Kangwanrat, S., Tipsuwannaporn, V., and Numsomran, A., 2010. Design of PI controller using MRAC techniques for coupled-tanks process. *International Conference on Control, Automation and Systems 2010*, Gyeonggi-do, Korea.
- Kaya, İ., 2007. Sliding-mode control of stable processes. *Industrial & Engineering Chemical Research*, Cilt: 46, 571-578.
- Keerthana, P.G.K., and Gnanasoundharam, J., 2016. Comparison of PI controller, model reference adaptive controller and fuzzy logic controller for coupled tank system. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(12), 1-5.
- Kızmaz, H., 2009. Asılı sarkacın kayma kipli kontrolü. M. Tur. thesis, Sakarya, Turkey.
- Levant, A., 2010. Chattering analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(6), 1380-1389.
- Liang, L., 2011. The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system. *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control*, Ningbo, China.
- Longand, Y., Li, L., 2015. Fuzzy fractional order sliding mode control for automatic clutch of vehicle AMT. *International Journal of Smart Home*, 9(2), 53-68.
- Mahapatro, S.R., Subudhi, B., and Ghosh, S., 2014. Adaptive fuzzy PI controller design for coupled tank system: a experimental validation. *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, Kanpur, India.
- Mahmood, A.K., and Taha, H.H., 2013. Design fuzzy logic controller for liquid level control. *International Journal of Emerging Science and Engineering*, 1(11), 23-26.
- Mahyuddin, M.N., Arshad, M.R., and Mohamed, Z., 2007. Simulation of direct model reference adaptive control on a coupled-tank system using nonlinear plant model. *International Conference on Control, Instrumentation and Mechatronics Engineering*, Johor Bahru, Johor, Malaysia.
- Mazidah, T., Mohd Hezri, F.R., Norhashim, M.A., and Ramli, A., 2013. Robust fractional-Order PI controller with Ziegler-Nichols rules. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 7(7), 1034-1041.
- Moshiri, B., Jalili-Kharaajoo, M., and Besharati, F., 2003. Application of fuzzy sliding mode based on genetic algorithms to control of robotic manipulators. *Emerging Technologies and Factory Automation*, Lisbon, Portugal, Portugal
- Na, G., Zhi-hong, Q., Hai-tao, W., 2012. Neutral speed stability control law of aircraft design based on fractional order PID μ . *2012 24th Chinese Control and Decision Conference*, Taiyuan, China.
- Nail, B., Bekhiti, B., Hafaifa, A., Kouzou, A. and Hadroug, N., 2015. Feedback linearizasyon and backstepping controlllers for coupled tanks. *Informatics Engineering, an International Journal*, 3(4). 1-17.
- Nguyen, D.K., 1998. Sliding mode control: advanced design techniques. PhD Thesis, University of Techology, Sydney, Australia.

- Nurnsomrarr, A., Suksri, T., and Thumma, M., 2007. Design of 2-DOF PI controller with decoupling for coupled-tank process. International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, South Korea.
- Oldham, K.B., and Spanier, J., 1974. The fractional calculus. Academic Press, USA.
- Oustaloup, A., 1981. Fractional order sinusoidal oscillators. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 28(10), 1007-1009.
- Oustaloup, A., 1990. Nouveau syst'eme de suspension: La suspension CRONE. INPI Patent 90 046.
- Oustaloup, A., 1991. La commande CRONE, Paris: Edition Hermes.
- Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B. and Nanot, F.M., 2000. Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. IEEE Trans CAS-I, 47(1), 25-39.
- Özdal, O., 2008. Model dayanaklı kayan kipli denetim. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe University, Ankara, Turkey.
- Palm, R., 1992. Sliding mode fuzzy control. Proceedings of the IEEE international conference on fuzzy systems, San Diego, USA.
- Pana, H., Wonga, H., Kapilla, V., and Quiroz, M., 2005. Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. Control Engineering Practice, 13(1), 27-40.
- Park, J.H., Lee, Y.J., 2003. Robust visual servoing for motion control of the ball on a plate. Mechatronics, 13, 723-738.
- Parvat, B.J, Jadhav, V.K., and Lokhande, N.N., 2013. Design and implementation of sliding mode controller for level control. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering, Jaysingpur.
- Podlubny, I., 1999. Fractional differential equations. New York: Academic Press.
- Podlubny, I., 1999. Fractional order systems and PID controllers. IEEE Transactions on Automatic control, 44(1), 208-214.
- Quanser-Two Tank Manuel, 2005.
- Ramkumar, V.P., and Varghese, E., 2015. Fractional order PID controller for liquid level system. International Journal of Engineering Research & Technology, 4(7), 698-701.
- Rhif, A., Kardous, Z. and Braiek, N. B., 2012. A PID-sliding mode control design for a coupled tank. International Conference CRATT'2012, Rades, Tunisia.
- Roy, P., Kar, B., Kumar, A. and Roy, B.K., 2016. Level control of two tank system by fractional order integral state feedback controller tuned by PSO with experimental validation. 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, Kolkata, India.
- Saad, M., Albagul, A. and Abueejela, Y., 2014. Performance comparison between PI and MRAC for coupled-tank system. Journal of Automation and Control Engineering, 2(3), 316-321.
- Samin, E.R., Jie, M.L., and Zawawi, A.M., 2011. PID implementation of heating tank in mini automation plant using programmable logic controller (PLC). International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering. Pahang, Malaysia.
- Sekban, H.T., Can, K., Orman, K., ve Başçi, A., 2016. Dörtlü tank sıvı-seviye sisteminin kesir dereceli PI kontrolcü ile kontrolü. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eskişehir, Türkiye.
- Sekban, H.T., Can, K., ve Başçi, A., 2016. İkili tank sıvı-seviye sisteminin PI ve geri

- adımlamalı kontrol yöntemleri ile kontrolü ve performans analizi, *Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Bursa, Türkiye.
- Sekban, H.T., Can, K., ve Başçi, A., 2016. Real time application of sliding mode controller for coupled tank liquid level system, *International Conference on Advanced Technology & Science*, Konya, Türkiye.
- Senthilkumar, K. and Vijula, D.A., 2015. Implementation of two-degree-of-freedom (2DOF) controller using coefficient diagram method (CDM) techniques for three tank interacting system. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(9), 90-96.
- Senthilkumar, K., Vijula, D.A. and Venkadesan, P., 2016. Performance analysis of two-degree-of-freedom controller and model predictive controller for three tank interacting system. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*, 2(5), 110-120.
- Senthilkumar, M., AbrahamLincon, Dr.S., and Selvakumar, P., 2011. Design of PI controller using characteristics ratio assignment method for coupled tank SISO procesa. *International Journal of Computer Application*, 25(9), 49-53.
- Singh, B., and Kumar, V., 2013. Design and simulation of auto tuning of PID controller using MRAC technique for coupled tanks system. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 6(14), 3037-3040.
- Soumya Ranjan, M., Bidyadhar, S. and Subhojit, G., 2016. PI controller design for a coupled tank system using LMI approach: an experimental study. *Chemical Engineering & Process Technology*, 7(1), 1-8.
- Sundaravadivu, K., Arun, B., and Saravanan, K., 2011. Design of fractional order PID controller for liquid level control of spherical tank. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia.
- Toms, T., and Hepsiba, D., 2014. Comparison of PID controller with a sliding mode controller for a coupled tank system. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(2), 151-154.
- Tunyasrirut, S., Suksri T., Numsomran, A., Gulpanich, S. and Tirasesth, K., 2007. The auto-tuning PID controller for interacting water level process. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 1 (12),763-767.
- Tustin, A., Allason, J. T., Layton, J. M., and Jakeways R. J., 1958. The design of systems for automatic control of the position of massive object. *Proc. Inst. Electr. Eng*, 105(1), 1-57.
- Utkin, V.I., 1977. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(2), 212-222.
- Valerio, D., and Costa, J. S., 2005. Time-domain implementation of fractional order controllers. *Control Theory and Applications*, *IEEE Proceedings* 152 (5), 539-552.
- Vinagre, B.M., Podlubny, I., Hernandez, A., and Feliu, V., 2000. Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 3(3), 231-248.
- Zhang, B., and PI, Y., 2012. Design of fractional order sliding mode controller based on parameters tuning. *Colleague of Automation Science and Engineering*, P.R. China.

Zhao, C., Xue, D., and Chen, Y.Q., 2005. A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Ont., Canada.

ÖZGEÇMİŞ

Hayriye Tuğba SEKBAN 1991 yılında Sürmene’de doğdu. İlköğretimini Sabancı İlköğretim Okulunda, lise eğitimini Erzurum Lisesinde tamamladı. 2009-2013 yıllarında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü okudu ve 2013 yılında üçüncülükle mezun oldu. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Kumanda Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans yapmaya başladı. Yüksek lisans çalışmaları sırasında ulusal ve uluslararası bildiri ve makaleler yayımladı.