



**GUNT RT512 SIVI SEVİYE SİSTEMİ DENETİMİNİN BULANIK GERİ  
ADIMLAMA KONTROL YÖNTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Nursel ŞAHİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2024**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nursel ŞAHİN

22/07/2024

# GUNT RT512 SIVI SEVİYE SİSTEMİ DENETİMİNİN BULANIK GERİ ADIMLAMA KONTROL YÖNTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Nursel ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, endüstriyel alanda kullanılan süreç denetim cihazlarına çok benzeyen GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazının denetim algoritmasına alternatif olarak, geri adımlamalı kontrol algoritması ve bulanık mantık ile optimize edilmiş geri adımlamalı kontrol algoritmasının geliştirilmesi ve gerçek zamanlı olarak uygulanması gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında, süreç denetiminde, bulanık mantık ve geri adımlamalı kontrol yöntemlerinin birleştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Süreç denetim sistemlerinin doğrusal olmayan yapıları ve belirsizlikler, geleneksel kontrol yöntemleriyle etkin bir şekilde yönetilememektedir. Bu bağlamda, bulanık mantık ve geri adımlamalı kontrol tekniklerinin entegrasyonu, kontrol performansını artırmak için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma kapsamında, ilk olarak geri adımlamalı kontrol stratejisinin temel ilkeleri ve bulanık mantık denetleyicisinin özellikleri incelenmiştir. Ardından, bu iki yöntemin entegrasyonu ile oluşturulan bulanık mantıklı geri adımlamalı kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, kontrol edilen sistemin dinamiklerine uygun olarak kontrol kazancını ayarlayarak, dinamik tepkileri iyileştirmiş, özellikle de geleneksel geri adımlamalı kontrol algoritmasının hızına karşılık en büyük dezavantajı olan kararlı durum hatalarını azaltmayı amaçlamıştır. Geliştirilen kontrol algoritmasının performansı, çeşitli benzetim ve deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Bu çalışmalar, algoritmanın farklı sistem koşullarında etkinliğini ve adaptif yeteneklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bulanık geri adımlamalı kontrolün, geleneksel geri adımlamalı kontrol yöntemlerine kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini ve kararlı durum hatalarını başarılı bir şekilde azalttığını göstermektedir. Bu tez, özellikle endüstriyel süreç denetimlerinde kullanılmak üzere esnek ve etkili bir kontrol mekanizması sunmaktadır. Geliştirilen yöntem, belirsizlikler ve doğrusal olmayan dinamikler içeren sistemlerin kontrolünde önemli avantajlar sağlayabilir.

Bilim Kodu : 93423

Anahtar Kelimeler : Geri adımlama, bulanık mantık, süreç denetimi, Lyapunov kararlılık

Sayfa Adedi : 68

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Meral ÖZARSLAN YATAK

# IMPLEMENTATION OF GUNT RT512 LIQUID LEVEL SYSTEM CONTROL WITH FUZZY BACKSTEPPING CONTROL METHOD

(M. Sc. Thesis)

Nursel ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

## ABSTRACT

In this thesis, as an alternative to the control algorithm of the GUNT RT512 liquid level controller, which is very similar to the process control devices used in the industrial field, the development and real-time implementation of a backstepping control algorithm and a backstepping control algorithm optimized with fuzzy logic has been realized. The thesis focuses on combining fuzzy logic and backstepping control methods in process control. The nonlinearity and uncertainties of process control systems cannot be effectively managed by conventional control methods. In this context, the integration of fuzzy logic and backstepping control techniques offers an innovative approach to improve control performance. In this study, the basic principles of the backstepping control strategy and the properties of the fuzzy logic controller are first analyzed. Then, a fuzzy logic backstepping control algorithm is developed by integrating these two methods. By adjusting the control gain in accordance with the dynamics of the controlled system, this algorithm improves the dynamic responses, and especially aims to reduce the steady-state errors, which is the biggest disadvantage of the conventional backstepping control algorithm in comparison to its speed. The performance of the developed control algorithm has been tested by various simulation and experimental studies. These studies were carried out to evaluate the effectiveness and adaptive capabilities of the algorithm under different system conditions. The results show that the fuzzy backstepping control outperforms the conventional backstepping control methods and successfully reduces the steady-state errors. This thesis presents a flexible and effective control mechanism for industrial process control. The developed method can provide significant advantages in the control of systems with uncertainties and nonlinear dynamics.

Science Code : 93423

Key Words : Backstepping, fuzzy logic, process control, Lyapunov stability

Page Number : 68

Supervisor : Asst. Prof. Meral ÖZARSLAN YATAK

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Meral ÖZARSLAN YATAK'a, tezim boyunca gösterdiği sabır, rehberlik ve destek için en derin şükranlarımı sunarım. Onun değerli katkıları ve bilgi birikimi, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Tez arkadaşım Fatih TATBUL'a, araştırma sürecinde sunduğu işbirliği, destek ve teşvik edici yaklaşımı için teşekkür ederim. Onunla birlikte çalışmak, bu süreci daha verimli ve keyifli kıldı.

Tez çalışmam sırasında sağladığı bilgi ve önerilerle büyük katkı sağlayan Arş. Gör. Çağdaş HİSAR'a teşekkür ederim.

Bu süreçte manevi desteklerini ve sevgilerini her an hissettiren aileme; babam Ali ŞAHİN'e, annem Hamide ŞAHİN'e, ablam Ayşe ÖZDEMİR'e, abim İsmail Engin ÖZDEMİR'e, kardeşlerim Mustafa ŞAHİN ve Zekiye ŞAHİN'e gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, tez sürecinde beni yalnız bırakmayan arkadaşlarım Dilek AĞGÖZ ile Ahmet BELEŞ'e moral ve motivasyon kaynaklarım oldukları için teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GUNT RT512 SIVI SEVİYE DENETİM SİSTEMİ.....	9
2.1. Sistemin Genel Yapısı.....	9
2.2. Sıvı Seviye Sistemi Elemanları.....	13
2.2.1. Denetleyici.....	13
2.2.2. Pnömatik oransal vana (I/P).....	14
2.2.3. Basınç regülatör ünitesi.....	15
2.2.4. Basınç/akım (P/I) dönüştürücü.....	16
2.2.5. Akım/basınç (I/P) dönüştürücüsü (pnömatik konumlandırıcı).....	16
2.2.6. Denetleyici arduino mega.....	17
2.2.7. Dijital analog dönüştürücü.....	17
2.2.8. Gerilim akım dönüştürücü devre.....	18
2.2.9. Akım gerilim (I/V) dönüştürücü.....	19
3. GERİ ADIMLAMALI KONTROL ALGORİTMASI.....	21
3.1. Lyapunov Kontrol Fonksiyonu.....	22
3.2. Geri Adımlama Yöntemi.....	22

4. BULANIK MANTIK KONTROLÜ.....	27
4.1. Bulanık Mantık Teorisi.....	27
4.2. Bulanık Mantık Denetiminin Genel Yapısı.....	27
4.2.1. Bulanıklaştırma birimi.....	28
4.2.2. Bilgi tabanı.....	30
4.2.3. Karar verme ünitesi.....	31
4.2.4. Durulaştırma.....	31
5. BULANIK GERİ ADIMLAMA KONTROLCÜ TASARIMI VE BENZETİMİ.....	33
5.1. GUNT RT512 Sıvı Seviye Denetim Sisteminin Matematiksel Modellenmesi.	34
5.2. Referans Yörüngesinin Belirlenmesi.....	38
5.3. Geri Adımlama Fonksiyonlarının Seçimi.....	39
5.4. Geri Adımlamalı Kontrolün Sıvı Seviye Sisteminin Üzerinde Uygulanması...	41
5.5. Bulanık Geri Adımlamalı Kontrolün Sıvı Seviye Sisteminin Üzerinde Uygulanması.....	43
5.6. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları.....	43
6. SIVI SEVİYE DENETİM CİHAZININ BULANIK GERİ ADIMLAMA KONTROLLÜNÜN GERÇEK ZAMANLI UYGULAMA SONUÇLARI.....	49
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	64
EK-1 GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin temel özellikleri.....	65
EK-2. Bulanık geri adımlama kontrol sisteminin yazılım akış şeması.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	68

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. $k_I$ kontrol fonksiyonu için kural tabanı.....	31
Çizelge 5.1. Denetleyiciler için performans parametreleri (benzetim sonuçları).....	48
Çizelge 6.1. Denetleyiciler için performans parametreleri (uygulama sonuçları).....	58



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. GUNT RT512 sıvı seviye sistemi.....	10
Şekil 2.2. GUNT RT512 işlem diyagramı.....	12
Şekil 2.3. UDC 5000 denetleyici.....	14
Şekil 2.4. Samson 3241-7 pnömatik oransal vana.....	14
Şekil 2.5. Pnömatik oransal vana akım/vana açıklığı grafiği.....	15
Şekil 2.6. Basınç regülatörü.....	16
Şekil 2.7. Cerabar PMC 133 basınç akım dönüştürücü.....	16
Şekil 2.8. Pnömatik konumlandırıcı.....	17
Şekil 2.9. Arduino mega 2560.....	17
Şekil 2.10. Voltaj izleyici ve DAC devresi.....	19
Şekil 2.11. Akım gerilim dönüştürücü devresi.....	19
Şekil 4.1. Bulanık mantık denetleyicinin yapısını içeren genel sistem blok diyagramı.....	28
Şekil 4.2. Hata için mantık kontrol girişi MF'leri , $e_1$ .....	29
Şekil 4.3. Hatadaki değişim için bulanık mantık kontrol giriş üyelik fonksiyonu, $e_2$ ..	29
Şekil 4.4. Bulanık mantık kontrol çıkışı $k_1$ kontrol fonksiyonu için tekil üyelik fonksiyonları .....	30
Şekil 5.1. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi kapalı çevrim blok diyagramı...	35
Şekil 5.2. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi.....	36
Şekil 5.3. Sistemin açık çevrimi kontrolü.....	38
Şekil 5.4. Sistemin GAK ve BGAK Simulink benzetim modeli .....	44
Şekil 5.5. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için sistem yanıtları.....	45
Şekil 5.6. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için sistem hata yanıtları.....	45

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.7. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi)...	46
Şekil 5.8. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi)..	47
Şekil 5.9. İzleme için sistem yanıtları.....	47
Şekil 6.1. Gömülü sistemin Simulink modeli.....	49
Şekil 6.2. GAK Gömülü sistemin Simulink alt modeli.....	50
Şekil 6.3. Tasarlanan GAK.....	50
Şekil 6.4. BGAK Gömülü sistemin Simulink alt modeli.....	50
Şekil 6.5. Tasarlanan BGAK.....	51
Şekil 6.6. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem cevabı.....	52
Şekil 6.7. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem cevabı.....	52
Şekil 6.8. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları.....	53
Şekil 6.9. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için iki yöntemin hata analizi.....	53
Şekil 6.10. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi).....	54
Şekil 6.11. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi).....	54
Şekil 6.12. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi).....	55
Şekil 6.13. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi).....	56
Şekil 6.14. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi).....	56
Şekil 6.15. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi).....	57

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>bar</b>	Bar
<b>cm</b>	Santimetre
<b>hz</b>	Hertz
<b>m</b>	Metre
<b>mA</b>	Miliamper
<b>mbar</b>	Milibar
<b>mm<sup>3</sup></b>	Milimetreküp
<b>mm<sup>2</sup></b>	Milimetrekare
<b>mm/s</b>	Milimetre/saniye
<b>kg</b>	Kilogram
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>L</b>	Litre
<b>L/dk</b>	Litre/dakika
<b>Vdc</b>	Doğru akım gerilimi

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>BGAK</b>	Bulanık geri adımlama kontrolü
<b>DAC</b>	Dijital Analog Dönüştürücü
<b>GAK</b>	Geri adımlama kontrolü
<b>I/P</b>	Akım Basınç Dönüştürücü
<b>I/V</b>	Akım Voltaj Dönüştürücü
<b>MAX</b>	En yüksek
<b>MF</b>	Üyelik Fonksiyonu
<b>MİN</b>	En düşük
<b>NB</b>	Negatif Büyük
<b>NM</b>	Negatif Orta

**Kısaltmalar****Açıklamalar****NS**

Negatif Küçük

**PB**

Pozitif Büyük

**PM**

Pozitif Orta

**PS**

Pozitif Küçük

**PWM**

Darbe Genişliği Modülasyonu

**P/I**

Basınç Akım Dönüştürücü

**V/I**

Voltaj Akım Dönüştürücü

**ZE**

Sıfır



## 1. GİRİŞ

Endüstriyel süreç kontrol sistemleri, modern üretim ve işlem süreçlerinin etkinliği ile güvenilirliği açısından önemli bir role sahiptir. Sıvı seviye kontrol sistemleri, su arıtma, kimyasal işleme, ilaç üretimi ve gıda endüstrisi gibi çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sistemlerin doğrusal olmayan dinamikler ve belirsizliklerle başa çıkması, mevcut kontrol yöntemlerinin yetersiz kaldığı noktada daha gelişmiş ve esnek kontrol stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

GUNT Hamburg firması uygulamalı mühendislik eğitimi için setler üreten bir firmadır. Bu firmanın üretmiş olduğu setlerden biri olan RT512 sıvı seviye kontrol cihazı, bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmaların koşturulduğu sistem olarak belirlenmiştir. Çünkü RT512 sıvı seviye kontrol cihazı, endüstride birebir kullanılan elemanlarla donatılmış bir cihazdır. Bu cihaz üzerinde bulunan tüm sensörler, pnömatik vana, pompa, endüstriyel denetleyici gibi tüm donanımlar, gerçek bir süreç denetim cihazı üzerinde görülebilecek elemanlardır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan GUNT RT512 sıvı seviye kontrol cihazı (deney seti) kullanılmıştır. Bu cihaz üzerinde, geliştirilen geleneksel geri adımlamalı kontrol (GAK) algoritması ve bulanık geri adımlamalı kontrol (BGAK) algoritması koşturularak sistem performansları değerlendirilmiştir.

Bulanık mantık ve GAK teorisi, doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde etkin çözümler sunan iki önemli yaklaşımdır. Bulanık mantık, belirsizlikleri ve bulanıklıkları modellemede üstünlük sağlarken, GAK, Lyapunov kararlılık teorisine dayalı olarak sistem kararlılığını garanti etmektedir. Bu iki yöntemin birleşimi, endüstriyel sıvı seviye kontrol sistemlerinde karşılaşılan sorunların üstesinden gelmek için ideal bir çözüm sunmaktadır.

Bu tez çalışması, mevcut kontrol yöntemlerinin sınırlılıklarını aşarak, sıvı seviye kontrol sistemlerinde daha yüksek doğruluk, kararlılık ve güvenilirlik sağlamayı amaçlamaktadır. Literatürde, doğrusal olmayan dinamikler ve belirsizliklerle başa çıkmak için BGAK yöntemine dair uygulamalı olarak yapılmış yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla yapılan araştırma, endüstriyel uygulamalarda doğrudan kullanılabilir

yeni bir kontrol stratejisi geliştirmeyi hedeflemektedir. Çalışmada, bulanık geri adımlamalı algoritma uygulanarak GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin performansının değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu yöntemin, diğer endüstriyel süreç kontrol uygulamalarına da adapte edilebilecek genel bir yaklaşım sunacağı öngörülmektedir.

Araştırmanın genel amacı, endüstriyel sıvı seviye kontrol sistemlerinde karşılaşılan doğrusal olmayan dinamikler ve belirsizlikler ile ilgili problemlerin çözümleri için BGAK yöntemini geliştirmektir. Bu yöntem, sıvı seviye kontrolünde yüksek doğruluk ve kararlılık sağlamak için geleneksel GAK ile bulanık mantık kontrolünün avantajlarını birleştirmektedir. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemine uygulanan yeni kontrol sistemi ve algoritma ile hem akademik hem de pratik uygulamalarda yüksek doğruluk ve kararlılık sağlayan bir kontrol stratejisi sunulması amaçlanmaktadır.

Bu bağlamda, araştırma hem nicel hem de nitel hedefler içermektedir. Nicel olarak, endüstriyel uygulamalarda yüksek doğruluk ve kararlılık sağlayan bir kontrol stratejisi sunmak amaçlanmaktadır. Nitel olarak ise, bu alandaki bilgi boşluğunu doldurmak ve endüstriyel kontrol sistemlerinin performansını artırmaya yönelik katkı sağlamak hedeflenmektedir.

Araştırmanın amaçlarında belirlenen veriler, sıvı seviye kontrol sistemlerinin dinamik performansını iyileştirmek için kullanılacaktır. Bu veriler, GAK algoritması ile bulanık mantık kontrol kurallarının birleşimi sonucu elde edilen performans artışını değerlendirmek için temel oluşturacaktır.

Sıvı seviye kontrol sistemlerinin denetiminin, doğrusal yapıda olmayan GAK tekniği kullanılarak özellikle benzetim çalışması şeklinde gerçekleştirildiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Calofir ve diğerleri tanklardaki sıvı seviyesi tepkisini kararlı hale getirmek ve istenilen performansı elde etmek için sistemin doğrusal olmama durumunu dikkate alan geri adımlama kontrol yöntemi geliştirmişlerdir [1]. Araştırmacılar MATLAB/Simulink kullanarak birleştirilmiş tank sisteminin doğrusal olmayan bir modelini tasarlamışlardır ve geleneksel GAK yönteminin bu sisteme nasıl uygulanacağını açıklamışlardır. Araştırma sonucunda, doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için geri adım atma stratejisinin etkinliğini ve bunun su arıtma vb. süreçlerdeki potansiyel uygulamalarını vurgulamışlardır.

Nail ve diğerleri doğrusal olmayan birleşik tank sistemini kontrol etmek için gelişmiş doğrusal olmayan kontrol algoritmalarının kullanımını araştırmışlardır [2]. Bu bağlamda, geri beslemeli doğrusallaştırma kontrolü ve GAK olmak üzere iki kontrol prosedürü önermişlerdir. Geri beslemeli doğrusallaştırma kontrolü, hızlı tepki, önemli bir aşmanın olmaması ve ihmal edilebilir bir hata normu ile küresel üstel asimptotik kararlılığa ulaşmada başarılı olmuştur. Öte yandan GAK, Lyapunov fonksiyonunun seçimini geri besleme kontrolü tasarımıyla birleştiren özyinelemeli bir prosedür ve diğer yöntemlere kıyasla izlemeyi, sağlam kontrolü koruduğu ve kararlılık sorunlarını daha az kısıtlayıcı koşullarla çözdüğü bulunmuştur. Birleşik tank sistemi endüstriyel süreçlerde, araştırma laboratuvarlarında ve çeşitli mühendislik alanlarındaki önemi nedeniyle bu çalışmanın odak noktası olarak seçilmiştir. Çalışmada sistem benzetim sonuçları, her iki kontrol şemasının da istenen yörünge izleme hedeflerine ulaştığını ve kapalı döngü sisteminin asimptotik kararlılığını sağladığını göstermiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlardan biri de, hem geri beslemeli doğrusallaştırma kontrolü hem de GAK için kararlılık analizi ve kontrol kazanımında katsayı seçiminin yanıltıcı olabileceği ve dikkatli seçilmediği takdirde kararsızlığa veya aşırı enerji kaybına neden olabileceğidir.

Meng ve diğerleri dış etkenlere maruz kalan iki tanklı bir sıvı seviye sistemi için, bozucu gözlemciye dayalı GAK yöntemini önermişlerdir [3]. Çalışmada, akışkanlar mekaniği ve kütle korunumu ilkelerine dayalı olarak sistemin matematiksel modeli çıkarıldıktan sonra izleme hatalarını sonlu zamanda sıfıra yakınsayarak sıvı seviyesi izleme performansını arttırmak için geri adımlama kontrol stratejisi tasarlanmıştır. Önerilen yöntemi doğrulamak için benzetim ve deneysel sonuçlar sunulmuştur. Önerilen kontrol stratejisinin, bozucu gözlemci tabanlı kayan modlu kontrol yöntemiyle karşılaştırıldığında, bozucu etkileri bastırmada daha etkili olduğu görülmüştür. Her iki tankın sıvı seviyesi eğrileri, önerilen yöntemle daha hızlı dinamik tepki ve daha iyi kararlı durum performansı sergilemiştir. Dört tanklı bir sistem üzerindeki deneysel sonuçlar, önerilen kontrol stratejisinin etkinliğini doğrulamıştır.

Safa ve diğerleri doğrusal olmayan iki tanklı bir sistem için tip-2 bulanık uyarlanabilir geri adımlamalı kontrolcü sunmuştur [4]. Doğrusal olmayan bir sistemin nominal modelini hesaplamamanın zorluğunu, tip-2 Takagi-Sugeno bulanık sistem ile aşmışlardır. Çalışmada, ayrıca doğrusal olmayan sistemler için geri adımlama ve kayan modlu kontrol yöntemlerinin

eksiklikleri de tartışılmıştır. Bu eksikliklerin giderilmesini tip-2 bulanık uyarlanabilir geri adımlamalı yöntemin benzetimi üzerinden sağlamışlardır.

John ve diğerleri, kimya mühendisliği sistemlerinde temel bir problem olan tanklardaki sıvı seviyesi ve akışının kontrolünü ele almışlardır [5]. Çalışmada, doğrusal olmayan bağlı tank sistemleri için seviye GAK stratejisi tanıtılmıştır. Kontrol algoritmasının amacı, birinci tanktaki sıvının akış hızını değiştirerek ikinci tanktaki istenen sıvı seviyesini takip etmektir. Tasarlanan doğrusal olmayan denetleyici ile istenen su seviyesi minimum aşma ve yüksek hız ile doğru bir şekilde takip edilmiştir. Benzetim sonuçları geleneksel bir Oransal-İntegral-Türev kontrol algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. GAK stratejisi, Oransal-İntegral-Türev denetleyicisine kıyasla herhangi bir aşım olmadan ve daha kısa yerleşme süresiyle daha iyi bir geçici yanıt sağlamıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, geri adımlama yönteminin geleneksel Oransal-İntegral-Türev denetleyiciye göre üstünlüğünü göstermiştir.

Gouta ve diğerleri, iki tanklı sıvı seviyesi sistemi için iki farklı kontrol yaklaşımının (model öngörülü kontrol ve GAK) tasarımını ve karşılaştırmasını sunmuşlardır [6]. Model öngörülü kontrol yaklaşımı, sistemin gelecekteki davranışını tahmin etmek ve tahmine dayalı olarak en uygun kontrol kararlarını vermek için bir model kullanmaktadır. Çalışmada, önerilen kontrol şemalarının verimliliğini ve uygulanabilirliğini vurgulamak için deneysel sonuçların yanı sıra teorik karşılaştırmalar da sunulmuştur. Her iki kontrol yönteminin kararlılığı ve sağlamlığı analiz edilip her yöntemin performansı, izleme hatası, yükselme süresi, yerleşme süresi ve kontrol girdisine göre değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçları, her iki kontrol yönteminin de sıvı seviye sisteminin kararlı kontrolünü sağladığını göstermiştir. Ancak GAK yönteminin, öngörülü kontrol yöntemine göre daha uzun yerleşme süresine ve daha uzun yükselme süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Turki ve diğerleri, GAK ve uyarlanabilir yüksek kazançlı gözlemci kullanan iki tanklı bir süreç için yeni bir kontrol tasarımı gerçekleştirmişlerdir [7]. Çalışmada iki tanklı sürecin modeli oluşturulmuş ve doğrusal olmayan gözlemci tasarımı, özellikle tüm parametrelerin bilinmediği durum için uyarlanabilir yüksek kazanç tahmincisi sunulmuştur. Çalışmada, geri adım atma yaklaşımı benimsenerek ve mevcut olmayan durumları ve parametreleri tahmin etmek için uyarlanabilir bir gözlemci dâhil edilerek, hidrolik iki tanklı sistemin düzenlenmesi için bir kontrol yasası geliştirilmiştir. Yaklaşımın etkinliği, gözlemcinin

sistemin durumlarını ve parametrelerini doğru bir şekilde tahmin ettiği ve kontrolcünün alt tanktaki sıvı seviyesini etkili bir şekilde düzenlediği benzetimler yoluyla gösterilmiştir.

Gomaa ve diğerleri gerçekleştirdikleri çalışmada, doğrusal olmayan birleştirilmiş üç tanklı sistemde, sıvı seviyesi takibi için komut filtreli geri adımlamalı kontrol yöntemini önermişlerdir [8]. Standart bir geri adımlamalı denetleyicinin yanı sıra bir komut filtrelenmiş geri adımlamalı denetleyici de tasarlanmıştır. Çalışmada, pompa kontrol sinyali sonuçlarının standart GAK cihazıyla karşılaştırılması, MATLAB/Simulink içindeki bir matematiksel model üzerinde doğrulama, gerçek zamanlı uygulama ile performans ve süreç kontrol kalitesi sunulmuştur. Komut filtreli geri adımlama yöntemi, komut sinyali türevlerinin kontrol sinyaline getirdiği yüksek frekanslı gürültüyü önlemek için geliştirilmiştir. Çalışmada, sistem tanımlama, standart geri adımlama ve komut filtreli geri adımlamalı denetleyici tasarımı, benzetim ve gerçek zamanlı sonuçlarla önerilen yaklaşımın etkinliği ve pratik kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur. Benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, sistem tanımlamasının doğruluğunu ve iki sonuç kümesi arasındaki yakın benzerliği vurgulamıştır. Önerilen komut filtreli geri adımlamalı denetleyici, istenen sıvı seviyesini etkili bir şekilde izleme ve kontrol sinyalinde yüksek frekanslı gürültüyü önleme konusundaki üstünlüğünü ortaya koyarak pratik uygulamasını ve faydalarını doğrulamıştır.

2022 yılında Meng ve diğerleri gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada, bileşik kontrol yöntemini genişleterek dört tanklı bir sıvı seviyesi sistemi için yeni bir bozucu gözlemcisi tabanlı geri besleme doğrusallaştırma kontrol stratejisini uygulamışlardır [9]. Yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar, sistemin Oransal-İntegral-Türev kontrolü ve önerilen kontrol stratejisi arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, küçük kontrol hatası ve güçlü bozucu etki bastırma performansı gibi önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir.

Yang ve diğerleri, belirsizliklerin olduğu durumlarda üç tanklı bir sistemin çıkışının takibi için sonlu zamanlı bozucu gözlemci tabanlı sağlam bir GAK yöntemi önermişlerdir [10]. Sistemin çıkış takibi için dinamik yüzey kontrol tekniği ile birlikte sonlu zaman tabanlı sanal kontrol tasarlanmıştır. Tüm sistemde teorik analiz yapılmıştır. Teorik sonuçlar kapsamlı deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Özarlan Yatak, GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin bulanık denetimini gerçekleştirmiştir [11]. Sıvı seviye sisteminin üzerindeki mevcut kontrol sistemine nazaran geliştirilen bulanık denetleyici sistemi iyileştirdiği deneysel sonuçlarla ortaya konulmuştur.

Çelik ve diğerleri, GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazını Arduino Mega ile kontrolünde gömülü Sugeno bulanık mantık tabanlı denetleyici tasarımı Simulink üzerinde gerçekleştirmiştir [12].

Yumurtacı ve Verim, öğrencilere kapalı döngü kontrol kavramlarını öğrenmeleri ve çeşitli kontrol tekniklerini uygulamaları için uygulamalı bir platform sağlamak amacıyla Arduino Due ile kontrol edilen sıvı seviye kontrol sistemini geliştirmiştir [13]. MATLAB/Simulink kullanılarak kodlamaya ihtiyaç duyulmadan temelden ileri düzeye kadar Açma-kapama, Oransal-İntegral-Türev, Yapay sinir ağı Oransal-İntegral-Türev ve Bulanık Oransal-İntegral-Türev denetimleri uygulanmıştır.

Zibin ve Jianqing, uyumsuz belirsizliklere sahip katı geri beslemeli doğrusal olmayan sistemlerin zorluklarını ele almak için, bulanık yaklaşım ve Lyapunov tabanlı uyarlanabilir yasaları birleştiren sistematik bir geri adım kontrol yöntemi sunmuştur [14]. Önerilen kontrol çözümü, güçlü izleme performansı ve garantili kapalı döngü kararlılığı sağlamaktadır.

Beyayache ve diğerleri, bağlantılı üç tanklı bir sistem için gerçek zamanlı doğrusal olmayan uyarlamalı geri adımlamalı sıvı seviyesi kontrolü önermektedir [15]. Kontrol yaklaşımı, belirsiz terimleri bir dizi bilinmeyen parametre tarafından yönetilen sınırlarla birleştiren, doğrusal olmayan belirsiz bir sistem için tasarlanmıştır. Bilinmeyen parametreler için uyarlanabilir denetleyicinin kararlılığını sağlamak için Lyapunov teorisine dayanan kararlılık analizi kullanılır. Kontrol tasarımının etkinliği deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar, özellikle parametre değişimleri ve dış etkenler altında önerilen kontrol sisteminin etkinliğini göstermektedir.

Alshamali ve diğerleri, üç durumlu tank sisteminin doğrusal olmayan kontrolü için geri adımlama tekniğinin uygulanmasını tartışmaktadır [16]. Geri adımlama tekniğinin kullanımını mümkün kılmak için doğrusal olmayan bir durum dönüşümü ve belirsiz tank modelini ele almak için artırılmış bir geri adımlama kontrol yasasının tasarımını sunmaktadır. Ek olarak, önerilen denetleyicinin sağlamlığını arttırmak için kayan kipli kontrol teorisini temel alan yüksek kazançlı anahtarlama teriminin kullanımını vurgulamaktadır. Önerilen kontrol yasalarının etkinliği, çıktı yörüngelerini istenen değerlere yönlendirme ve kapalı döngü sisteminin kararlılığını sağlama yeteneğini gösteren çeşitli benzetim çalışmaları aracılığıyla gösterilmiştir. Çalışma standart bir Oransal-İntegral denetleyiciyle

karşılaştırıldığında önerilen geri adımlamalı denetleyicilerin sağlamlığının ve etkililiğinin vurgulanmasıyla sonuçlanmaktadır.

Kolankowski ve Piotrowski, doğrusal olmayan çok boyutlu sistem olan tank kontrolünde kararlılığa, sıfır kararlı durum hatasına ve optimum yerleşme süresine ve aşımaya ulaşmayı hedeflemiştir [17]. Bunun için geliştirilen ilk kontrol sistemi çok değişkenli Oransal-İntegral-Türev kontrol sistemidir. Bu, Oransal-İntegral-Türev denetleyicilerini ayarlamak için optimizasyon kullanılarak tasarlanmıştır. İkinci kontrol sistemi, doğrusal ikinci dereceden regülatör ve ağırlıkların optimizasyonu kullanılarak tasarlanmış, entegre eylem kontrol sistemine sahip bir durum geri bildirim ve çıkış geri bildirimidir. Üçüncü kontrol sistemi ise Mamdani çıkarım sistemi kullanılarak tasarlanan bulanık denetim sistemidir. Benzetim sonuçları, bulanık denetim sisteminin, Oransal-İntegral-Türev ve integral kontrol sistemleriyle karşılaştırıldığında hem konsantrasyon hem de hacim proses değişkenleri için önemli ölçüde daha kısa yerleşme süreleri ile en iyi performansı sağladığını göstermektedir.

Sekban ve diğerleri, geri adımlamalı ve geleneksel Oransal-İntegral kontrol yöntemlerini ikili tank sıvı seviye sistemine uygulayarak denetleyici performansları gerçek zamanlı olarak analiz etmiştir [18]. Deneysel sonuçlar, geri adımlama denetiminin Oransal-İntegral denetime kıyasla daha iyi referans takip performansı gösterdiğini ve sistemde oluşan hataları daha başarılı bir şekilde elimine edebildiğini ortaya koymuştur.

Gerçekleştirilen literatür taramasında görülmüştür ki özellikle bulanık geri adımlamalı kontrolün sıvı seviye denetim sistemine gerçek zamanlı olarak uygulanması literatürdeki bir boşluğu kapatmaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışması sonucunda, BGAK yöntemi ile sıvı seviye kontrol sistemlerinde daha yüksek doğruluk, kararlılık ve güvenilirlik sağlanmıştır. Özellikle, doğrusal olmayan dinamikler ve belirsizlikler gibi zorlukların üstesinden gelinerek, endüstriyel uygulamalarda sıvı seviyesinin hassas kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, aynı zamanda diğer endüstriyel süreç kontrol sistemlerine de uygulanabilecek genel bir kontrol yöntemi geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması, yalnızca teorik bir yenilik sunmakla kalmayıp, aynı zamanda pratik uygulamalarda da önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Bu nedenle, çalışma, hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara değerli katkılar sunacaktır.

Bu genel amacı gerçekleştirebilmek için bu tez çalışmasında ilk olarak, Bölüm 2'de GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin tanımı yapılmıştır. Bu bölüm, sistemin işleyişi ve bileşenleri hakkında kapsamlı bilgiler sunarak çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bölüm 3'te, GAK algoritmasının Lyapunov kararlılık teorisine göre tasarımı ve analizi ele alınmıştır. Bu bölümde, kontrol algoritmasının teorik temelleri ve kararlılık analizleri detaylandırılmıştır. Bunu takiben, Bölüm 4'te bulanık mantık kurallarının ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Bu bölümde, bulanık mantık sisteminin nasıl yapılandırıldığı ve kuralların nasıl oluşturulduğu açıklanmıştır. Bölüm 5'te, sıvı seviye kontrol sisteminin matematiksel modeli oluşturulmuş, doğrusal olmayan dinamikler ve sistem parametrelerinin belirsizlikleri modellenmiştir. Ayrıca, bulanık mantık kontrol biriminin GAK algoritması ile birleşimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan BGAK yönteminin benzetim ortamında test edilmesi sağlanmıştır. Bu aşamada, sıvı seviye kontrol sistemi, bulanık mantık kontrol algoritması ile uyumlu hale getirilmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Bu bölüm, sistemin davranışının anlaşılması ve kontrol algoritmasının uygulanması için kritik öneme sahiptir. Geliştirilen kontrol yöntemi, Bölüm 6'da laboratuvar ortamındaki deney seti olan sıvı seviye kontrol sistemleri üzerinde uygulanmış ve doğrulanmıştır. Deneysel sonuçların benzetim sonuçları ile uyumluluğu bu bölümde değerlendirilmiştir. Bu, teorik bulguların pratikte de geçerli olup olmadığını göstermek için yapılmıştır. Son olarak, Bölüm 7'de, BGAK algoritmasının performansı, geleneksel GAK ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kontrol algoritmalarının sistem parametrelerindeki belirsizliklere karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Bu bölümde, yeni algoritmanın avantajları ve performans iyileştirmeleri vurgulanmıştır.

## 2. GUNT RT512 SIVI SEVİYE DENETİM SİSTEMİ

Bu bölümde GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi üzerinde bileşenlerin işlevleri, sistemde yapılan değişiklikler ve geliştirilen denetleyici ele alınarak çalışma prensibi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin laboratuvar ortamında eğitim ve deney amaçlı kullanımda olması, ayrıca farklı denetim algoritmalarının test edilmesine elverişli bir sistem mimarisine sahip olması nedeniyle denetleyicinin bu sistem üzerinde uygulanmasına karar verilmiştir.

GUNT RT512, eğitim ve deney amaçlı kullanılmasına rağmen endüstride kullanılan sistemlere benzer bir sıvı seviye denetim sistemidir. Sistemde; 4 - 20 mA akım ile oransal kontrol sağlayan pnömatik vana, 28 litre kapasiteli depolama tank, asenkron motor ile tahrik edilen pompa, geri dönüş vanası, basınç sensörü, 2 - 6 bar / 4 - 20 mA basınç akım dönüştürücüsü, 0 - 62 cm aralığında ölçeklenebilen seviye tüpü, dijital denetleyici (UDC5000) bulunmaktadır [19]. Bulanık geri adımlamalı kontrolü gerçekleştirmek için sistem üzerindeki UDC5000 denetleyicisi devre dışı bırakılmıştır. Arduino Mega ile geliştirilen kontrol sisteminde MATLAB/Simulink ortamında hedeflenen sıvı seviyesi ayarlanarak, istenilen seviyenin erişimi, hata ve hata değişimini gösteren GAK ve BGAK denetleyici tasarlanmıştır. Arduino Mega aracılığıyla denetleyici çıkışındaki gerilim verisi gerilim/akım (V/I) dönüştürücüden oransal vanaya iletilerek vana pozisyonunu değiştirmektedir. Böylece seviye tüpü içerisindeki sıvı miktarının değişimi kontrol edilmektedir. Sıvı seviye tüpünün altında yer alan basınç sensörü ve basınç akım dönüştürücü aracılığıyla hedeflenen sıvı seviyesi bilgisi ile sistem girdileri elde edilmektedir. Bu çalışma ile GUNT RT512 sıvı seviye sistemi sırasıyla geri adımlamalı denetleyici ve bulanık geri adımlamalı denetleyici ile kontrol edilmiş, denetleyicilerin performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır.

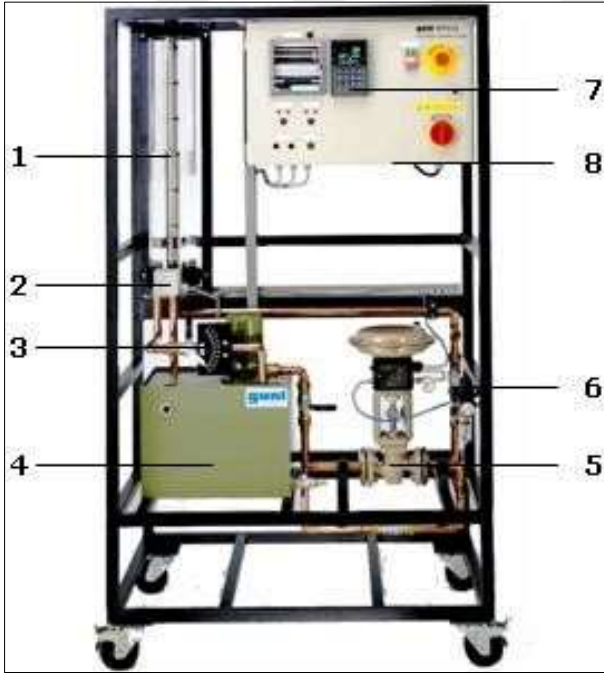
### 2.1. Sistemin Genel Yapısı

GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazı, endüstriyel sıvı seviyesinin ölçülmesi ve kontrol edilmesi için kullanılmaktadır. Cihaz, bir tank içindeki sıvı seviyesini ölçmek için bir basınç

sensörü kullanmaktadır. Sensörden alınan sinyal, cihazın denetleyicisine gönderilmekte ve denetleyici sıvı seviyesinin istenilen değerde kalmasını sağlamak için gerekli olan kontrol sinyallerini üretmektedir.

GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazı orijinal haliyle, Oransal, İntegral, Türev ve tüm konfigürasyonlara ait denetleyiciyi kullanarak sıvı seviyesinin istenilen değerde kalmasını sağlamaktadır. Oransal-İntegral-Türev denetleyicisi, sıvı seviyesindeki değişiklikleri algılamakta ve kontrol sinyallerini buna göre ayarlamaktadır.

Sekiz bölümden oluşan GUNT RT512 sıvı seviye kontrol sisteminin yapısı Şekil 2.1.'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. GUNT RT512 sıvı seviye sistemi [19]

Sistemin Bileşenleri;

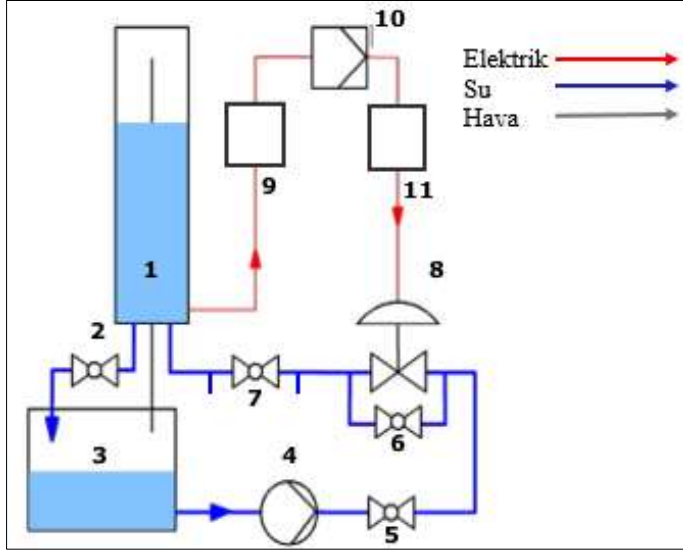
1. Sıvı Seviye Tüpü
2. Basınç Sensörü
3. Çıkış Vanası
4. Su Tankı
5. Pnömatik Kontrol Vanası

6. Basınç Ayar Filtresi
7. Denetleyici
8. Kontrol panosu

Sistem 0 – 62 cm arasında değişen yüksekliğe göre denetim sağlarken pnömatik kontrol vanasından geçen akışı düzenleyerek seviye tüpüne giden sıvı miktarını ayarlamaktadır. Çalışmadan geliştirilen kontrol sistemine ait bileşenlerin görevleri ve çalışma prensibi bu bölümün devamında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazı, endüstriyel uygulamalar için ideal bir çözümdür. Teknoloji ve mühendislik fakültelerinde uygulamalı eğitim özellikle endüstriyel sektörde teknik personel ihtiyacının karşılanması bakımından önemlidir. Bu tez çalışmasında kullanılan uygulamalı deney setinin endüstrideki sistemlere uyumlu olması, mühendislik öğrencilerinin niteliğini artırarak, endüstride karşılaşılabilecekleri problemlerin çözümünde kolaylık sağlamaktadır.

Şekil 2.2.'de gösterilen sistem bağlantı diyagramında mavi renkli işaretler sıvı, kırmızı renkli işaretler elektrik, siyah renkli işaretleme ise hava ilerlemesini göstermektedir. Sıvı seviye denetim cihazıyla seviye tüpündeki sıvının, denetleyici tarafından hedeflenen değeri yakalaması amaçlanmaktadır. Seviye tüpündeki sıvının basınç bilgisi, basınç sensörü tarafından algılanmakta ve akım bilgisine dönüştürülmektedir. Gelen akım bilgisi denetleyici tarafında giriş olarak değerlendirilmekte ve denetleyici tarafından belirlenen referans seviye bilgisi ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma neticesinde hedeflenen sıvı seviyesini yakalamak için denetleyici üzerinden pnömatik kontrol vanasına iletilmesi gereken akım bilgisi belirlenmektedir. Bu akım bilgisi, pnömatik kontrol vanası için gereken basınç bilgisine akım/basınç dönüştürücü aracılığıyla dönüştürülmektedir. Bu basınca göre, denetim vanasının ne kadar açık olacağı ve buna bağlı olarak seviye tüpüne ne kadar sıvı gönderileceği belirlenmektedir. Sistemde pompa sürekli olarak tankın içindeki sıvıyı seviye tüpüne ileterek çalışmaktadır. Aynı şekilde, çıkış vanası da sürekli olarak tanktan sıvı boşaltımını gerçekleştirmektedir. Bu nedenle, sıvı sürekli bir döngü içerisinde. Sıvının değeri istenen seviyeye ulaştığında bile, pnömatik kontrol vanasının girişinde yaklaşık 12 mA'lık bir akım bulunmaktadır. Bu akım değeri, seviye tüpüne gönderilen sıvı ile seviye tüpünden tanka boşaltılan sıvıyı dengeleyen bir değerdir.



Şekil 2.2. GUNT RT512 işlem diyagramı [19]

1. Seviye Seviye Tüpü
2. Çıkış Vanası
3. Sıvı Tankı
4. Sıvı Pompa
5. Konik Vana
6. Kaskat İçin Bypass
7. Kaskat İçin Hortum Bağlantısı
8. Pnömatik Kontrol Vanası
9. P / I Dönüştürücü
10. Denetleyici
11. Pnömatik Konumlandırıcı

Bulanık geri adımlama denetleyici çıkışında gönderilen kontrol işareti ile sıvı seviyesinin kontrol edildiği sistemde, gerilim ile sıvı seviye yüksekliği arasında bir ilişki geliştirilmiştir. Deney seti üzerindeki sistemlerden gelen akım bilgisi, Arduino Mega kartına girmeden önce dönüştürülerek gerilim bilgisi olarak iletilmektedir. Bu nedenle, sistem için çeşitli ara birim devreleri tasarlanmıştır.

## 2.2. Sıvı Seviye Sistemi Elemanları

### 2.2.1. Denetleyici

Sistemde Şekil 2.3. 'de gösterilen Honeywell marka UDC 5000 mikroişlemci tabanlı yüksek doğruluk ve işlevselliği sunan dijital denetleyici bulunmaktadır. Denetleyici, ölçüm verilerinin işlenmesi açısından sayısal bir yapıya sahip olup, süreç kontrolünü optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. UDC 5000, süreç değişkenlerini (örneğin, sıcaklık, basınç, akış) hassas bir şekilde ölçmekte ve bu ölçümleri dijital sinyallere dönüştürmektedir. Bu ölçümler, kontrol döngüsü boyunca sürekli olarak izlenmekte ve analiz edilmektedir. Parametre ayarları, potansiyometre yerine kullanılan tuşlar aracılığıyla yapılmaktadır. UDC 5000, çeşitli kontrol algoritmalarını desteklemektedir. Başlıca kontrol algoritmaları şunlardır;

1. Açık-Kapalı Kontrol: Sıvı seviyesi, belirli bir sınır değerini aşana kadar sistem devrede kalmakta ve sınır değerine ulaşıldığında sistem kapanmaktadır.
2. Oransal-İntegral-Türev eşitlikleri: Bu algoritmalar ile sıvı seviyesinin istenen değere getirilmesi için üç bileşeni kullanmaktadır:
  - a. Oransal: Hata sinyaline orantılı bir kontrol çıkışı üretmektedir.
  - b. İntegral: Hata sinyalinin zamanla birikimini düzeltmektedir.
  - c. Türev: Hata sinyalinin değişim hızını dikkate alarak kontrol sağlamaktadır.
3. Manuel Sıfırlamalı Oransal-Türev Kontrol: Hata ve hata değişim hızına göre kontrol sağlamakta, ancak integral bileşen içermemektedir.
4. Üç Pozisyonlu Adım Kontrolü: Bu algoritma, pozisyon kontrolleri için kullanılmakta ve üç farklı konum arasında adım adım geçiş sağlamaktadır.

Kontrol algoritmaları tarafından işlenen veriler, kontrol çıkışını belirlemektedir. UDC 5000, çeşitli giriş ve çıkış pinleri, haberleşme protokolleri ve esnek yapılandırma seçenekleri ile endüstriyel otomasyon sistemlerine uyum sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında Arduinio Mega tabanlı bir denetleyici kullanıldığından UDC 5000 devre dışı bırakılmıştır.



Şekil 2.3. UDC 5000 denetleyici [19]

### 2.2.2. Pnömatik oransal vana (I/P)

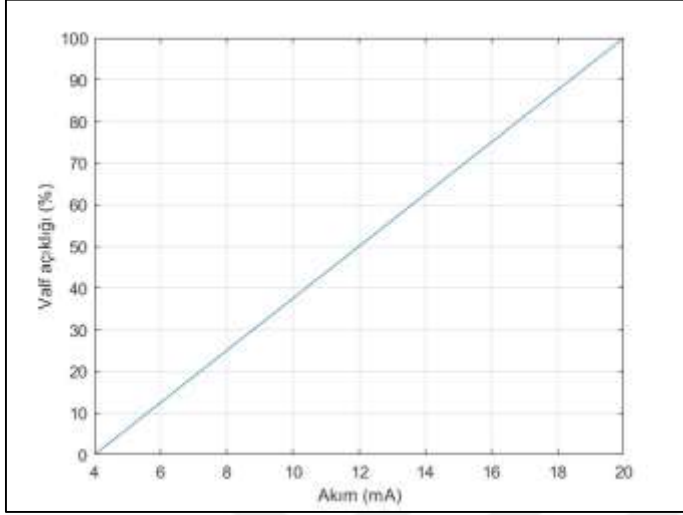
Sistemde, Şekil 2.4.'te gösterilen Samson 3241-7 model pnömatik oransal vana kullanılmaktadır. Bu vanada, akışkan sıvı, gövde üzerindeki okla gösterilen yönde vanadan akmaktadır. Vana tapası konumu, yatak ve tapa arasındaki kesit alanını belirleyerek akış miktarını düzenlemektedir.



Şekil 2.4. Samson 3241-7 pnömatik oransal vana [19]

3241-7 model pnömatik vana, 2,5 bar hava basıncı ile çalışmakta ve 4 - 20 mA aralığındaki akım sinyali ile kontrol edilmektedir. Bu sinyale bağlı olarak açılıp kapanan vana, su debisini sıvı seviye tüpüne ayarlamak amacıyla kullanılmaktadır. Basınç-akım çevirici modül tarafından gönderilen akım bilgisi, akım-gerilim dönüştürücü modül üzerinde 0 - 5 Vdc analog gerilim bilgisine çevrilmekte ve bu bilgi Arduino Mega tarafından okunmaktadır. Kullanılan akım-gerilim dönüştürücü, 4 - 20 mA akım değerini 0 - 5 Vdc analog gerilime doğrusal bir şekilde çevirmek üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, modül üzerinde zero ve span

dirençlerinin ayarları, bu dönüşüm ihtiyacını karşılamak üzere yapılmıştır. Arduino Mega hedeflenen sıvı seviyesine erişim için Şekil 2.5.'te yer alan grafiğe göre pnömatik vanaya 4 - 20 mA arasında akım göndermektedir.



Şekil 2.5. Pnömatik oransal vana akım/vana açıklığı grafiği

Şekil 2.5.'te görüleceği üzere, pnömatik vana 4 mA'den sonra açılmaya başlamakta ve 20 mA'de maksimum açıklığa ulaşmaktadır. Vananın açılma ve kapanma miktarı, giriş akımının değerine bağlıdır ve doğrusal bir ilişki içermektedir. Benzetim çalışmalarında denetleyiciler tasarlanırken bu doğrusal ilişki dikkate alınmıştır. Pnömatik vana hem elektronik hem de pnömatik sistemlerin birleşimi ile en uygun performans sunarak, akış kontrolünün doğruluğunu ve sistem verimliliğini artırmaktadır.

### 2.2.3. Basınç regülatör ünitesi

Sistemde, Şekil 2.6'da gösterilen oransal bir pnömatik vanaya bağlı bir basınç regülatörü bulunmaktadır. Bu regülatör, basınçlı hava kaynağından gelen hava akışındaki titreşimleri kontrol etmekte ve aşırı basıncı düzenleyerek pnömatik vana için gerekli olan 2.5 bar basınç değerinde sabit tutmaktadır.



Şekil 2.6. Basınç regülatörü [19]

#### 2.2.4. Basınç/akım (P/I) dönüştürücü

Endress Hauser tarafından üretilen ve Şekil 2.7’de gösterilen basınç akım dönüştürücü, sıvı seviye tüpünün altında yerleşik olarak bulunmakta ve içerisindeki sensör aracılığıyla tüpten aldığı 0- 6 bar aralığındaki basınç bilgisini 4 - 20 mA aralığında akım bilgisine çevirmektedir.



Şekil 2.7. Cerabar PMC 133 basınç akım dönüştürücü [19]

#### 2.2.5. Akım/basınç (I/P) dönüştürücüsü (pnömatik konumlandırıcı)

Denetleyiciden gelen akım verisini elektro pnömatik dönüştürücü aracılığıyla basınç verisine dönüştüren pnömatik konumlandırıcı Şekil 2.8.'de görülmektedir. Dönüşüm işlemi

sonrasında basınç değeri konumlandırıcının içyapısındaki yay aracılığıyla diyafram üzerinde kuvvet oluşturmakta ve böylece diyaframa bağlı olan vana kolunun açıklığını artırıp azaltarak vanayı kontrol etmektedir.



Şekil 2.8. Pnömatik konumlandırıcı [19]

### 2.2.6. Denetleyici arduino mega

Çalışmada denetleyici olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır. Şekil 2.9. 'da görülen ATmega2560 mikrodenetleyicisi ile çalışan Arduino Mega 2560 kartı, 54 dijital giriş/çıkış pini, 16 analog giriş ve 4 seri port özelliklerine sahiptir. Çalışmada 2 analog giriş, 2 dijital giriş kullanılmıştır. Sistemin modeli MATLAB Simulink üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.9. Arduino mega 2560

### 2.2.7. Dijital analog dönüştürücü

Arduino Mega, dijital pinlerinden biri aracılığıyla Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) sinyali üretebilmektedir. PWM sinyali, belirli bir frekansta hızlı bir şekilde açılıp kapanan

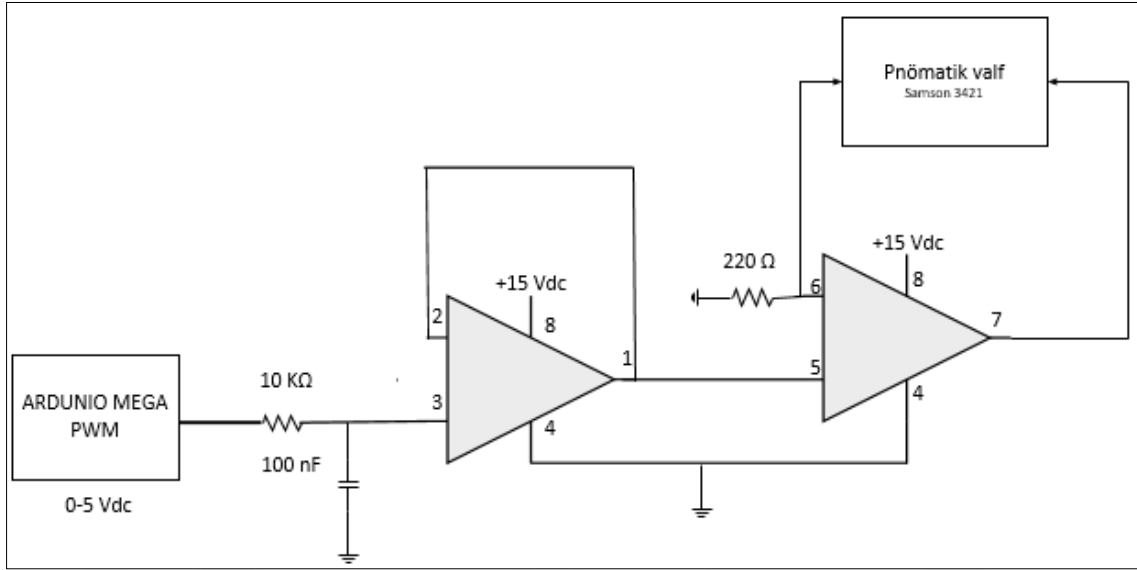
dijital bir sinyaldir. PWM sinyali, belirli bir periyot süresince "açık" ve "kapalı" durumları arasındaki oranı değiştirerek analog sinyale benzer bir sinyal elde etmeyi sağlamaktadır.

Arduino'nun yerleşik Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) özelliği voltaj çıkışı olan 8 bitlik Dijitalden Analog Çevirici (DAC) olarak kullanılmıştır. 0 sayısal bilgisini 0 Vdc analog gerilim bilgisine, 255 sayısal bilgisini 5 Vdc analog gerilim bilgisine dönüştürürken doğrusal davranış varsaymaktadır. Pnömatik vananın kontrolü gibi gerçek analog voltaj gerektiren uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Arduino Mega'nın PWM çıkışına bağlı bir voltaj izleyici devresi kullanarak pnömatik vananın kontrol edilmesiyle PWM sinyalini analog sinyale dönüştürerek hassas ve kararlı bir kontrol sağlanmaktadır. Voltaj izleyici devresinin avantajları arasında yüksek doğruluk, düşük sinyal bozulması ve giriş-çıkış izolasyonu bulunmaktadır. Bu, pnömatik sistemlerin güvenilir ve etkili bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır.

Şekil 2.10.'da görülen PWM çıkışındaki sinyal düşük geçiren bir filtre devresi ile beslenmektedir. Bu filtre, yüksek frekans bileşenlerini süzerek ve PWM sinyalini yumuşatarak ortalama voltaj seviyesine dönüştürmektedir. Filtrelenmiş sinyal, op-amp'ın girişine uygulanır. Op-amp, bu sinyali takip eder ve aynı voltaj seviyesini çıkışında sağlar. Bu şekilde, düşük empedanslı bir çıkış elde edilmektedir.

### **2.2.8. Gerilim akım dönüştürücü devre**

Gerilim/akım dönüştürücü devresi, voltaj izleyici devre tarafından sağlanan gerilimi akıma dönüştürerek, pnömatik vananın kontrolünde sıvı seviyesinin miktarını belirleyen akımı sağlamaktadır. Pnömatik kontrol vanaya, gelen akım miktarına bağlı olarak Şekil 2.5.'te belirtilen oranlarda açılıp kapanmakta, böylece vananın kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 2.10.'da görülen devre, bu gerilim/akım dönüştürme işlevini yerine getirmektedir.



Şekil 2.10. Voltaj izleyici ve DAC devresi

### 2.2.9. Akım gerilim (I/V) dönüştürücü

Çalışmada Arduino Mega ile sistem üzerindeki 4 - 20 mA çıkışlı basınç/akım dönüştürücünün birleşimi için kullanılmıştır. Sıvı seviye tüpünün altında yer alan basınç akım dönüştürücünden elde edilen akım sinyalini analog voltaja dönüştürmekte ve Arduino Mega üzerinden dönüştürülen gerilim okunmaktadır. Bu gerilim sistemin çıkış verisidir ve sistemin gürbüz çalışması için önemlidir. Şekil 2.11.'de yer alan modül 4 - 20 mA akım sinyalini, mikro denetleyicinin ADC pinine doğrudan bağlanabilen 0 - 5 Vdc analog çıkış voltajına dönüştürmektedir. Akım-gerilim dönüştürücü, 15 Vdc güç ile beslenmektedir. Çalışmada dönüştürücü modül üzerinde yer alan zero ve span dirençlerinin ayarları ile 4 - 20 mA ve 0 - 5 Vdc analog çıkış voltajı ayarı sağlanmıştır.



Şekil 2.11. Akım gerilim dönüştürücü devresi



### 3. GERİ ADIMLAMALI KONTROL ALGORİTMASI

Geri adımlama kontrol algoritması, 1990'larda kontrol teorisi alanında ortaya çıkan ve özellikle doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, geri adımlama (backstepping) adı verilen bir yaklaşımı kullanmaktadır.

Geri adımlama yaklaşımı, sistemin kontrolünde birden fazla kontrol yörüngesi oluşturulması ve bu yörüngelerin birleştirilmesi esas alınmaktadır. Sistem kontrolü sırasında her bir kontrol yörüngesi, bir sonraki yörüngenin hedefi olarak belirlenmekte ve ara denetleyiciler kullanılarak sistemin bu hedefe ulaşması sağlanmaktadır. Böylece sistematik ve aşamalı bir kontrol süreci sağlayarak, birbirine bağlı bir dizi denetleyici aracılığıyla sistemin istenen performansa ulaşması temin edilmektedir.

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde etkili olan GAK algoritması sistemi, bir dizi ileri geri çevrim adımı kullanarak kontrol etmektedir. Bu adımlar, sistem dinamikleri ve kontrol yörüngeleri için özel olarak seçilmiş olan GAK fonksiyonları ile hesaplanmaktadır. Her bir kontrol yörüngesi için ayrı olarak seçilen GAK fonksiyonları sistemden önceki yörüngelerin de kontrolünü sağlamaktadır.

Geri adımlamalı kontrolün temel özelliği, sistemin tüm doğrusal olmayan özelliklerini iptal etmek yerine, sadece kararsızlaştırıcı doğrusal olmayan özelliklerin baskın hale getirilmesidir. Böylece endüstri için önemli bir özellik olan sistemin iyi bilinmesi ve kesin bir modele ihtiyaç duyulması gereksinimi ortadan kalkmaktadır. Bu yöntemin bir diğer özelliği de türevi çeşitli kontrol yasaları ile negatif tanımlı hale getirilebilen bir kontrol Lyapunov fonksiyonu oluşturmasıdır. Öte yandan, adımları arttıkça, geri adımlamalı kontrolün matematiksel hesaplamasında çok sayıda terimle uğraşma ve ana işlevi birçok kez türev alma gibi dezavantajı da mevcuttur.

Geri adımlama, doğrusal olmayan sistemler için düzenlenmiş değişkenlerin sıfıra yakınsamasını sağlayan Lyapunov yöntemi tabanlı çok yönlü bir kontrol tasarım yaklaşımıdır. Geri adımlamanın ana avantajı, tasarımcıların n. dereceden bir sistemin kontrol problemini n sayıda birinci dereceden birbirine bağlı sistemin kontrol problemi olarak ele almasına izin veren tek doğrusal olmayan tasarım aracı olmasıdır.

### 3.1. Lyapunov Kontrol Fonksiyonu

GAK tekniği, kararlılık analizlerinden biri olan Lyapunov teorisine dayanmaktadır. Bu kontrol yöntemi yinelemeli bir yapıdadır. Başka bir deyişle, sisteme ait durum değişkenleri her bir adımda birbirini kararlı hale getirmeye çalışmaktadır. Her bir adımda kararlılığı sağlanan durum değişkenleri ile durum değişkenlerinden elde edilen kontrol sinyali, tüm sistemi kendiliğinden kararlı bir yapıya kavuşturacaktır. Böylece kontrol tekniği, referans ve ölçülen değer arasında oluşan hataları azaltarak sistemin referans değerini takip etmesini sağlayacaktır [20].

Lyapunov kararlılık kriteri herhangi bir otonom dinamik sistemin kararlılığını analiz etmek için kullanılan güvenilir bir kararlılık analiz tekniğidir. Doğrusal ve otonom olmayan kontrol sistemlerinin tasarım prosedürüne yardımcı olmak için yeni bir Lyapunov fonksiyon yaklaşımı tasarlanmıştır. Eş. 3.1'de gösterildiği gibi otonom olmayan zamanla değişmeyen doğrusal olmayan bir sistemi ele alınsın.

$$\dot{x} = f(x, u); f(0,0) = 0 \quad (3.1)$$

Doğrusal olmayan sistemin denge noktasının Eş.3.1'de belirtilen denge noktası üzerinden anlaşılması kolaydır ve bu nokta  $x=0$ 'da bulunur. Yine de, eğer sistemin orijinal asimptotik kararlı bir sistem olacak şekilde  $u = a(x)$  durum geribeslemeli kontrol yasası tasarlanmak istense, elverişli bir çözüm olarak değiştirilmiş bir Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı kullanılabilir [21].

### 3.2. Geri Adımlama Yöntemi

Doğrusal olmayan kesin geri beslemeli sistemleri kararlı hale getirmek için denetleyici tasarlamak üzere geliştirilmiş etkili bir yaklaşımdır. Genel olarak, karmaşık bir doğrusal olmayan sistem durum uzayında birinci dereceden alt sistemler dizisi olarak sunulmaktadır. GAK yaklaşımı ile tüm sistemin çıkışındaki alt sistemden başlayarak her bir alt sistem için bir sanal kontrol yasası tasarlanmaktadır. Sanal kontrol yasaları, her adımda Lyapunov fonksiyonuna dayalı olarak her bir alt sistemi ayrı ayrı kararlı hale getirecek şekilde tasarlanmakta ve tüm sistemin girişine doğru hareket ettirilmektedir. Son adımda, tüm sistemin girişinde, tüm alt sistemi kararlı hale getiren nihai doğrusal olmayan kontrol yasası

tasarlanmaktadır [22]. Geri adımlamada, bazı durum değişkenleri “sanal kontroller” olarak dikkate alınmakta ve bu değişkenler için ara kontrol algoritmaları tasarlanarak yinelemeli olarak bir denetleyici oluşmaktadır. Geri adımlama, kararlılık ve izleme hedeflerine ulaşmaktadır. Bu özelliklerin ispatı özyinelemeli prosedürün doğrudan bir sonucudur. Çünkü parametre tahminleri dâhil tüm sistem için bir Lyapunov fonksiyonu oluşturulmuştur.

Bu tür bir gelişme hakkında net bir fikir vermek için, aşağıdaki üçüncü dereceden katı geri bildirim sistemini ele alınmaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + x_2^2 \\ \dot{x}_3 &= u\end{aligned}\tag{3.2}$$

$x_1, x_2$  ve  $x_3$  sistem durumları ve  $u$  kontrol girişidir. Kontrolün amacı, orijini asimptotik olarak sabitlemek için bir durum geri besleme kontrolü tasarlamaktır [23].

Aşama 1: Eş. 3.2 'nin ilk eşitliği ile başlanır.  $z_1 = x_1$  yeni koordinatın dinamikleri türetilir.

$$\dot{z}_1 = x_2 + x_1^2\tag{3.3}$$

$x_2$  bir kontrol değişkeni ,  $\alpha_1$  sanal bir kontrol kanunu,  $z_2$  gerçek ve sanal kontrolleri arasındaki farkı temsil eden bir hata değişkeni olarak alınır.

$$z_2 = x_2 - \alpha_1\tag{3.4}$$

Eş. 3.3'de  $x_2$  durum değişkeni yerine Eş. 3.4 tekrar yazılır:

$$\dot{z}_1 = \alpha_1 + x_1^2 + z_2\tag{3.5}$$

$z_1 \rightarrow 0$  'a götüren sanal bir kontrol yasası  $\alpha_1$  tasarlamak için Lyapunov fonksiyonu kullanılır.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2\tag{3.6}$$

Zamana göre türevi alındığında Eş. 3.7 elde edilir:

$$\dot{V}_1 = z_1(\alpha_1 + x_1^2) + z_1 z_2 \quad (3.7)$$

Birinci dereceden sistemi kararlı hale getirmesi için uygun  $\alpha_1$  sanal kontrolü seçilir.

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 - x_1^2 \quad (3.8)$$

$$\dot{\alpha}_1 = -(c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (3.9)$$

$c_1$  pozitif bir sabittir ve zaman türevi  $V_1$  olur.

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (3.10)$$

Eğer  $z_2 = 0$ , o zaman  $\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2$  ve  $z_1$  sıfır asimptotik olarak yakınsama garantilidir.

Aşama 2:  $z_2 = x_2 - \alpha_1$  hata dinamikleri türetilir.

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1$$

$$= x_3 + x_2^2 + (c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (3.11)$$

$x_3$  sanal bir kontrol girişi olarak görüntülenir.  $\alpha_2$  bir sanal kontrol yasası olarak tanımlanır ve  $z_3$  gerçek ve sanal kontroller arasındaki farkı temsil eden bir hata değişkeni olur.

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (3.12)$$

O zaman Eş 3.11 tekrar yazılır.

$$\dot{z}_2 = z_3 + \alpha_2 + x_2^2 + (c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (3.13)$$

Kontrol amacı  $z_2 \rightarrow 0$  'dır. Bu aşamada Bir Lyapunov fonksiyonu kontrol seçilir.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (3.14)$$

Zaman türevini alınca;

$$\begin{aligned} \dot{v}_2 &= \dot{v}_1 + z_2\dot{z}_2 \\ &= -c_1z_1 + z_1z_2 + z_2(z_3 + \alpha_2 + x_2^2 + (c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2)) \\ &= -c_2z_2^2 + z_2(\alpha_2 + z_1 + x_2^2 + (c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2)) + z_2z_3 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Uygun bir sanal kontrol  $\alpha_2$  seçilir.  $z_1$ ,  $x_1$  ve  $x_2$  ilgili bazı şartları iptal etmek terimi içerirken  $z_3$  kaldırılamaz.

$$\alpha_2 = -z_1 - c_2z_2 - x_2^2 - (c_1 + 2x_1)(x_2 + x_1^2) \quad (3.16)$$

$c_2$  pozitif bir sabittir. Yani zaman türevi  $V_2$  olur.

$$\dot{V}_2 = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 = -\sum_{i=1}^2 c_i z_i^2 + z_2z_3 \quad (3.17)$$

Eğer  $z_3 = 0$ ,  $\dot{V}_2 = -\sum_{i=1}^2 c_i z_i^2$ , ve böylece  $z_1$  ve  $z_2$  ile asimptotik olarak sifira yakınsaması garanti edilir.

Aşama 3: Eş. 3.12 'deki son eşitliğe ilerleyerek,  $z_3 = x_3 - \alpha_2$  için hata dinamikleri üretilir:

$$\dot{z}_3 = u - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(x_2 + x_1^2) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(x_3 + x_2^2) \quad (3.18)$$

Bu eşitlikte, gerçek kontrol girişi  $u$  kullanılır. Amaç, gerçek kontrol girdisi  $u$  'yu  $z_1, z_2, z_3$  sifira yakınsamak için tasarlamaktır. Burada Lyapunov fonksiyonu  $V_3$  seçilir.

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (3.19)$$

Zaman türevi şu şekilde verilir:

$$\dot{V}_3 = - \sum_{i=1}^2 c_i z_i^2 + z_3 \left( u + z_2 - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} (x_2 + x_1^2) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} (x_3 + x_2^2) \right) \quad (3.20)$$

$u$  kontrolü tasarlamak için  $\dot{V}_3 \leq 0$  olmalıdır.

$$u = -z_2 - c_3 z_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} (x_2 + x_1^2) + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} (x_3 + x_2^2) \quad (3.21)$$

$c_3$  pozitif bir sabittir. Lyapunov fonksiyonunun türevi  $V_3$  alınır.

$$\dot{V}_3 = - \sum_{i=1}^3 c_i z_i^2 \quad (3.22)$$

Geri adımlamalı kontrolcü adından da anlaşılacağı üzere, yukarıdaki dinamik eşitlikler kullanılarak kontrolcünün tasarımı gerçekleştirilirken geriye doğru yönelimlerin yapıldığı bir kontrolcü türüdür. Bu geriye doğru yapılan adımlar, kontrolcü tasarımının arkasındaki temel fikirdir. Sisteme ait durum değişkenlerinden biri sanal kontrolcü kabul edilir ve sanal kontrolcü kendisi için belirlenen referans değere ulaşırsa böylece asıl ele alınan değişken de referans değere ulaşmış olacaktır.

Geri adımlama, geri besleme doğrusallaştırmasına bir alternatif sağlayan doğrusal olmayan bir kontrol tasarım yöntemidir. Geri adım atma yönteminin ana fikri, tüm sistemi  $n$  sayıda kademeli alt sisteme bölmektir. Sonuç olarak, ilk alt sistemin durumları bir sonraki alt sistem için kontrol değişkenleri olarak işlev görmektedir. Geri adımlamalı yaklaşımda, ilk olarak, birinci alt sistemden istenen çıktıyı uyarabilecek ideal girdi hesaplanır. Alt sistemler kaskat bağlı oldukları için birinci alt sisteme giriş otomatik olarak ikinci alt sistemin çıkışından gelir. İkinci alt sisteme ideal girdi, birinci alt sisteme benzer şekilde hesaplanır. Tüm alt sistemler için istenen girdiler son alt sisteme gelene kadar sıralı bir şekilde hesaplanır. Bir örnek olarak, son alt sistem için istenen girdi, gerçek kontrol girdisi için ifadeyi verir ve buna göre tasarımcılar, tüm doğrusal olmayan sistem için bir durum geri besleme yasası uygulayabilir. Geri adımlamanın bu yinelemeli yaklaşımı, karmaşık doğrusal olmayan dinamik sistemler için kontrol yasasının tasarımı sırasında genellikle avantajlı bir özellik olarak hizmet etmektedir. Yetersiz çalıştırılan mekanik sistemlerin kontrolü zorlu bir tasarım problemi olarak kabul edildiğinden, geri adım tabanlı tasarım tekniği bu tür sistem sınıfları için düzenleme problemini ele almak için en uygun bir seçenektir [21].

## 4. BULANIK MANTIK KONTROLÜ

### 4.1. Bulanık Mantık Teorisi

Geleneksel kontrol yöntemlerine bir alternatif olarak görülen bulanık mantık, belirsizlik içeren problemlerde ve matematiksel modellemelerinin karmaşık olduğu sistemlerde etkili çözümler sunan bir yöntemdir. Bugünün karmaşık problemlerinin çözümünde önemli bir araç olarak kabul edilen bulanık mantık kuramının uygulamaları, belirsiz durumları başarıyla anlama ve modelleme konularında geniş bir etki alanına sahiptir.

Bulanık mantığın temel amacı, mantık, olasılık ve yapay zekâ gibi teorik temellere dayanarak, eksik ve belirsiz bilgi koşullarında tutarlı ve doğru kararlar almayı mümkün kılmak ve bu karar verme süreçlerini sistematik bir şekilde modellemektir [24].

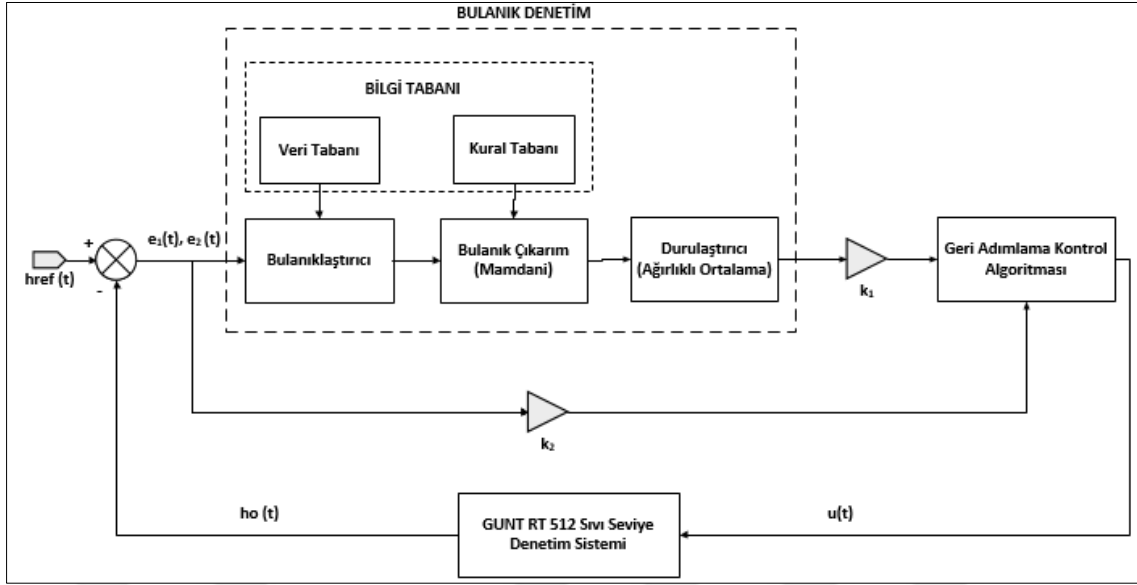
Bulanık mantıkta en önemli kaynaklardan sensörler değişkenler için sayısal veri sağlarken, uzman kişiler de dilsel bilgi sağlamaktadır [24-26]. Gerçekleştirilen tez çalışmasında, referans sıvı seviyesi ve ölçülen sıvı seviyesi arasındaki fark ve farkın değişimi ile sistem davranışı göz önünde bulundurularak sayısal ölçümlerin dilsel bilgi karşılığı oluşturulmuştur.

### 4.2. Bulanık Mantık Denetiminin Genel Yapısı

Bulanık denetleyicinin tasarımında, kontrol uzmanının bilgi ve deneyimlerinin bilgi tabanı olarak kullanılması temel unsurdur. Bulanık denetim aşağıda belirtilen üç aşamada gerçekleşmektedir.

- Bulanıklaştırma
- Karar verme (bulanık çıkarım)
- Durulaştırma

Gerçekleştirilen tez çalışmasında kullanılan bulanık denetleyicinin yapısını içeren sistemin genel blok diyagramı Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Bulanık mantık denetleyicinin yapısını içeren genel sistem blok diyagramı

Çalışmada hedeflenen sıvı seviyesi ve ulaşılan sıvı seviyesi arasındaki fark, başka bir deyişle hata ve hatadaki değişim bulanık mantık ilkelerini kullanarak işlenmektedir. Bulanık mantık denetleyicisi, sistemin durumuna ve hata büyüklüğüne göre dinamik olarak ayarlanan uygun bir kontrol sinyali üretmektedir. Çalışmada, hata değişkeninin azaltılmasında etkili olan kontrol fonksiyonu  $k_1$ , bulanık mantık ile ayarlanarak  $e_2$  hata değişkeninin mümkün olduğunca hızlı bir şekilde sifıra indirilmesi sağlanmaktadır. Böylece sistem performansı iyileştirilmektedir.

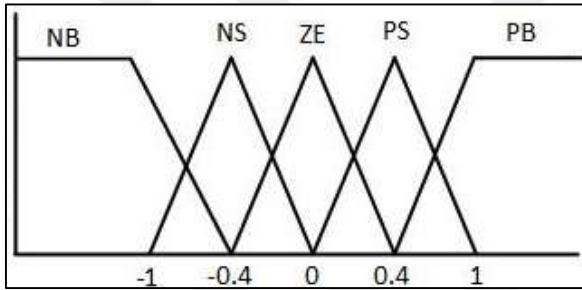
#### 4.2.1. Bulanıklaştırma birimi

Bulanık denetim sistemlerinde, sensörlerden elde edilen nümerik verilerin sınır değerleri belirlendikten sonra, bu verilerin bulanık forma dönüştürülmesi (bulanıklaştırma) gerekmektedir. Bu aşamada, veriler sıfır ile bir arasındaki değerlerle temsil edilerek normalize edilmektedir.

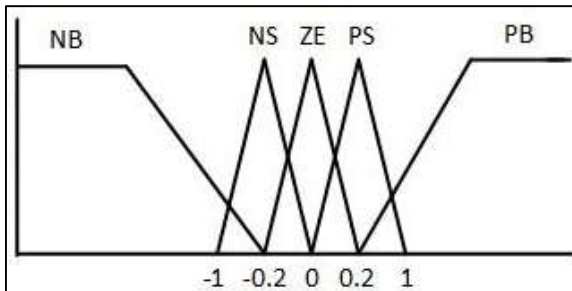
Nümerik verilerin bulanıklaştırılması sürecinde, önce mantık kümeleri belirlenmeli ve bu kümelerdeki her bir nokta, üyelik fonksiyonları ile tanımlanmalıdır. Üyelik fonksiyonları, sistem parametrelerini tanımlamakta ve genellikle üçgen, gauss, trapezoid, çan eğrisi şeklinde olabilmektedir.

Üçgen bulanıklaştırıcılar hesaplama zorluğuna neden olmadığından ve giriş belirsizliklerini iyi temsil ettiğinden oldukça sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle çalışmada üçgen üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir.

Şekil 4.2.'de hata ait üyelik fonksiyonları, Şekil 4.3.'te ise hatadaki değişime ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. Bu fonksiyonlarda, girilen değerlerin üyelik dereceleri 0'dan 1'e kadar değişen bir değer aralığında yer almaktadır. Hata ve hatanın değişiminde, beşer adet üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak sistem parametreleri modellenmiştir. Bu üyelik fonksiyonları Negatif Büyük (NB), Negatif Küçük (NS), Sıfır (ZE), Pozitif Küçük (PS) ve Pozitif Büyük (PB) dilsel etiketleri ile adlandırılmıştır.

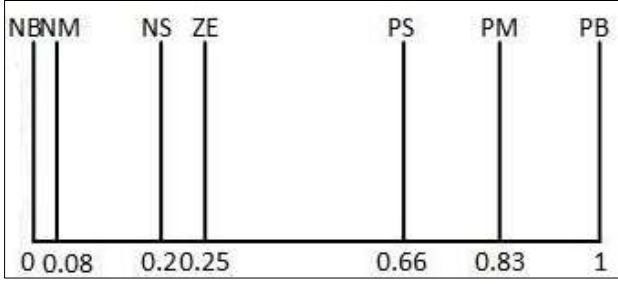


Şekil 4.2. Hata için mantık kontrol girişi MF'leri ,  $e_1$



Şekil 4.3. Hatadaki değişim için bulanık mantık kontrol giriş üyelik fonksiyonu,  $e_2$

Şekil 4.4.'te çıkış tekil üyelik fonksiyonlarındaki dilsel değişkenler Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NM), Negatif Küçük (NS), Sıfır (ZE), Pozitif Küçük (PS), Pozitif Orta (PM) ve Pozitif Büyük (PB) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.4. Bulanık mantık kontrol çıkışı  $k_1$  kontrol fonksiyonu için tekil üyelik fonksiyonları

#### 4.2.2 Bilgi tabanı

Bulanık denetim sistemlerinde bilgi tabanı, bulanık verileri tanımlama ve denetim kurallarını belirleme amacıyla kullanılır, bu veriler genellikle uzmanların sezgilerine ve deneyimlerine dayalıdır. Bu sistemler, bilgi tabanı, kural tabanı ve veri tabanı olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Kural tabanı, uzmanlar tarafından geliştirilmiş ve bulanık denetim davranışlarını belirleyen kontrol kurallarını barındırırken, veri tabanı bu kuralların yanı sıra üyelik fonksiyonlarını da tanımlamaktadır [24].

Kural tabanı, bir bulanık denetim sisteminde giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki mantıksal bağlantıları açıklayan kurallardan oluşmaktadır. Denetleyici çıkışı, bu kuralların sistem değişkenleri için belirlenen "eğer" ve kontrol değişkenleri için belirlenen "ise" komutlarıyla değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Kurallar, sistemin karar verme sürecinde, sistemin durum ve davranışını tanımlama da temel rol oynamaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında 5x5 boyutunda bir kural tabanı kullanılmıştır. Bu da bulanık denetim sisteminin karmaşıklığını ve performansını belirlemede etkili olmuştur. Bulanık denetim kurallarının oluşturulması sürecinde, uzman deneyimi ile kontrol edilen sistemin davranışları detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Çalışmada bulanık denetleyici girişleri hata,  $e_1$  ve hatadaki değişim,  $e_2$ , olarak alınırsa denetleyici çıkışı da  $k_1$ 'dir.

Sistemin kontrolünde bulanık denetim kuralları oluşturulurken şu hususlar dikkate alınmalıdır.

1. Hedeflenen çıkış değeri sağlanmış ve hata değişim oranı sıfır ise, bulanık denetleyicinin çıkış değeri sabit kalmalıdır.
2. Eğer çıkış değeri hedef değerden sapmışsa, kontrol fonksiyonu hata ve hata değişiminin işareti ile büyüklüğüne bağlı olarak ayarlanmalıdır. Hata hızla düzeliyorsa, kontrol fonksiyonu sabit tutulmalı; aksi durumda, bulanık denetleyici çıkışı hatanın büyüklüğüne bağlı olarak düzenlenmelidir [24].

Sistemde kullanılan kural tabanı, Mac-Vicar Whelan kural tabanına dayanarak geliştirilmiş olup, iki ana giriş olan hata  $e_1$  ve hatadaki değişim  $e_2$  ile tek çıkışlı  $k_1$  kontrol fonksiyonu temel alınarak oluşturulmuştur. Çizelge 4.1.'de bu kural tabanı detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.1.  $k_1$  kontrol fonksiyonu için kural tabanı

$e_2$	$e_1$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NS	NB	NM	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PM
PS	ZE	ZE	ZE	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB

#### 4.2.3 Karar verme ünitesi

Karar verme ünitesi, çıkarım stratejiye uygun olarak gerekli bilgiyi toplamakta ve denetleyici giriş değişkenlerini ilgili bulanık bilgi kurallarıyla birleştirerek bulanık denetim işaretini belirlemektedir. Eğer- ise kuralları bulanık kavramlarla ilişkilidir ve bu nedenle bulanık şartsal durumlar olarak ifade edilmektedir [24]. Bu çalışmada Mamdani bulanık çıkarım metodu kullanılmıştır.

#### 4.2.4 Durulaştırma

Bulanık çıkarım yoluyla elde edilen veriler, sisteme tekrar uygulamadan önce sayısal bir değere dönüştürülmelidir, bu dönüşüm işlemine "durulaştırma" denir. Durulaştırma ile karar verme ünitesinden gelen bulanık denetim işareti, sayısal kontrol işaretine çevrilmiştir. Bu çalışmada ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemi seçilmiştir. Bu

yöntem, belirli bir girdiye karşılık gelen çeşitli bulanık kuralların çıktılarının ağırlıklı ortalamasını hesaplamaktır. Ağırlıklı çarpımların toplamı, üyelik derecelerinin toplamına bölünerek kontrol işareti bulunmaktadır.



## 5. BULANIK GERİ ADIMLAMA KONTROLCÜ TASARIMI VE BENZETİMİ

Bu tez çalışmasında, geri adımlamalı kontrolün avantajlarını bulanık mantıkla birleştiren bir tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, GAK yöntemini destekleyen bir bulanık mantık birimi tasarlanmış ve bu birimle elde edilen kontrolcü “bulanık geri adımlamalı kontrolcü” olarak adlandırılmıştır.

GAK, yinelemeli bir kontrol yöntemi olup, uyumsuz belirsizliklere sahip kontrol sistemleri için belirgin avantajlar sunmakta ve doğrusal olmayan sistemlerdeki bozulmalar ve belirsizliklerle başa çıkmaktadır. Ancak genel olarak, GAK algoritmalarının kararlı durum hatalarını düzeltmede yetersiz olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni, geri adımlamanın tipik olarak asimptotik izleme sunmasıdır; başka bir deyişle, sistem istenen duruma ulaşana kadar geri adımlamaya devam eder. Hedef duruma ulaşıldığında ise sistem genellikle tam olarak hedefte değil, hedefe yakın bir konumda kararlı olmaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek ve sistemlerin dinamik tepkisini iyileştirirken sağlamlığını ve etkinliğini artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Kararlı durum hatasını azaltmak için en yaygın yöntemlerden biri, GAK ile birlikte bir integral fonksiyonu kullanmaktır. Bir diğer yöntem ise bulanık mantık denetleyici kullanımıdır.

Doğrusal olmayan sistemi alt sistemlere ayıran, belirsizliklerin ve bilinmeyen parametrelerin ele alınmasını kolaylaştıran geri adımlı kontrol yönteminde, bilinmeyen sistemin doğrusal olmama durumunu yaklaşık olarak tahmin etmek amacıyla bulanık mantık yaklaşımı kullanılmaktadır. Bulanık üyelik fonksiyonları denetleyicinin sağlamlığını korurken kararlı durum hatasını en aza indirmeye, kontrol doğruluğunun geliştirilmesine ve sağlamlığının artırılmasına yardımcı olmaktadır [27, 28].

Nihai kontrol yasalarının basit yapısı, geleneksel geri adım atma tasarımlarıyla ilişkili karmaşıklık sorunlarının üstesinden gelmesi nedeniyle önerilen bulanık yaklaşım ile birleşimi sonucunda elde edilen bulanık geri adımlı kontrol stratejisi sistem doğrusalsızlıkları ve belirsizlikleri karşısında istikrarlı, sağlam performansı garanti edebilen ve parametre takibi için avantajlı bir çözümdür [29].

Bu tez çalışmasında, bulanık geri adımlamalı kontrolde bulanık mantığın işlevi, tasarlanan geri adımlamalı denetleyicinin  $k_1$  kontrol fonksiyonunu sistemin mevcut durumu doğrultusunda ayarlamaktır. Bu yöntem, sıvı seviye denetimi için değişken bir kontrol fonksiyonu sağlayan bir geri adımlamalı denetleyici tasarımı sunmaktadır. Bulanık mantık denetleyicisinin iki girişi ve bir çıkışı vardır. İlgili hata  $e_1$  ve onun türevi  $\dot{e}_1$ , yani  $e_2$ , giriş olarak alınır ve Eş. 5.1 ve Eş. 5.2 ile tanımlanır. Kontrol fonksiyonu  $k_1$ , sıvı seviyesi kontrolü için kontrol giriş değeridir.

$$e_1 = h_{ref} - h_{out} \quad (5.1)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 \quad (5.2)$$

$h_{ref}$  referans sıvı seviyesini  $h_{out}$  ise sistemin sıvı seviyesi çıkışını ifade etmektedir. Ayrıca sistemin diğer kontrol fonksiyonu  $k_2$  geri adımlama yaklaşımında gelmekte olup sabit bir değere sahiptir.

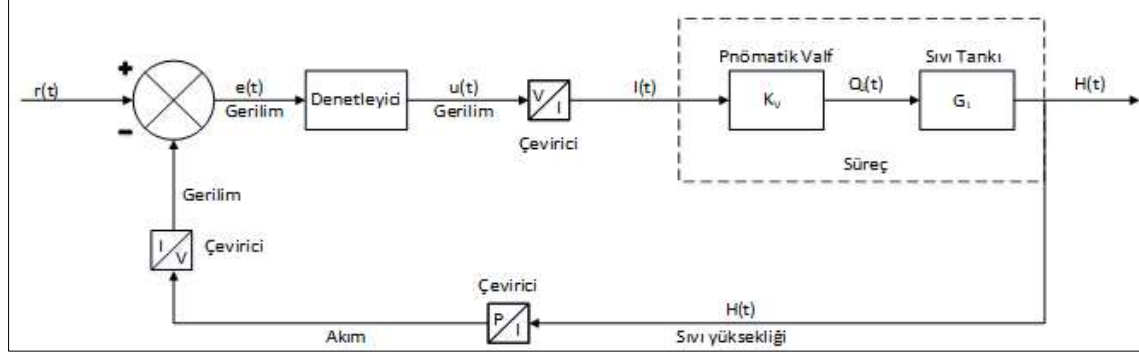
### 5.1. GUNT RT512 Sıvı Seviye Denetim Sisteminin Matematiksel Modellenmesi

GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi üzerinde bulanık geri adımlamalı denetim problemi uygulanacağından sistemin durum uzay gösteriminin yapılması gerekmektedir. Bunun için önce sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiş ve daha sonra durum uzay gösterimi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, GUNT RT512 sıvı seviye denetim sisteminin matematiksel modellenmesi hem teorik hem de deneysel yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin teorik matematiksel modelini gerçekleştirirken Ergüzel'in çalışmasından yararlanılmıştır. Ergüzel, GUNT RT512 sistemini birinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile temsil etmiştir. Bu transfer fonksiyonunun parametrelerini, sistem verilerinden yola çıkarak hesaplamıştır. Elde edilen parametreler sayesinde, sistemin matematiksel modeli transfer fonksiyonu ile anlatılmıştır [30].

Şekil 5.1.'de sistemin kapalı çevrimine ait blok diyagramı görülmektedir. Sistem Eş. 5.3.'te yer alan 1. dereceden aktarım fonksiyonu ile giriş sinyali pnömatik vanaya uygulanan akım

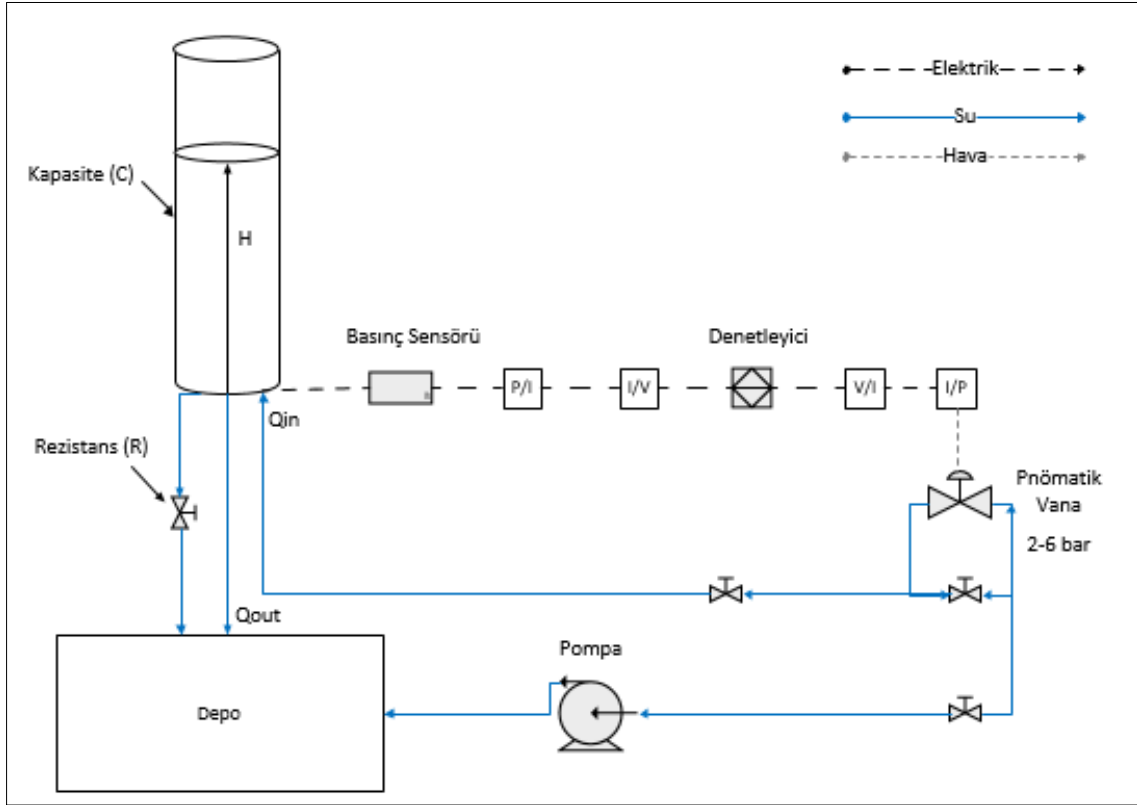
sinyali  $I$  (mA) ve çıkış sinyali sıvı seviye tüpündeki sıvı yüksekliği  $H$  (cm) olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi kapalı çevrim blok diyagramı

$$\frac{\text{Çıkış sinyali}}{\text{Giriş sinyali}} = \frac{H(s)}{I(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (5.3)$$

Çizelge Ek.1.'de sisteme ait teknik özellikler belirtilmiştir. Buna göre sıvı seviye tüpünün sıvı kapasitesi 7 litredir. Yüksekliği 60 cm ve çapı 113 mm'dir. Aşağıdaki görselde sıvı tankı görülmektedir.



Şekil 5.2. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi

GUNT RT512 sıvı seviye sisteminin çıkışındaki boru vana sistemde direnç oluşmakta ve bu direnç  $R$  ile gösterilmektedir. Sistemdeki sıvı yüksekliği değişimi  $H$  ile sıvı seviye tüpünden dışarıya sıvı akışı ise  $Q_{out}$  ile ifade edilmektedir. Bu durumda, sisteme ait direnç Eş. 5.4 ile tanımlanmaktadır:

$$R = \frac{\text{Sıvı yüksekliğindeki değişim (mm)}}{\text{Dışarıya sıvı akışı (mm}^3/\text{sn)}} = \frac{H}{Q_{out}} \quad (5.4)$$

Sıvı hacmindeki değişimin sıvı yüksekliğindeki değişime oranı  $C$  ile sıvı seviye tüpüne giren sıvı akışı ise  $Q_{in}$  ile gösterildiğinde, sistemin kapasitesi Eş. 5.5 ile ifade edilmektedir:

$$C = \frac{\text{Sıvı hacmindeki değişim (mm}^3\text{)}}{\text{Sıvı yüksekliğindeki değişim (mm)}} = \frac{dV}{dH} \quad (5.5)$$

Bu durumda sıvı seviye tüpünün doğrusal olduğu varsayımıyla kapasitans eşitliği Eş. 5.6'deki gibi yazılmaktadır:

$$C \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (5.6)$$

Eş 5.4'i Eş 5.6 içerisine yerleştirildiğinde Eş 5.7'e ulaşılmaktadır:

$$RC \frac{dH}{dt} + H = RQ_{in} \quad (5.7)$$

Eş 5.7'in Laplace dönüşümü alındığında Eş 5.8 elde edilmektedir:

$$G_t(s) = \frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (5.8)$$

Eş. 5.8 de görüldüğü üzere sistemin matematiksel modelini elde etmek için sıvı direnci  $R$  ve kapasitans  $C$  değerlerini hesaplamak gerekmektedir. Ergüzel çalışmasında bu değerleri  $R = 0,012$  ve  $C = 10032$  olarak hesaplamıştır [30]. Bu bağlamda sisteme ait transfer fonksiyonu Eş. 5.9'deki gibi tanımlanmaktadır:

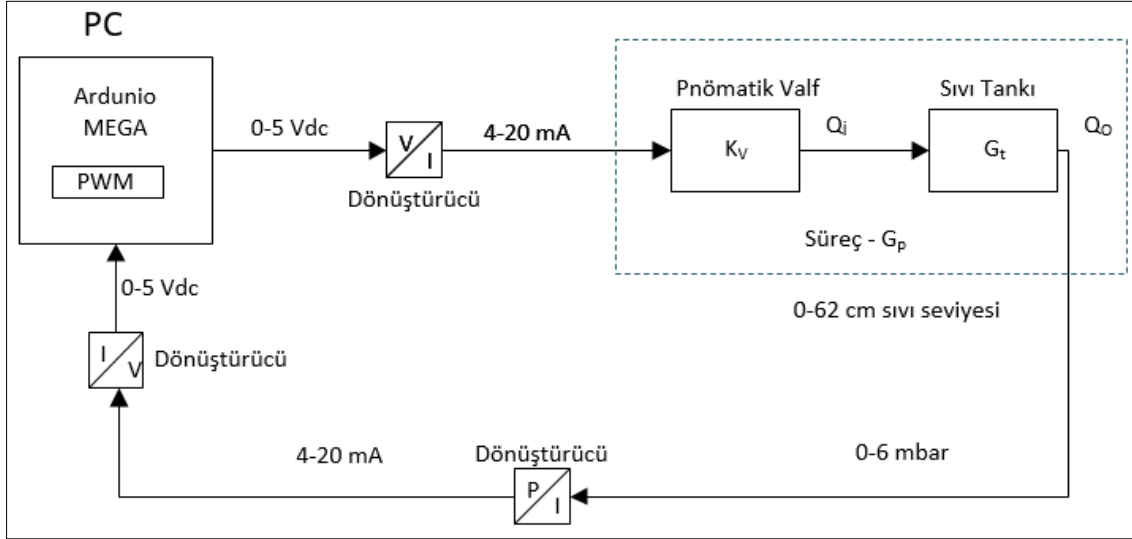
$$G_t(s) = \frac{0.012}{(0.012*10032)s+1} = \frac{0.012}{120.38*s+1} \quad (5.9)$$

Sıvı seviye tüpüne gönderilen sıvı miktarı pnömatik vana açıklığına göre değişmektedir. Akım ile sürülen pnömatik vananın kazancı akım ve vana çıkışında oluşan sıvı akışını  $Q_{in}$  ile ilişkili olup pnömatik vana kazancı  $K_v=14000$  olarak hesaplanmıştır [30]. Böylece sürece ait transfer fonksiyonu Eş. 5.10'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$G_p(s) = K_v(s) * G_t(s) = 14000 * \frac{0.012}{(0.012*10032)s+1} = \frac{168}{120.38*s+1} \quad (5.10)$$

RT512 sıvı seviye kontrol sisteminin dinamik modelini oluşturmak amacıyla, sistem açık çevrim modunda çalıştırılmış ve giriş ile çıkış verilerini içeren bir veri seti elde edilmiştir. Veri toplama aşamasında, kontrol sinyaline karşılık gelen sıvı seviyesindeki değişiklikler dikkate alınmıştır. Bu süreçte, Şekil 5.3.'teki açık çevrim kullanılarak gerilim giriş verisine karşılık sıvı seviye yüksekliği çıkış verisi toplanmıştır. Toplanan bu veri seti, yapay sinir ağı modelinin eğitilmesi için kullanılmış ve modelin çıkışları ile sistemden alınan test verileri arasındaki ilişki regresyon eğrileri aracılığıyla analiz edilmiştir. Sonuçlar, modelin yüksek

doğrulukla çalıştığını ve etkinliğini doğrulamıştır. Bu veri toplama ve modelleme çalışması, bildiri ve yayın olarak tarafımızca sunulmuştur [31].



Şekil 5.3. Sistemin açık çevrim kontrolü

Bu tez çalışmasında Eş. 5.10' da belirtilen transfer fonksiyonu ile 0 - 60 cm yüksekliği için farklı değerlerde benzetim çalışması yapılmıştır. Esas uygulama ise laboratuvar ortamında çalışılan GUNT RT512 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla matematiksel modelin doğruluğu konusunda çalışma yapılmamıştır.

## 5.2. Referans Yörüngesinin Belirlenmesi

Sistem çıkışını belirli bir hedefe yaklaştırmak için adım dizisinden oluşan kontrol yörüngeleri her adımda, sistem çıkışını belirlenmiş hedefe doğru yaklaştırmaktadır. Kontrol edilen sistemin istenen davranışını tanımlamak için bir referans yörünge belirlenmelidir. Bu referans yörünge, zamanla değişen hedef değerlerden oluşmaktadır. Kontrol yörüngeleri, birbirleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanmalıdır; ilk kontrol yörüngesi bu bağlamda belirlenmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, su seviye tüpünün doluluk seviyesini belirli bir seviyeye getirmek amacıyla ilk kontrol yörüngesi oluşturulmuştur. İkinci kontrol yörüngesi ise, istenen sıvı seviyesine belirli bir hızda ulaşmayı hedeflemektedir.

Geri adımlama kontrol algoritmasında, her kontrol yörüngesi için bir denetleyici tasarlanmaktadır. İlk denetleyici, referans yörüngesine en yakın olan kontrol yörüngesi

olmaktadır. Sonraki denetleyiciler ise, bir önceki kontrol yörüngesine göre tasarlanmaktadır. Denetleyiciler, geri adımlama fonksiyonlarından ve sistemin modelinden türetilmektedir.

### 5.3. Geri Adımlama Fonksiyonlarının Seçimi

Geri adımlama kontrol algoritması, kontrol yörüngelerini oluşturmak için geri adımlama kontrol fonksiyonları kullanmaktadır. Her kontrol yörüngesi için bir geri adımlama fonksiyonu seçilmelidir. Geri adımlama kontrol fonksiyonları, sistem dinamiklerini ve hedef yörüngeleri dikkate alarak tasarlanmaktadır. Genellikle Lyapunov fonksiyonlarının kullanılmasıyla bu kontrol fonksiyonları elde edilmektedir. Geri adımlama kontrol fonksiyonları, her bir kontrol yörüngesi için ayrı olarak belirlenmektedir. Fonksiyonlar, sistemin önceki yörüngelerinin kontrolünü sağlarken bir sonraki yörüngeye geçişi mümkün kılmaktadır. Bu kontrol fonksiyonları, sıvı seviye tüpünün doluluk seviyesine ilişkin hedefe doğru hareket etmek için gereken sıvı seviye değişimlerini girdi değişkeni olarak belirlemektedir. Ayrıca her bir kontrol yörüngesi için bir sanal kontrolcü tasarlanmaktadır. Sanal kontrolcü, geri adımlama fonksiyonunu ve sistemin dinamiklerini kullanarak, sistemi bir sonraki yörüngeye doğru hareket ettirmektedir. Sıvı seviye kontrolünde, sanal kontrolçüler genellikle basınç sensörlerini okuyarak, girdi değişkenlerindeki uygun değişiklikleri gerçekleştirmektedir.

Geri adımlama, geri besleme kontrol yasalarını oluşturmak ve ilgili Lyapunov fonksiyonlarını sistematik olarak seçmek için özyinelemeli bir tasarım prosedürü olmaktadır. Geri adımlamanın arkasındaki fikir, belirli durumları diğer durumlar için sanal kontrol olarak düşünmek ve kontrol edilen durumların kararlılığını sağlamak için Lyapunov fonksiyonlarını kullanmaktadır.

Bir sisteme GAK uygulanırken, ilk durum için bir sanal kontrol yasası atanmakta ve bir kontrol Lyapunov fonksiyonu aday tanıtılmaktadır. Sanal kontrolün ifadesi daha sonra Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı olacak şekilde seçilmektedir. Bu, sistemin kararlılığını sağlamaktadır. Tasarımcı daha sonra ikinci durum için sanal kontrolcü oluşturmakta, Lyapunov aday fonksiyonunu sanal durumları içerecek şekilde genişletmekte ve sanal kontrol yasasını seçmektedir. Geri adımlama, sistemin tüm durumlarını kapsayana kadar özyinelemeli olarak tekrarlanmaktadır. Son olarak, tasarımcı asimptotik kararlılığı garanti altına almış olmaktadır.

Durum uzayı formundaki geri beslemeli doğrusallaştırılabilir sistem için,

$$\ddot{x} = f(x) + g(x)u \quad (5.11)$$

Sistemin düzgün bir durum geri besleme kontrolü ile kararlı hale getirileceği varsayılır.

$$u = \alpha(x) \quad (5.12)$$

$$e_1 = y_{gerçek} - y_{istenen} = x_{1gerçek} - x_{1istenen} \quad (5.13)$$

$e_1$  sıvı seviye hatası göstermektedir. Sistemin kararlı olduğu varsayımından dolayı, bu sistem için negatif tanımlı türevi olan bir kontrol Lyapunov fonksiyonu, örneğin  $V(x)$ , mevcuttur ve aday kontrol Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki şartları sağlamaktadır.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dx}(f(x) + g\alpha(x)) \leq -W(x) \leq 0 \quad (5.14)$$

İlk kontrol Lyapunov fonksiyonunu  $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$  olarak seçilir,

türevi  $\dot{V}_1 = e_1 \cdot \dot{e}_1 = e_1[x_2 - \dot{y}_d]$ , sistemin kararlı olması için  $\dot{V}_1$  negatif olmalıdır, bu nedenle istenen  $x_{2d} = -k_1e_1 + \dot{y}_d$  iyi bir seçimdir; bu sanal kontrol  $\alpha_1$ 'dir.

İkinci durum için geri adımlamada;

$$e_2 = x_{2gerçek} - x_{2d} = x_{2gerçek} + k_1e_1 - \dot{y}_d \quad (5.15)$$

artırılmış bir kontrol Lyapunov fonksiyonunu tanıtlmıştır:

$$V_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2$$

$\dot{e}_1 = x_2 - \dot{y}_d = e_2 - k_1e_1$  olduğundan, artırılmış kontrol Lyapunov fonksiyonunun türevi olarak  $V_2$  nin türevini alınıp:

$$\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 + e_2[e_1 + \dot{x}_2 - \alpha_1] \quad (5.16)$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [(1 - k_1^2) e_1 + k_1 e_2 + \dot{x}_2 - \dot{y}_d] \quad (5.17)$$

İkinci sanal kontrol olarak  $x_3$ ,  $\dot{x}_2$ 'nin seçilmesi ve değerinin  $\dot{V}_2$ 'yi kesin negatif yapacak şekilde seçilmesi şu sonucu verir.

$$\alpha_2 = (x_3)_d = (k_1^2 - 1)e_1 - (k_1 + k_2)e_2 + \dot{y}_d = \dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (5.18)$$

Böylece sistem kontrol girişi;

$$u = [g^{-1}(x)(k_1^2 - 1)e_1 - (k_1 + k_2)e_2 + \dot{y}_d - f(x)] \quad (5.19)$$

olarak bulunur.

#### 5.4. Geri Adımlamalı Kontrolün Sıvı Seviye Sisteminin Üzerinde Uygulanması

Yukarıda belirtilen adımlar sıvı seviye sistemine uyarlandığında sistemin konfigürasyon uzayı eşitliği için aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir.

Eş. 5.13'te belirtilen  $x_1$  değişkeni sistemden gelen gerçek sıvı seviyesini,  $h_0$  gösterebilir.

$$x_1 = h_0 \quad (5.20)$$

Gerçek sıvı seviyesindeki zamana bağlı değişim  $x_2$  olarak tanımlanır.

$$\dot{x}_1 = \dot{h}_0 = x_2 \quad (5.21)$$

$$x_2 = \dot{h}_0 \quad (5.22)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{h}_0 \quad (5.23)$$

GAK yaklaşımı ile sistemin çıkışı olan sıvı seviyesindeki hata  $e_1$  ve hatanın değişimi  $e_2$  alt sistemden başlayarak her bir alt sistem için bir sanal kontrol yasası tasarlanır.

$$e_1 = h_{ref} - h_0 \quad (5.24)$$

$$\dot{e}_1 = \dot{h}_{ref} - \dot{h}_0 = e_2 \quad (5.25)$$

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (5.226)$$

$$\dot{V}_1 = e_1 \cdot \dot{e}_1 \quad (5.27)$$

$$\dot{V}_1 = e_1 [x_2 - \dot{h}_{ref}] \quad (5.28)$$

Sanal kontrol yasaları, her adımda Lyapunov fonksiyonuna dayalı olarak her bir alt sistemi ayrı ayrı sabitleştirecek şekilde tasarlanır. Sistem kararlılığı için  $x_2, x_{2d}$  olarak seçilir.

$$x_{2d} = -k_1 e_1 + \dot{h}_{ref} \quad (5.29)$$

Hatanın değişimi için geri adımlama algoritması;

$$e_2 = x_{2gerçek} - x_{2d} = x_{2gerçek} + k_1 e_1 - \dot{h}_{ref} \quad (5.30)$$

Böylece her adımda bir sanal kontrol yasası tasarlanır ve tüm sistemin girişine doğru hareket ettirilir.

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (5.31)$$

$\dot{e}_1 = x_2 - \dot{y}_d = e_2 - k_1 e_1$  kullanarak  $V_2$  nin türevi alınır.

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [e_1 + \dot{x}_2 - \alpha_1] \quad (5.32)$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [(1 - k_1^2) e_1 + k_1 e_2 + \dot{x}_2 - \ddot{h}_{ref}] \quad (5.33)$$

$\dot{x}_2$  'yi ikinci sanal kontrol olarak seçilir ve  $\dot{V}_2$  işlemek için kesin negatif değeri seçilir.

$$u = \alpha_2 = \dot{x}_2 = \ddot{h}_o = (k_1^2 - 1)e_1 - (k_1 + k_2)e_2 + \ddot{h}_{ref} \quad (5.34)$$

Tasarlanan geri adımlama kontrol algoritması, sistem modeli ve kontrolcülerin kullanılmasıyla uygulanır. Sistem, referans yörüngesine yaklaşmak için her bir kontrol yörüngesi üzerinde ileri geri çevrim adımları kullanarak kontrol edilir. Geri adımlama fonksiyonları ve kontrolcüler, her bir adımda sistemin hedefe doğru hareket etmesini sağlar.

Eş. 5.34'de belirtildiği üzere sistemin kontrol kazançları  $(k_1^2 - 1)$  ve  $(k_1 + k_2)$ 'dir. Bu çalışmada  $k_1$  kontrol fonksiyonu bulanık denetleyici ile tespit edilmiş,  $k_2$  kontrol fonksiyonu ise deneme yoluyla -0.08 sabit değer olarak tercih edilmiştir.

### 5.5. Bulanık Geri Adımlamalı Kontrolün Sıvı Seviye Sisteminin Üzerinde Uygulanması

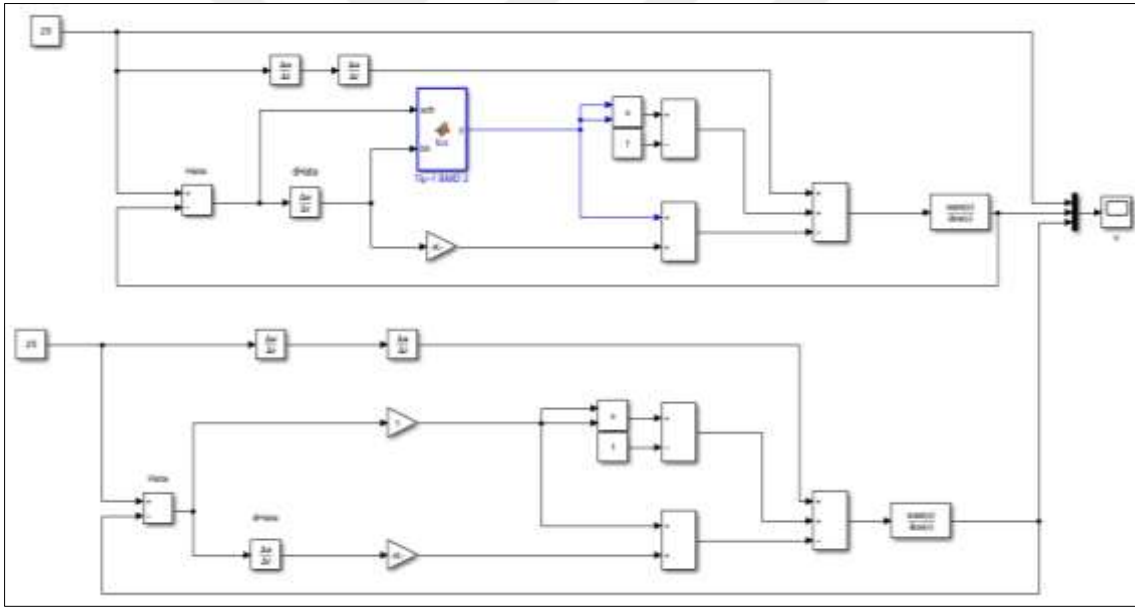
Regülasyon problemlerinde, hata değişkeni sıfıra indirilmeye çalışılmaktadır. Denetleyici ve sistemin dinamikleri, hatanın azalmasını veya sıfıra ulaşmasını belirlemektedir. Bu algorithmada, hatanın azaltılmasında başarılı olan kontrol fonksiyonu  $k_1$ , bulanık denetim ile ayarlanarak,  $e_2$  hata değişkeninin mümkün olduğunca hızlı bir şekilde sıfıra indirilmesini sağlamaktadır. Böylece sistem performansı iyileştirilmektedir. Hata  $e_1$  büyük olduğunda kontrol fonksiyonu  $k_1$  yeterince büyük seçilmektedir.  $e_1$  hatası küçük olduğunda ise kontrol fonksiyonu  $k_1$  küçük tutulmaktadır. Ayrıca,  $e_1$ 'e ek olarak  $e_2$  değişkeni de değerlendirilerek, kontrol fonksiyonu  $k_1$ 'in değişim eğilimine göre ayarlanmaktadır.

### 5.6. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçları

Dinamik sistemlerin performansını değerlendirmek için kullanılan çeşitli kriterler vardır. Bu kriterler, sistemin istenen davranışları gerçekleştirme yeteneğini belirlemek için önemlidir. Tepki süresi ve yerleşme süresi sistemin istenen duruma ne kadar çabuk ulaştığını ve istenen değerlere ne kadar çabuk yerleştiğini belirlerken, aşım istenmeyen aşırı tepkileri değerlendirir. Bu performans kriterleri sistem tasarımı ve kontrol süreçlerinde önemli rol oynamaktadır.

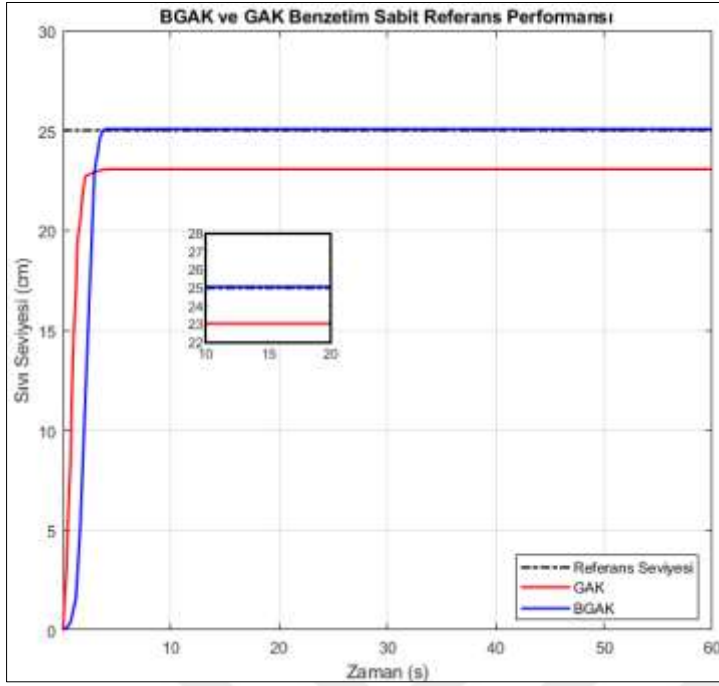
Bu çalışmada sıvı seviye denetiminin benzetim çalışması için MATLAB/Simulink kullanılmıştır. Önerilen bulanık geri adımlamalı denetimin performansını değerlendirmek için geleneksel bir geri adımlamalı denetimden elde edilen sonuçların karşılaştırmalı bir analizi kullanılmıştır. Aşım, yükselme zamanı ve özellikle kararlı durum hatası gibi çeşitli performans kriterleri gözlemlenmiştir.

GAK doğrudan matematiksel modelleme ve kontrol teorisi ilkelerine dayandığından, sistem modelleri genellikle doğrusal ve deterministik olmalıdır. Ancak, bulanık geri adımlamalı kontrolde, bulanık mantık ve kontrol teorisi ilkelerine göre, sistem modelleri genellikle belirsizlik içerebilir ve doğrusallık varsayımları gerektirmez. Denetleyicilerin etkinliğini doğrulamak için Şekil 5.4.'te yer alan sistem modeli oluşturulmuş ve test farklı sıvı seviyelerinde ve değişen seviyeler için gerçekleştirilmiştir.

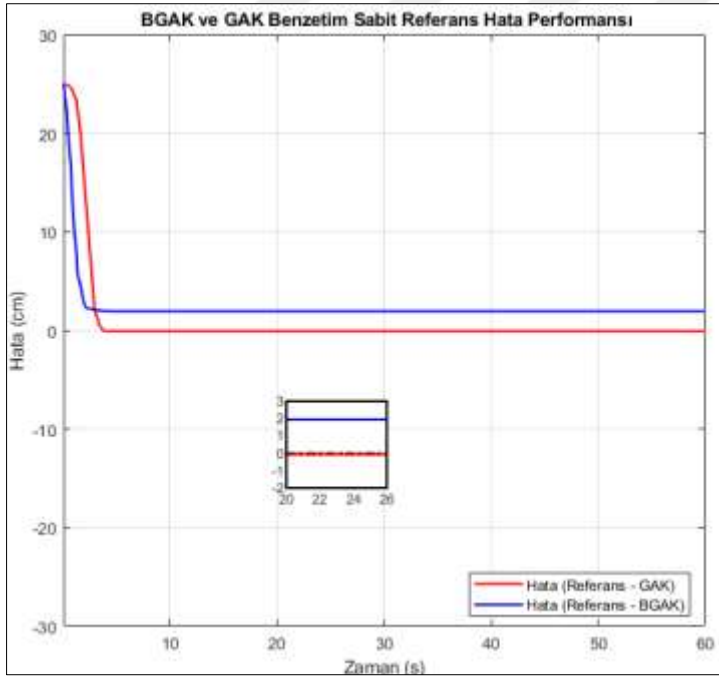


Şekil 5.4. Sistemin GAK ve BGAK Simulink benzetim modeli

Şekil 5.5, 25 cm'lik sabit referans sıvı seviyesi için her iki sistem yanıtını göstermektedir. Seviye bir Constant Simulink bloğu ile tanımlanmıştır. Şekilde geleneksel geri adımlamalı kontrol tepkisinde kararlı durum hatasının varlığı görülmektedir. Bu hatanın bulanık geri adımlamalı denetleyici ile çözüldüğü de şekilden anlaşılmaktadır.



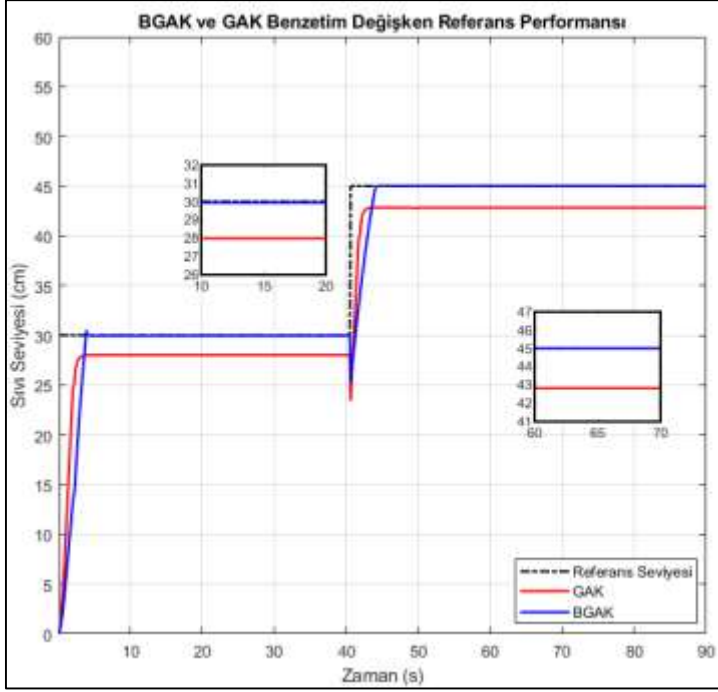
Şekil 5.5. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için sistem yanıtları



Şekil 5.6. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için sistem hata yanıtları

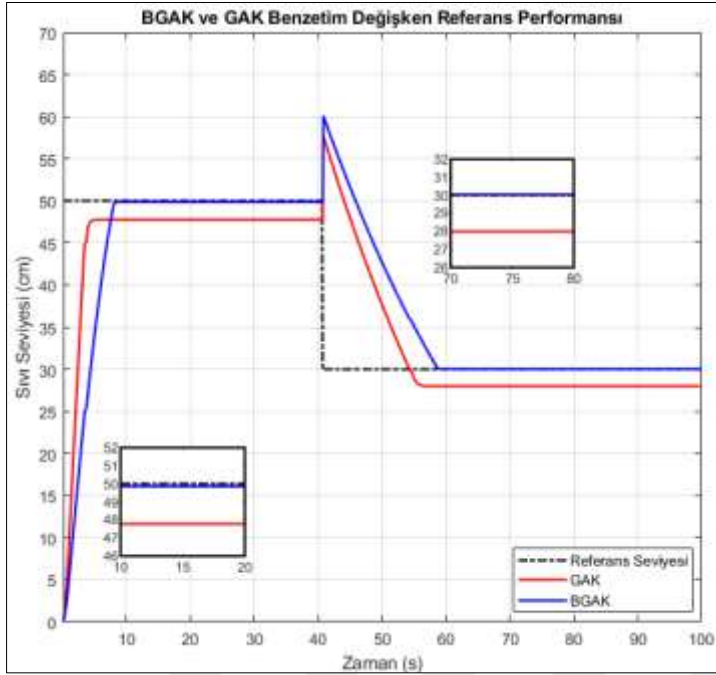
Artan referans seviyeleri için kontrolcülerin davranışını test etmek amacıyla step bloğu kullanılarak referans sıvı seviyesi ilk 40 saniye boyunca 30 cm olarak ayarlanmış ve 40. saniyede referans 45 cm olarak değiştirilmiştir. Bu duruma ait iki sistemin yanıtları Şekil 5.7.'de gösterilmektedir. Geleneksel ve bulanık geri adımlamalı denetleyici için yükselme

süresi neredeyse aynıdır ve buna ek olarak bulanık geri adımlamalı denetleyicide aşım ve kararlı durum hatası yoktur. Kararlı durum hatası geleneksel geri adımlamalı denetleyicide hala bir sorundur. 40. saniyede artma eğrisi beklenirken her iki kontrolcü 5 cm azalma göstermiştir. Bu durum sistem modelinde bazı elemanların davranışlarının doğrusal olarak kabul edilerek denetleyicilerin tasarlanmasından kaynaklanmaktadır.



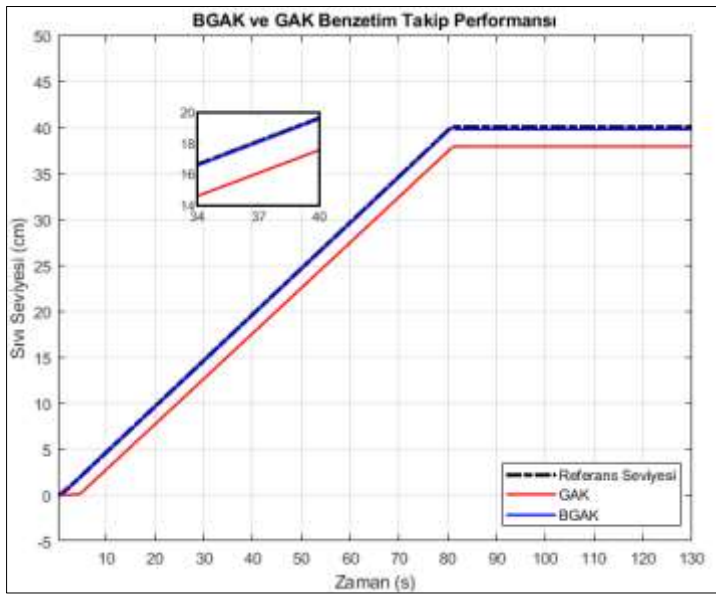
Şekil 5.7. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi)

Şekil 5.8.'de referans sıvı seviyelerini azaltmak için test tekrarlanmıştır. İlk 40 saniye için referans 50 cm'ye ayarlanmış ve geri kalan benzetim süresi için referans 30 cm'ye ayarlanmıştır. Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi, geleneksel geri adımlamalı denetleyici ile hala bir kararlı durum hatası vardır. 40. saniyede azalma eğrisi beklenirken her iki kontrolcü 10 cm yükselme göstermiştir. Bu durum sistem modelinde bazı elemanların davranışlarının doğrusal olarak kabul edilerek denetleyicilerin tasarlanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.8. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi)

Denetleyicilerin izleme performansını test etmek için referans giriş Şekil 5.9.'da görüldüğü gibi zamanla değişen seviyeye ayarlanmıştır. Bulanık geri adımlamalı denetleyicinin yanıtı referans sinyali ile aynıdır. Ancak, geleneksel geri adımlamalı denetleyici referans sinyalini kararlı durum hatası ile takip etmektedir.



Şekil 5.9. İzleme için sistem yanıtları

Denetleyicilerin performans özellikleri Çizelge 5.1.'de gösterilmektedir. Çizelgede GAK ve BGAK için kararlı durum hatası ( $e_{ss}$ ), yükselme zamanı ( $t_r$ ), tepe zamanı ( $t_p$ ) yerleşme zamanı ( $t_s$ ) ve aşım ( $M_p(\%)$ ) değerleri verilmiştir. Bu değerlerin iyileşme veya kötüleşme yüzdeleri yukarı veya aşağı oklarla gösterilmiştir. Bu parametrelerin bazıları ise sistem cevabı için hesaplanamadığından Not Applicable (NA) olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1. Denetleyiciler için performans parametreleri (benzetim sonuçları)

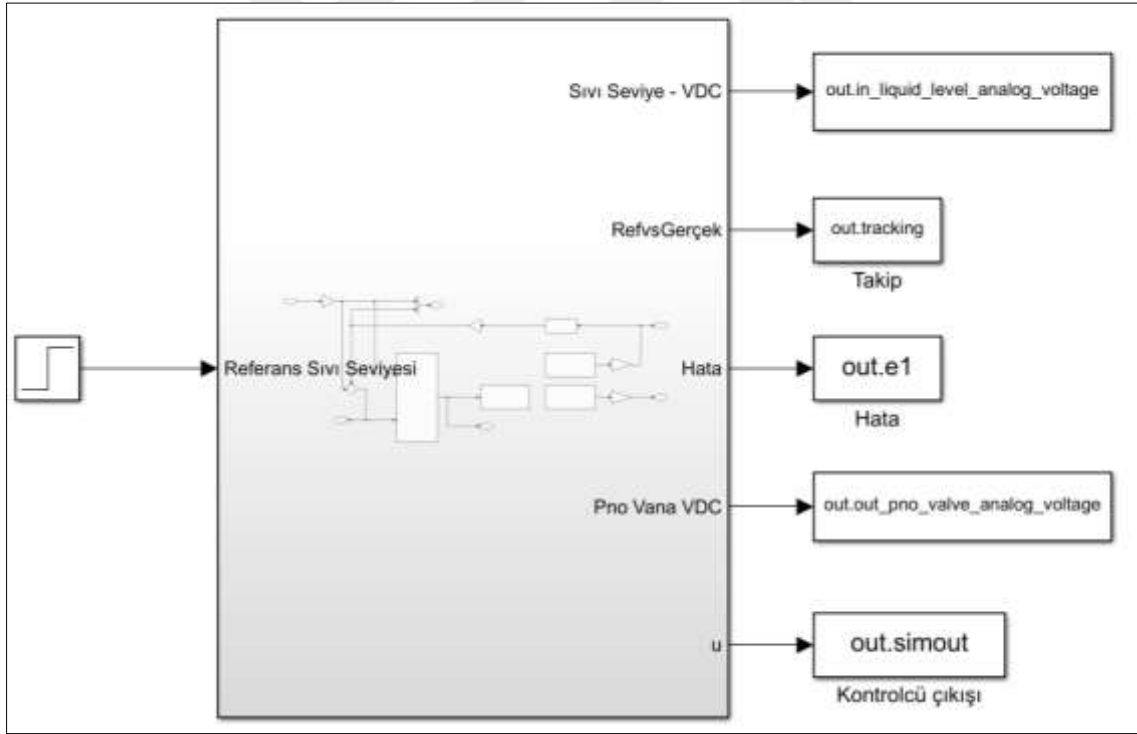
	GAK	BGAK	Gelişme
$e_{ss}$ (cm)	1,94	$5*10^{-6}$	↑ % 100
$t_r$ (s)	0,377	0,69	↓ % 45
$t_p$ (s)	NA	0,9	NA
$t_s$ (s)	NA	1,2	NA
$M_p(\%)$	NA	% 1,75	NA

$e_{ss}$  denetleyici performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Sistem çıkışının referans değerine göre izleme performansını göstermektedir. Sistemin doğruluğu, kararlılığı, verimliliği ve güvenliği büyük ölçüde bu değere bağlıdır. Bir denetim sistemine uygulanan referans giriş sinyali ile sistemin kararlı duruma geçtikten sonraki çıkışı arasındaki hata ile elde edilir. Geleneksel geri adımlı denetimde tam değeri değil asimptotik kararlılığı garanti eder, bu nedenle genellikle kararlı durum hatasına sahiptir. Çizelge 5.1.'den de görülebileceği gibi, bulanık geri adımlı denetleyici kararlı durum hatası üzerinde %100 etkilidir.  $t_r$ , sinyal değerinin %10 değerini geçmesi ile %90 değerini geçmesi arasındaki zaman alınarak elde edilir. Geleneksel geri adımlı denetleyici avantajlı gibi görünse de denetleyicinin en temel amacı olan referans değere ulaşamamaktadır. Ayrıca, bulanık denetleyici için aşımından feragat edilerek yükselme ve yerleşme zamanı azaltılabilir. Geleneksel geri adımlı denetleyicide sinyal aşımı olmadığı için  $t_p$  ve  $M_p(\%)$  değerleri hesaplanmaz. Yerleşme süresi de NA'dır, çünkü bu dinamik yanıt referans değere ulaşmaz. Bulanık geri adımlı denetleyici için aşım sadece %1,75'dir ve bu değer kabul edilebilirdir. Sonuç olarak, çizelgeden de görülebileceği gibi, bulanık geri adımlı denetleyici durağan durum hatasının üstesinden az bir aşım ve az bir gecikme ile gelmektedir.

## 6. SIVI SEVİYE DENETİM CİHAZININ BULANIK GERİ ADIMLAMA KONTROLLÜNÜN GERÇEK ZAMANLI UYGULAMA SONUÇLARI

Bu bölümde, geliştirilen kontrol yöntemi laboratuvar ortamında GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi üzerinde uygulanmış ve doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar, teorik bulguların pratikteki geçerliliğini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. GUNT RT512 sıvı seviye denetim sistemi, bilgisayar üzerinden Arduino Mega, DAC, akım/gerilim ve gerilim/akım dönüştürücüler kullanılarak kontrol edilmiştir.

Şekil 6.1. 'de Simulink modeli yer alan sistemin; geleneksel geri adımlamalı denetleyici için Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'te, bulanık geri adımlamalı denetleyici için Şekil 6.4.'te ve Şekil 6.5.'te görüldüğü gibi tasarlanmıştır.

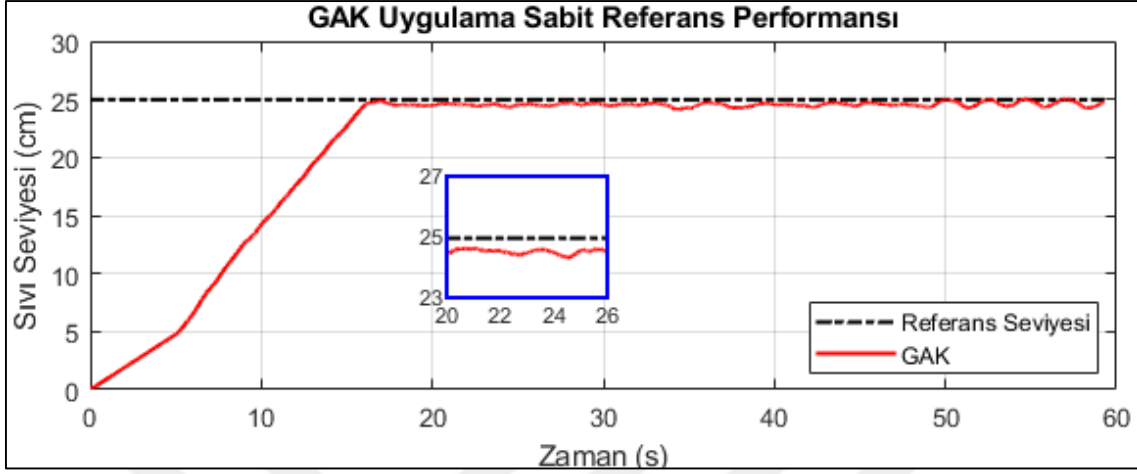


Şekil 6.1. Gömülü sistemin Simulink modeli

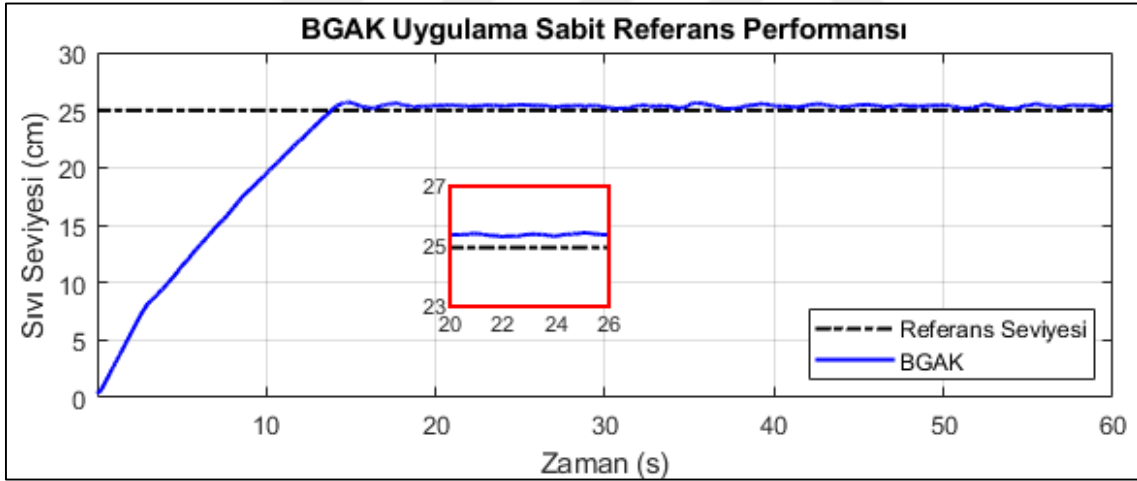




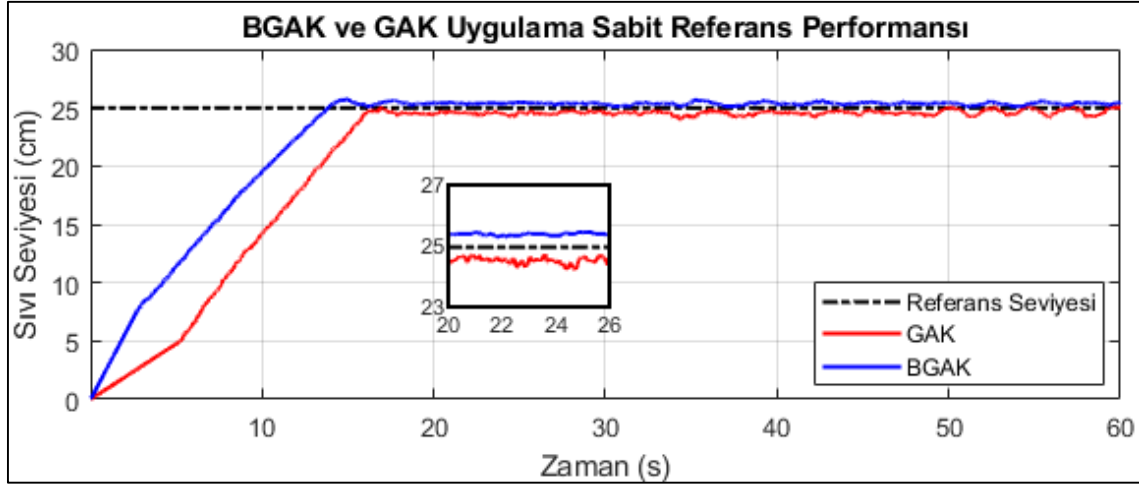
üzerinde göstermektedir. Şekil 6.9’da ise her iki denetleyicinin hata performansı aynı şekil üzerinde gösterilmektedir.



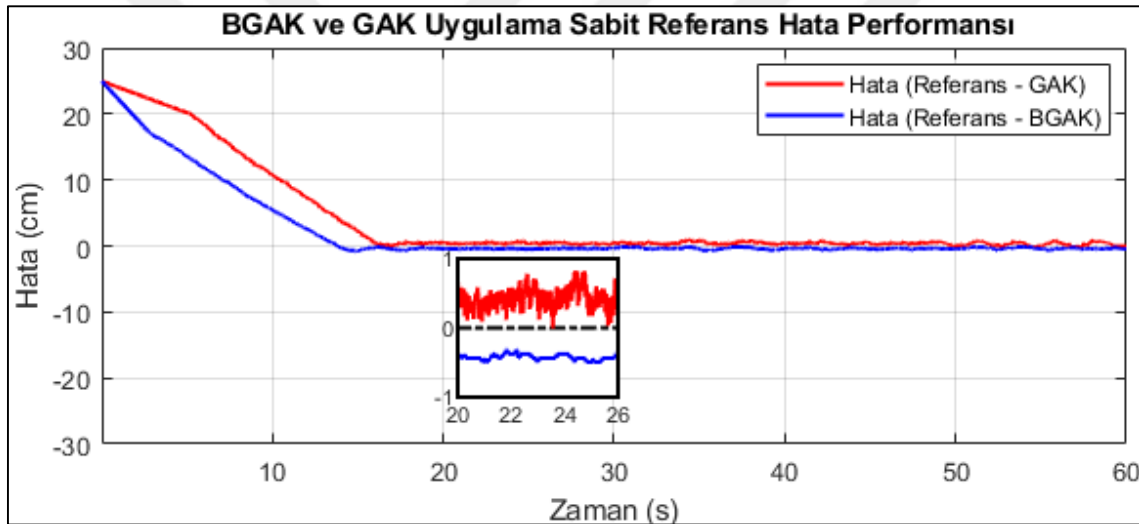
Şekil 6.6. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem cevabı



Şekil 6.7. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem cevabı



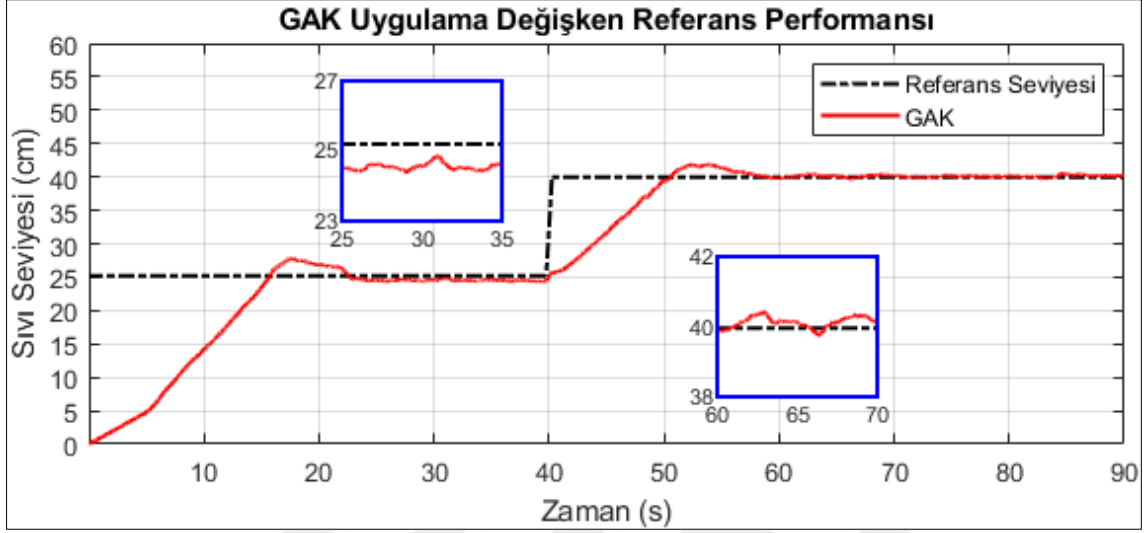
Şekil 6.8. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları



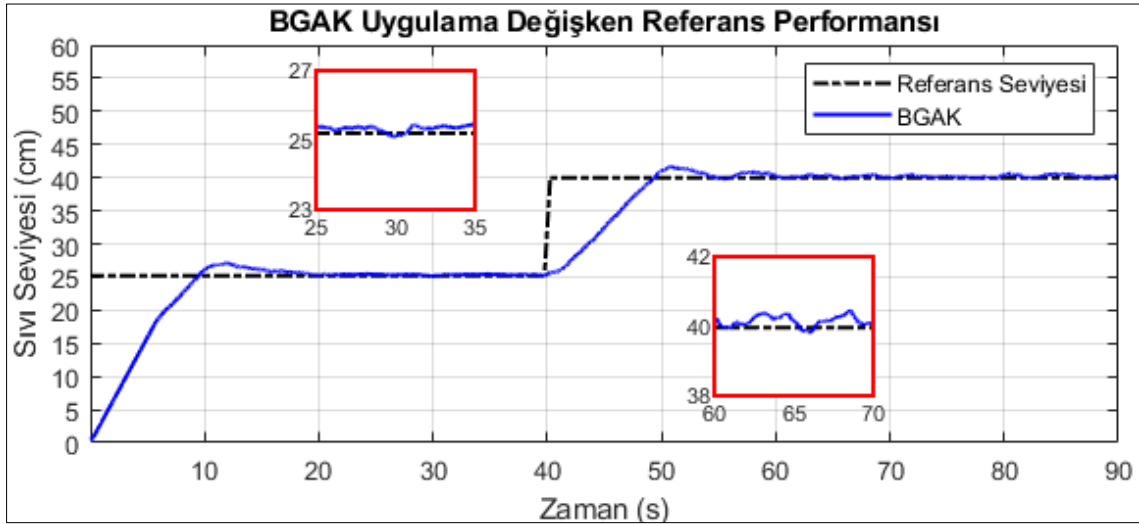
Şekil 6.9. Sabit 25 cm sıvı seviyesi için iki yöntemin hata analizi

GAK yöntemi ile kontrol edilen sıvı seviyesi, referans seviyesine daha yavaş ulaşmıştır. Buna karşın, BGAK yöntemi ile kontrol edilen sıvı seviyesi, referans seviyesine daha hızlı ulaşmıştır, bu da BGAK yönteminin GAK'ye göre daha iyi bir yükselme zamanına sahip olduğunu göstermektedir. Her iki kontrol yöntemi de referans seviyesinde kararlı bir şekilde durmakta, ancak BGAK yöntemi daha az dalgalanma göstermektedir. BGAK, küçük dalgalanmalarla sıvı seviyesini referans değerinde daha istikrarlı tutarken, GAK yöntemi daha belirgin dalgalanmalar göstermektedir. Ayrıca, GAK sisteminin referans seviyesine ulaşma süresi (yerleşme zamanı) daha uzun olup, küçük dalgalanmalar daha belirgindir. BGAK ile kontrol edilen sistem ise daha kısa sürede ve daha az dalgalanma ile referans seviyesine ulaşmıştır.

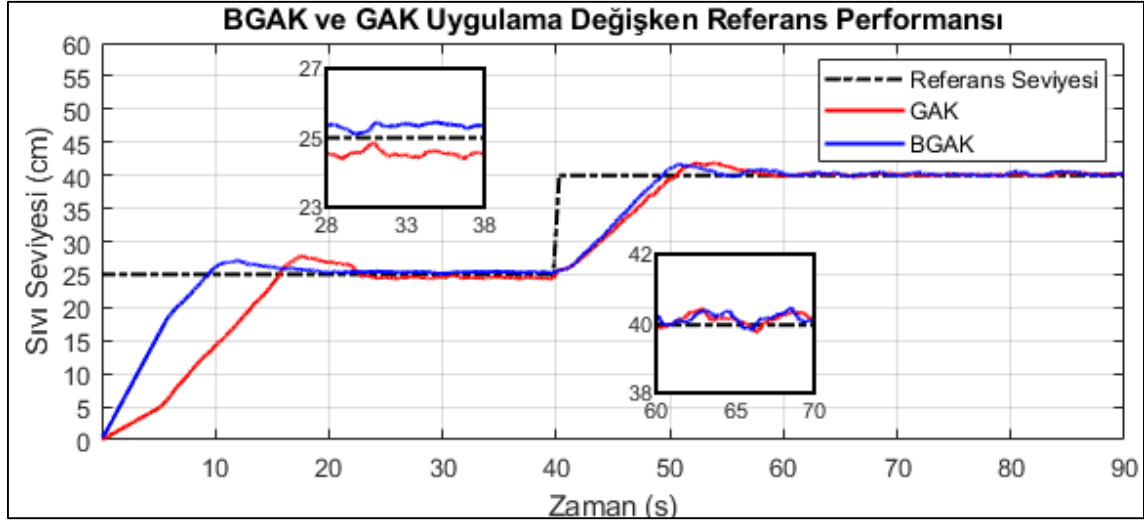
Artan referans seviyeleri için sistem davranışını test etmek amacıyla referans sıvı seviyesi ilk 40 saniye boyunca 25 cm olarak ayarlanmış ve 40. saniyede referans 40 cm olarak değiştirilmiştir. Bu duruma ait GAK Şekil 6.10.'da, BGAK Şekil 6.11.'de gösterilmektedir. Her iki algoritmanın karşılaştırmalı tepkileri ise Şekil 6.12.'de görülmektedir.



Şekil 6.10. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi)



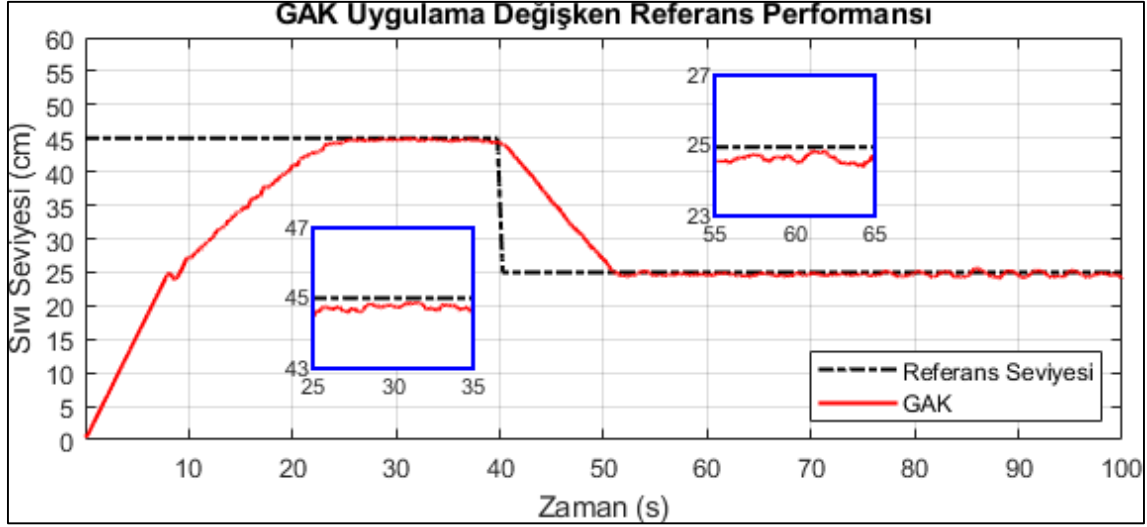
Şekil 6.11. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi)



Şekil 6.12. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları (artan sabit sıvı seviyesi)

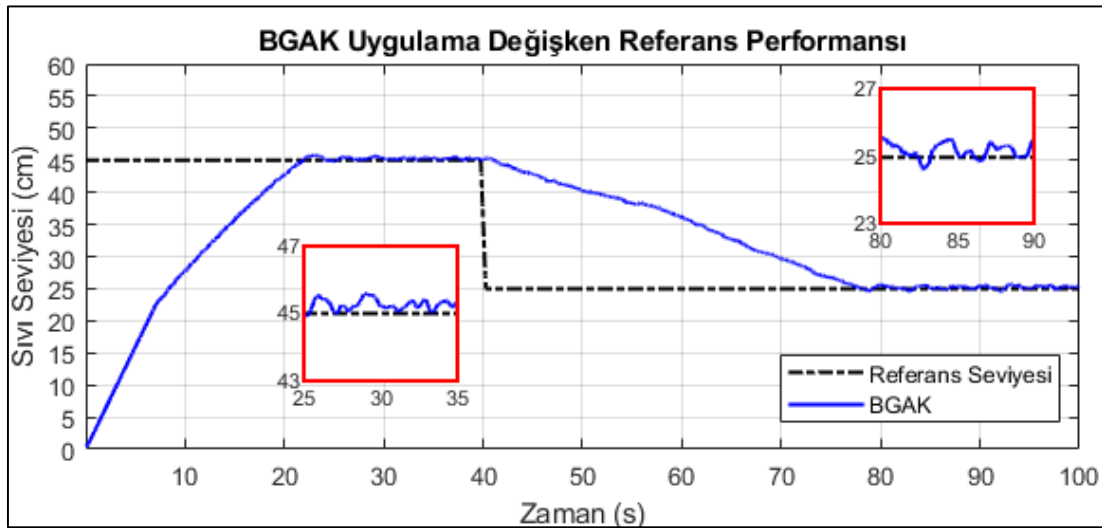
GAK yöntemi, referans seviyesine ulaşmada daha hızlı olsa da dalgalı bir başlangıç performansı sergilemektedir. Buna karşın, BGAK yöntemi referans seviyesine daha kararlı bir şekilde ulaşmaktadır. GAK, dalgalanmalar göstererek referans seviyesini sabitlemekte zorlanırken, BGAK daha az dalgalanma ile daha düşük bir kalıcı hal hatası ile yeni referans seviyelerine ulaşmaktadır.

Azalan referans seviyeleri için sistem davranışını test etmek amacıyla referans sıvı seviyesi ilk 40 saniye boyunca 45 cm olarak ayarlanmış ve 40. saniyede referans 25 cm olarak değiştirilmiştir. Bu duruma ait GAK Şekil 6.13.'de, BGAK Şekil 6.14.'te gösterilmektedir.



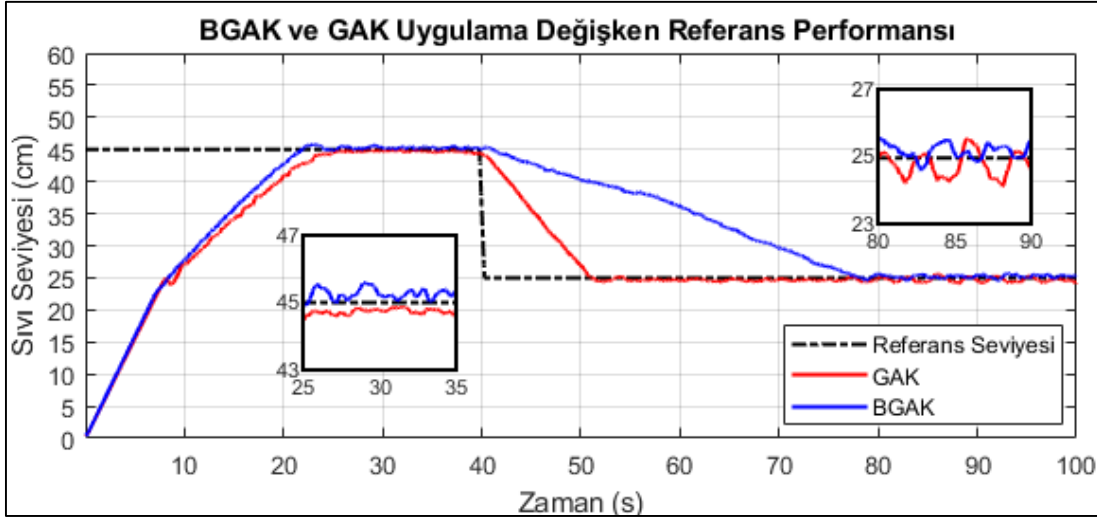
Şekil 6.13. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için geleneksel geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi)

Geleneksel GAK kontrol yöntemi, sıvı seviyesini hızla düşürmüştür. Bu noktada BGAK'ye göre daha üstün bir performans sergilemiştir. Azalan referans değerleri için geleneksel kontrolcü bulanık kontrolcüye göre tepki hızı noktasında daha üstün bir cevaba sahiptir. Bu durum Şekil 5.7.'deki benzetim çalışması ile de tutarlıdır. Ancak kalıcı hal hatası açısından bulanık kontrolcü hala üstündür.



Şekil 6.14. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için bulanık geri adımlamalı denetleyici sistem yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi)

Şekil 6.15.'te özellikle azalan referans değeri için tepkilerde bu durum net olarak görülmektedir.



Şekil 6.15. Aralıklı sabit sıvı seviyesi için iki yöntemin yanıtları (azalan sabit sıvı seviyesi)

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, BGAK yönteminin daha üstün bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Yükselme süresi açısından BGAK, referans seviyesine daha hızlı ulaşarak daha iyi bir kontrol performansı sunmuştur. Yerleşme zamanı bakımından da BGAK, referans seviyesine daha hızlı yerleşmiş, GAK ise daha uzun bir yerleşme zamanı sergilemiştir. Dalgalanma açısından, GAK yöntemi referans seviyesinde daha belirgin dalgalanmalar gösterirken, BGAK daha kararlı bir performans sergilemiştir. Her iki yöntem de aşım göstermemiş, referans seviyesini aşmadan hedef değerde tutmayı başarmıştır. Ancak, kalıcı hal hatası açısından BGAK, daha düşük bir hata ile sıvı seviyesini referans değerde daha doğru bir şekilde tutabilmiştir. Sonuç olarak, BGAK yöntemi, GAK yöntemine kıyasla daha kısa bir yükselme süresi, daha hızlı yerleşme zamanı, daha az dalgalanma ve daha düşük kalıcı hal hatası ile sıvı seviyesini referans değerde tutmada daha etkilidir. Bu durum, BGAK'nin kontrol performansının daha iyi olduğunu ve sistemin referans seviyesini daha doğru bir şekilde takip edebildiğini göstermektedir.

Çizelge 6.1. geleneksel geri adımlamalı denetleyici ve bulanık geri adımlamalı denetleyicinin performansını karşılaştıran önemli verileri içermektedir. Bu veriler, referans değer 25 cm'ye ayarlanmasıyla oluşan dinamik cevap ile MATLAB Workspace'e kaydedilen veri seti kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge, her iki kontrol yönteminin kararlı durum hatası, yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Performans kriterlerinin iyileşme veya kötüleşme yüzdeleri de çizelgede belirtilmiştir.

Çizelge 6.1. Denetleyiciler için performans parametreleri (uygulama sonuçları)

	GAK	BGAK	Gelişme
$e_{ss} (cm)$	0,40	0,07	↑% 82,5
$t_r (s)$	12,16	11,36	↑% 6,57
$t_s (s)$	58,53	11,70	↑% 97
$M_p(\%)$	0,898	1,522	↓% 69,4

Sonuçlar, bulanık geri adımlamalı denetleyicinin, geleneksel geri adımlamalı denetleyiciye kıyasla benzetim ve uygulama çalışmalarında daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler ve grafikler, bulanık geri adımlamalı kontrol yönteminin endüstriyel uygulamalarda potansiyel bir iyileştirme sağlayabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, teorik olarak geliştirilen kontrol algoritmalarının pratikte de başarılı bir şekilde uygulanabileceğini doğrulamaktadır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sıvı seviye sistemi için performansı iyileştirmek amacıyla geliştirilen bir bulanık geri adımlamalı denetleyici (BGAK) sunulmuştur. Sistemin transfer fonksiyonu ve durum-uzay modeli elde edilmiştir. Sistem hem benzetim olarak hem de uygulama olarak geleneksel ve bulanık GAK ile kontrol edilmiştir. Önerilen denetleyici, geleneksel geri adımlamalı denetleyici (GAK) ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın motivasyonu, geleneksel geri adımlamalı denetleyicinin sebep olduğu kararlı durum hatasını aşmaktır. Bu nedenle, geri adımlamalı denetleyicinin kritik kontrol katsayısı, bulanık mantık denetleyici ile düzenlenmiştir.

GAK ve BGAK yöntemlerinin sıvı seviye denetimi üzerindeki performansları karşılaştırılmış ve sonuçlar her iki yöntem arasındaki farkları ortaya koymuştur. BGAK yöntemi, referans seviyesine ulaşmada daha hızlı ve kararlı bir performans sergilemiştir. Geleneksel GAK yöntemi, başlangıçta hızlı bir yanıt vererek sıvı seviyesini artırmaya başlamış, ancak referans değere yaklaşırken bir miktar aşım ve ardından dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin dinamik değişimlere hızlı adaptasyon yeteneğinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Her iki yöntemin de sıvı seviyesini çok aşmadan, referans değerinde tutmayı başardığı görülmüştür. BGAK yöntemi, daha düşük bir kalıcı hal hatasına sahiptir. Bu, BGAK'nin sıvı seviyesini referans değerinde daha doğru ve kararlı bir şekilde tutabildiğini göstermektedir. Sistemdeki değişikliklere ve belirsizliklere adapte olan bulanık geri adımlamalı kontrol, belirsizliklerle başa çıkabilmekte ve model belirsizliklerini tolere edebilmektedir. Sonuçlar, önerilen denetleyicinin kararlı durum hatasını çözdüğünü ve sistem yanıtının optimize edildiğini ortaya koymuştur.

BGAK yönteminin, süreç denetimi dışındaki diğer mühendislik sistemlerine adaptasyonu, geniş bir uygulama yelpazesi için potansiyel faydalar sunabileceği öngörülmektedir. Özellikle, dinamik değişimlerin sık yaşandığı ve model belirsizliklerinin ön planda olduğu sistemlerde BGAK'nin avantajları ortaya konulmuştur. Belirsizliklerin ve değişkenliğin daha etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan bu yöntem, geleneksel kontrol yaklaşımlarından daha üstün performans sergilemektedir. Bu bağlamda, BGAK

yaklaşımının çeşitli mühendislik problemlerine entegre edilmesi, hem teorik hem de pratik açıdan gelecekteki araştırmalara zemin hazırlayabilmektedir.



## KAYNAKLAR

1. 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. *ArXiv*, 3, 67-76.
2. Nail, B., Bekhiti, B., Hafafa, A., Abdellah, K. and Hadroug, N. (2015). Feedback linearization and Backstepping controllers for Coupled Tanks. *The Informatics Engineering, an International Journal (IEIJ)*, 3, 1-17.
3. Meng, X., Yu, H. , Wu, H. and Xu, T. (2020). Disturbance Observer-Based Integral Backstepping Control for a Two-Tank Liquid Level System Subject to External Disturbances. *Mathematical Problems in Engineering*, 3, 1-22.
4. Safa, C., Kermani, M. and Faouzi, M. S. (2020). *Fuzzy T2I Adaptive Backstepping Control for a State-Coupled Two-Tank System*. 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Monastir, 7-12.
5. John, J. A., Jaffar, N. E. and Francis, R. M. (2015). Modelling and Control of Coupled Tank Liquid Level System using Backstepping Method. *International journal of engineering research and technology*, 4, 667-671.
6. Gouta, H., Said, S. and Faouzi, M.S. (2015). Predictive and Backstepping Control of Double Tank Process: A Comparative Study. *IETE Technical Review*, 61, 259-268.
7. Turki, A., Said, S. and Faouzi, M.S. (2015). *Backstepping control for two tanks process based on adaptive high gain observer*. 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Barcelona, 1-6.
8. Gomaa, M.O., Hamouda, A.H. and Badawy, A.A.E. (2019). *Command-Filtered Backstepping Control of Multitank System*. 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), Delft, 73-77.
9. Meng, X., Yu, H. , Zhang, J., Xu, T., Wu, H. and Yan, K. (2022). Disturbance Observer-Based Feedback Linearization Control for a Quadruple-Tank Liquid Level System. *ISA Transactions*, 122, 146-162.
10. Yang, Z.-J. and Sugiura, H. (2019). Robust nonlinear control of a three-tank system using finite-time disturbance observers. *Control Engineering Practice*, 84, 63-71.
11. Özarslan Yatak, M. (2005). *GUNTRT 512 Sıvı Seviye Denetim Cihazının Bulanık Mantık ile Denetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
12. Çelik, B., Birtane, S., Dikbıyık, E. and Erdal, H. (2015). *Liquid level process control with fuzzy logic based embedded system*. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) Bursa, 874-878.

13. Yumurtaci, M., and Verim, Ö. (2020). Liquid level control with different control methods based on Matlab/Simulink and Arduino for the control systems lesson. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 4, 249-254.
14. Xu, Z. and Min, J. (2010). *Fuzzy backstepping control for strict-feedback nonlinear systems with mismatched uncertainties*. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, 5054-5057.
15. Benayache, R., Chrifi-Alaoui, L., Dovifaaz, X. and Bussy, P. (2009). *Real-time nonlinear adaptive backstepping liquid level control for a state coupled three tank system*. European Control Conference (ECC), Budapest, 1011-1016.
16. Alshamali, S. and Zribi, M. (2012). Backstepping control design for a continuous-stirred tank. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8, 7747-7760.
17. Kolankowski, M. and Piotrowski, R. (2022). Design of Three Control Algorithms for an Averaging Tank with Variable Filling. *Acta Mechanica et Automatica*, 16(2), 136-150.
18. Sekban, H. T., Can, K. and Başçi, A. (2016). *The performance analyze and control of a coupled tank liquid-level system via PI & backstepping controllers*. National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), Bursa, 272-277.
19. GmbH (2017). *RT 512 Level control trainer* (1. Edition). Barsbüttel: G.U.N.T Gerätebau, 1-3.
20. Doruk, R. Ö. ve Zuglem, A. (2018). Geri Adımlama Tekniği ile Bir DC Motorun Konum ve Hız Kontrolü, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 65-82.
21. Rudra, S., Barai, R. K. and Maitra, M. (2017). *Block Backstepping Design of Nonlinear State Feedback Control Law for Underactuated Mechanical Systems* (1. Edition). Singapore: Springer, 11-52.
22. Sadek, U., Sarjaš, A., Chowdhury, A. and Svečko, R. (2017). Improved adaptive fuzzy backstepping control of a magnetic levitation system based on Symbiotic Organism Search. *Applied Soft Computing*, 56, 19-33.
23. Zhou, J. and Wen, C. (2008). *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems: Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations* (1. Edition). Berlin: Springer, 83-138.
24. Elmas, Ç. (2018). *Yapay zeka uygulamaları* (5. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 305-366.
25. Nabiyev, V. (2021). *Yapay Zeka: İnsan Bilgisayar Etkileşimi* (6. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 741-781.
26. Nabiyev, V. (2021). *Yapay Zeka (Artificial Intelligence)* (6. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 661-673.

27. Xue, Y., Yu, H. and Liu, X. (2018). *Improved Fuzzy Backstepping Position Tracking Control for Manipulator Driven by PMSM*. Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, 3561-3565.
28. Amer, A. F., Sallam, E. A. and Sultan, I. A. (2013). *Optimized Backstepping Fuzzy Control for Nonholonomic Mobile Robot*. 23rd International Conference on Computer Theory and Applications (ICCTA), Alexandria, 8-14.
29. Yu, J., Chen, B., Ma, Y. and Yu, H. (2011). *Robust speed tracking control for the induction motor via adaptive fuzzy backstepping*. Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Mianyang, 2181-2184.
30. Erguzel, T. (2015). A Hybrid PSO-PID Approach For Trajectory Tracking Application of A Liquid Level Control Process. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 5, 63-73.
31. Şahin, N., Tatbul, F., Kuş, A. ve Özarıslan Yatak, M. (2022). Endüstriyel Sıvı Seviye Denetim Sisteminin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *El-Cezeri*. 9(4), 1228-1239.





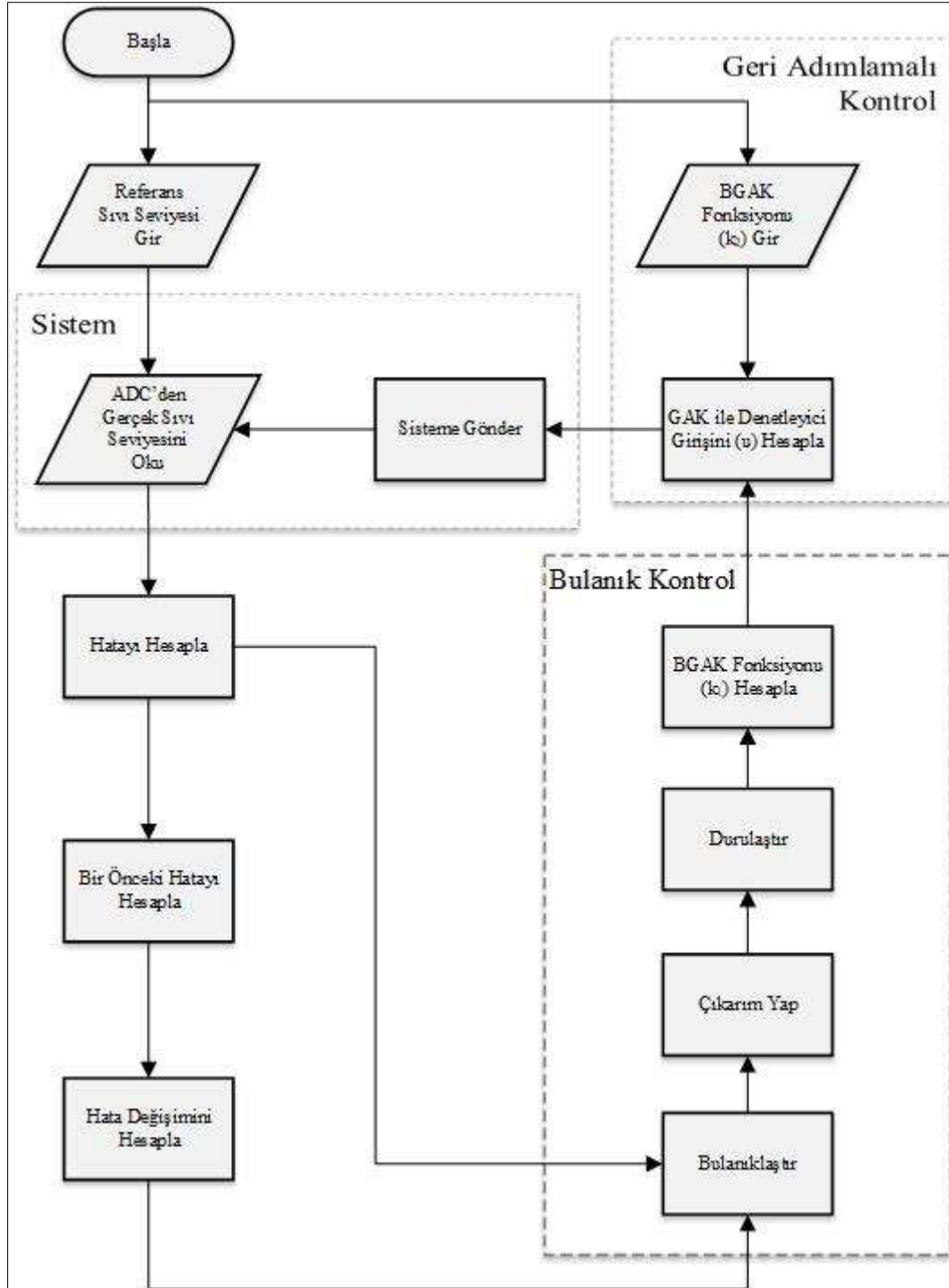
**EKLER**

EK-1. GUNT RT512 sıvı seviye denetim cihazının teknik özellikleri

Çizelge EK.1. GUNT RT512 teknik özellikleri [19]

Fiziksel Özellikler:	
Boyutlar (W*L*H):	1000 x 700 x 1735 mm <sup>3</sup>
Ağırlık:	110 kg
Güç Kaynağı:	
Hava basıncı:	2,5 bar
Elektrik gerilimi:	220 V, 50 Hz
Sıvı Pompası:	
Maksimum Akış Oranı:	110 L/dk
Maksimum Basma Yüksekliği:	6.5 m
Saydam Seviye Tüpü:	
Maksimum Sıvı Kapasitesi:	7 L
Seviye Aralığı:	0 - 62 cm
Sıvı Tankı:	
Kapasite:	28 L
Basınç Dönüştürücü (Seviye İçin):	
En Büyük Ölçüm Aralığı:	0 - 100 mbar
Ayarlanan Ölçüm Aralığı:	0 - 60 mbar
Çıkış Sinyali:	4 - 20 mA
Besleme Gerilimi:	12 - 36 VDC
DN20 Pnömatik Kontrol Vanası:	
Hava Basıncı:	2,5 bar
Denetim Elemanı Ayar Noktası:	4 - 20 mA
Kvs Değeri:	4.0
İki Kanallı Hat Kaydedicisi:	
Girişler:	2 x 4 - 20 mA
Kayıt Hızı:	0 - 3600 mm/s
Elektrik Kaynağı:	220 V, 50 Hz
Denetleyici:	
Giriş:	4 - 20 mA
Akım Çıkışı:	4 - 20 mA
Ön Boyutlar:	100 x 150 mm <sup>2</sup>

EK-2. Bulanık geri adımlama kontrol sisteminin yazılım akış şeması



Şekil EK-2: Bulanık geri adımlama kontrol sisteminin yazılım akış şeması



*Gazili olmak ayrıcalıktır*