

**DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLEME,
SİMÜLASYON VE KABLOSUZ AĞ TABANLI
KONTROLÜ**

AYŞENUR EMRULLAH

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
TEMMUZ - 2015**

**DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLEME,
SİMÜLASYON VE KABLOSUZ AĞ TABANLI
KONTROLÜ**

AYŞENUR EMRULLAH

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE**

**MERSİN
TEMMUZ – 2015**

Ayşenur EMRULLAH tarafından Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE danışmanlığında hazırlanan “ DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLEME, SİMÜLASYON VE KABLOSUZ AĞ TABANLI KONTROLÜ” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Yrd. Doç. Dr. A. Naci METE
Yrd. Doç. Dr. Alkan ALKAYA
Yrd. Doç. Dr. Tolgay KARA



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05./10./2015 tarih ve 2015-25./919..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLEME, SİMÜLASYON VE KABLOSUZ AĞ TABANLI KONTROLÜ

Ayşenur EMRULLAH

ÖZ

Günümüzde kablosuz iletişim birçok alanda hızla yaygınlaşan ve ilerleyen bir teknoloji halini almıştır. Kontrol döngülerinin gerçek zamanlı bir ağ ile kapatıldığı geri beslemeli kontrol sistemleri ağ tabanlı kontrol sistemleri olarak adlandırılır. Ağ bağlantısı daha az kablolu gereksinimi, hızlı müdahale edebilme, sistem yapısını esnek şekilde değiştirebilme, uzaktan müdahale ve kontrol edebilme, bakım ve onarım kolaylığı gibi avantajlar sağlar. Bu avantajları sayesinde kablosuz iletişim kontrol sistemlerinde etkili ve yaygın olarak kullanılan alanlardan birisi haline gelmektedir. Bu çalışmada çok giriş ve çok çıkışlı bir sistem olan dörtlü tank sisteminin algılayıcı verilerinin IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden kablosuz olarak gerçek zamanlı iletimi ve sistem için tasarlanan PID denetleyici ile sıvı seviye kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. PID denetleyici tasarımı, ağdan kaynaklı zaman seğirmeleri gözetilerek yapılmıştır. Önerilen yöntem, mevcut kontrol döngülerindeki PID denetleyicilerin ağ tabanlı kontrol sistemleri için yeniden ayarlanmasında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Ağ tabanlı kontrol sistemleri, PID kontrol, Dörtlü tank sistemi, IEEE 802.15.4

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE, Mersin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

MODELLING, SIMULATION AND WIRELESS NETWORKED CONTROL OF THE QUADRUPLE TANK PROCESS

Ayşenur EMRULLAH

ABSTRACT

Wireless communication has become a wide-spreading and progressive technology nowadays. The feedback control systems whose control loops are closed with a real time communication network are called networked control systems. Network connection provides some advantages like less cabling requirement, quick intervention, flexible system configuration, remote control and operation, easy maintenance and repair. With these added advantages the wireless communication becomes a widely used feature in control systems design. In this study, wireless PID control of a multi-input multi-output quadruple tank process is aimed. Sensor data of the quadruple tank process is transmitted wirelessly over IEEE 802.15.4 protocol and liquid level control is achieved with PID controllers. PID controllers are designed by considering networked induced time delays. Proposed method can be utilized for retuning of PID controllers present in classical control systems for networked control settings.

Key Words: Networked control systems, PID control, The quadruple tank process, IEEE 802.15.4.

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet Naci METE, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Mersin

TEŞEKKÜR

“Dörtlü Tank Sisteminin Modelleme, Simülasyon ve Kablosuz Ağ Tabanlı Kontrolü” konulu tez çalışmamın seçilmesinde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde destek veren değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE’ ye, tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme, sevgili nişanlım H. Rıdvan YILMAZ’ a, çalışmama sunduğu katkılar ve bana verdikleri destek sebebiyle değerli dostum Arş. Gör. Kübra ŞEKER’ e, arkadaşlarım Arş. Gör. Mustafa CÖMERT, Arş. Gör. Volkan YAMAÇLI, Arş. Gör. Hüseyin YANIK, Yusuf MURATOĞLU, İhsan KANBAZ, Eren ÇÜRÜK’ e ve tez çalışma grubumda görev alan tüm öğrencilerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
EKLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	6
3.1. AĞ TABANLI DÖRTLÜ TANK SİSTEMİ BİLEŞENLERİ	6
3.1.1. Ağ Tabanlı Kontrol.	6
3.1.2. PID Denetleyici	9
3.1.3. Dörtlü Tank Sistemi.	10
3.1.4. Ağ Tabanlı İki Kanallı Merkezi Olmayan Çok Giriş Çok Çıkışlı Sistemler için PID Denetleyici Tasarımı.....	12
3.2. AĞ BAĞLANTISI, BİLEŞENLERİ VE SİMÜLASYONU	14
3.2.1. Kablosuz İletişim Protokolleri.	14
3.2.2. Ağ Bağlantısının Gerçeklenmesi.	15
3.2.3. TrueTime Araç Kutusu.	16
3.3. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	17
3.3.1. Dörtlü Tank Sisteminin Fiziksel Denklemler ile Modellenmesi.....	18
3.3.2. Dörtlü Tank Sisteminin Durum-Uzay Modelinin Oluşturulması.....	22
3.3.2.1. Denge durumunda sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri.	22
3.3.2.2. Sistemin Taylor serisi yaklaşımıyla doğrusallaştırılması ile durum uzay modelinin elde edilmesi.	24
3.3.3. Sistemin Doğrusal Transfer Fonksiyonunun Oluşturulması.....	27

3.4. GERÇEK SİSTEMİN MODELİ.....	27
3.4.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistemin Modeli.....	28
3.4.2. Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistemin Modeli.....	29
3.5. GERÇEK SİSTEMİN BASINÇ ALGILAYICISI KALİBRASYONU	30
3.6. GERÇEK SİSTEMİN VALF POZİSYONLARININ AYARLANMASI	30
3.6.1. Minimum Fazlı Durum İçin Valf Pozisyonlarının Ayarlanması.....	30
3.6.2. Minimum Fazlı Olmayan Durum İçin Valf Pozisyonlarının Ayarlanması..	32
3.7. GERÇEK SİSTEMİN ÇALIŞMA NOKTALARININ BELİRLENMESİ.....	33
3.7.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistemin Çalışma Noktalarının Belirlenmesi.	33
3.7.2. Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistemin Çalışma Noktalarının Belirlenmesi.	34
3.8. GERÇEK SİSTEM İÇİN PID DENETLEYİCİ TASARIMI	35
3.8.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistem İçin PID Denetleyici Tasarımı.	36
3.8.2. Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistem İçin PID Denetleyici Tasarımı ...	36
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	38
4.1. GERÇEK SİSTEM İÇİN TASARLANAN PID DENETLEYİCİLERİN TRUETIME ARAÇ KUTUSU İLE SİMULASYONU.....	38
4.2. MİNİMUM FAZLI SİSTEMİN SIVI SEVİYE KONTROLÜ	41
4.3. MİNİMUM FAZLI OLMAYAN SİSTEMİN SIVI SEVİYE KONTROLÜ	45
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	50
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Kablosuz iletişim protokollerinin karşılaştırılması.....	14
Çizelge 3.2. Sistem parametreleri	27
Çizelge 3.3. Minimum fazlı sistem için hesaplanan çalışma noktaları	28
Çizelge 3.4. Minimum fazlı olmayan sistem için hesaplanan çalışma noktaları ...	29
Çizelge 3.5. Minimum fazlı gerçek sistemin çalışma noktaları.	34
Çizelge 3.6. Minimum fazlı olmayan gerçek sistemin çalışma noktaları	35
Çizelge 4.1. Minimum fazlı sistem basamak tepkisi parametreleri	44
Çizelge 4.2. Minimum fazlı olmayan sistem basamak tepkisi parametreleri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Çeşitli ağ tabanlı kontrol sistemleri mimarileri.	6
Şekil 3.2. PID denetleyici blok şeması	10
Şekil 3.3. Dörtlü tank sistemi şeması	11
Şekil 3.4. Ağ tabanlı iki kanallı merkezi olmayan kontrol sistemi	12
Şekil 3.5. Algılayıcı verilerinin kablosuz iletimi için oluşturulan sistem şeması ..	15
Şekil 3.6. Algılayıcı verilerinin kablosuz iletimi için oluşturulan sistem	16
Şekil 3.7. TrueTime SIMULINK kütüphanesi.....	17
Şekil 3.8. Dörtlü tank sistemi.....	18
Şekil 3.9. Tank 1'in sıvı giriş çıkış şeması	19
Şekil 3.10. Tank 2'nin sıvı giriş çıkış şeması	20
Şekil 3.11. Tank 3'ün sıvı giriş çıkış şeması.....	20
Şekil 3.12. Tank 4'ün sıvı giriş çıkış şeması.....	21
Şekil 3.13. Minimum faz sisteme τ_1 değeri ayarlanması	31
Şekil 3.14. Minimum faz sisteme τ_2 değeri ayarlanması	32
Şekil 3.15. Minimum fazlı olmayan sisteme τ_1 ve τ_2 değeri ayarlanması.....	33
Şekil 3.16. Minimum fazlı sistemin çalışma noktası grafiği.....	34
Şekil 3.17. Minimum fazlı olmayan sistemin çalışma noktası grafiği.....	35
Şekil 4.1. Ağ bağlantısız sistemin SIMULINK modeli	38
Şekil 4.2. Ağ bağlantılı sistemin SIMULINK modeli.....	39
Şekil 4.3. Minimum fazlı sistemde paket kaybı %10 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi	39
Şekil 4.4. Minimum fazlı sistemde paket kaybı %30 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi	40
Şekil 4.5. Minimum fazlı olmayan sistemde paket kaybı %10 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi.....	40
Şekil 4.6. Minimum fazlı olmayan sistemde paket kaybı %30 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi.....	41
Şekil 4.7. Minimum fazlı kablolu basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn.....	42
Şekil 4.8. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn	42
Şekil 4.9. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0.5 sn ...	42

Şekil 4.10. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=1 sn	43
Şekil 4.11. Minimum fazlı basamak tepkisi.....	43
Şekil 4.12. Minimum fazlı olmayan kablolu basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn	45
Şekil 4.13. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn.....	45
Şekil 4.14. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0.5 sn.....	46
Şekil 4.15. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=1 sn.....	46
Şekil 4.16. Minimum fazlı olmayan basamak tepkisi	47



EKLER DİZİNİ

Sayfa

Ek-1. Gönderici Xbee takılan Arduino Unoya Gömülen Program Kodu	55
Ek-2. Alıcı Xbee takılan Arduino Megaya Gömülen Program Kodu.....	56
Ek-3. MATLAB Kodu	57



KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
t	Zaman	sn
K_p	Oransal kazanç	
K_i	İntegral kazancı	
K_d	Türev kazancı	
$e(t)$	Hata sinyali	cm
$u(t)$	Giriş sinyali	V
P1	Pompa 1	
P2	Pompa 2	
T1	Tank 1	
T2	Tank 2	
T3	Tank 3	
T4	Tank 4	
n_1	P1 pompasının akış voltaj oranı	cm/Vs
n_2	P2 pompasının akış voltaj oranı	cm/Vs
k_c	Ölçüm sabiti	V/cm
γ_1	Pompa1'den Tank 2'ye sıvı geçişi sağlayan valfin pozisyonu (0-1)	
γ_2	Pompa2'den Tank 4'e sıvı geçişi sağlayan valfin pozisyonu (0-1)	
a_1	T1 tankının çıkış pipetinin taban alanı	cm ²
a_2	T2 tankının çıkış pipetinin taban alanı	cm ²
a_3	T3 tankının çıkış pipetinin taban alanı	cm ²

a_4	T4 tankının çıkış pipetinin taban alanı	cm^2
A_1	T1 tankının taban alanı	cm^2
A_2	T2 tankının taban alanı	cm^2
A_3	T4 tankının taban alanı	cm^2
g	Yer çekimi sabiti	cm/s^2
h_1^0	T1 tankının durağan çalışma noktası	cm
h_2^0	T2 tankının durağan çalışma noktası	cm
h_3^0	T3 tankının durağan çalışma noktası	cm
h_4^0	T4 tankının durağan çalışma noktası	cm
u_1^0	P1 pompasının durağan kontrol sinyali	V
u_2^0	P2 pompasının durağan kontrol sinyali	V
T_1	T1 tankının zaman sabiti	sn
T_2	T2 tankının zaman sabiti	sn
T_3	T3 tankının zaman sabiti	sn
T_4	T4 tankının zaman sabiti	sn
PID	Oransal Toplamsal Türevsel	
MIMO	Çok giriş çok çıkışlı	
NCS	Ağ tabanlı kontrol sistemi	
MADB	Maksimum kabul edilebilir gecikme sınırı	
PSUPA	Güç sağlama ve amplifikatör devresi	
t_r	Yükselme zamanı	sn
t_p	Tepe zamanı	sn
t_s	Oturma zamanı	sn
TCP	İletim Denetim Protokolü	

UDP	Kullanıcı veri bloğu protokolü
TCP/IP	İletim Denetim Protokolü / İnternet Protokolü
CSMA	Taşıyıcı dinlemeli çoklu erişim
CSMA/CD	Çarpışma algılayıcıyla taşıyıcı dinleyen çoklu erişim
CSMA/CA	Çarpışma önleyiciyle taşıyıcı dinleyen çoklu erişim
DoS	Hizmet reddi



1. GİRİŞ

Marconi' nin 1895 yılında ilk kez gerçekleştirmeyi başardığı kablosuz iletişim, o günden bugüne baş döndürücü bir hızla gelişmeye devam ediyor. Günümüzde kablosuz iletişimin kullanılmadığı alan neredeyse bulunmamaktadır. Kontrol sistemleri de kablosuz iletişimin etkili ve yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi haline gelmektedir. Kontrol döngüsünde yer alan denetleyici, sistem, algılayıcı ve eyleyicilerin bir iletişim ağı aracılığıyla bilgi alış-verişinde buldukları sistemlere genel olarak ağ tabanlı kontrol sistemleri denir. Kontrol döngülerinin gerçek zamanlı bir ağ ile kapatılmasıyla kablolu maliyetlerinin azalması, sistem yapısının esnek olarak değiştirilebilmesi, sistem gözetiminin daha kolay olması, bakım ve onarım kolaylığı, ölçüm yapmanın fiziksel olarak kısıtlandığı durumları ortadan kaldırması gibi avantajlar elde edilebilir [1]. Akıllı şebekeler, süreç kontrol, yüksek üretim kapasiteli fabrikaların otomasyonu, büyük ölçekli sulama sistemleri, otomatik robotlar, modern araçlar ağ tabanlı kontrol sistemlerinin uygulamaları arasında sayılabilir [2-4].

Klasik kontrol döngülerinde, ölçüm ve kontrol sinyallerinin bloklar arasında hatasız ve zaman gecikmesiz olarak iletildiği varsayımı, sinyal iletiminin ortak kullanılan ve sınırlı kaynakları olan ağ üzerinden gerçekleştirildiği ağ tabanlı kontrol sistemlerinde geçerli değildir. Bu nedenle ağ tabanlı kontrol sistemlerinin tasarımında ağdan kaynaklanan problemlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ağ tabanlı kontrol sistemlerinde kullanılan iletişim ağının yapısına bağlı olarak kapalı döngü sistemin performansını olumsuz etkileyen başlıca faktörler; zaman seğirmesi (ing. jitter), paket kayıpları ve analog sinyallerin dijital formata dönüştürülmesinde yaşanan niceleme hatalarıdır. Ağ kaynaklı zaman seğirmeleri, ağın iletişim için uygun hale gelmesi (ing. access time), paketin iletimi ve kontrol sinyalinin hesaplanması için gereken sürelerin toplamından kaynaklanmakta olup zamanla değişen özelliktedir. Bu zaman seğirmelerinin telafisi için ağ tabanlı kontrol sistemlerinin tasarımda iki farklı yaklaşım benimsenmiştir. Birinci yaklaşımda zaman seğirmeleri olasılık dağılım modelleriyle modellenir ve kontrol döngüsüne eklenir. Bu yöntem ile sentezlenen denetleyiciler daha karmaşık yapıda olmaktadır. İkinci yaklaşımda ise zaman seğirmeleri ağa eklenen tampon (ing. buffer) yardımıyla sabit

kılınmakta ve klasik kontrol teorisinde zaman gecikmeli sistemlerin tasarımında sıklıkla kullanılan metotların, ağ tabanlı kontrol sistemlerinde de kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle tasarlanan sistemlerde, zaman gecikmesinin tampon nedeniyle olabilecek en yüksek değere artırılmasından dolayı performans kayıplarının olması kaçınılmazdır.

Haberleşme ağlarının yeterince güvenilir olmadığı durumlarda ölçüm/kontrol sinyali bilgilerinin tamamı başarılı bir şekilde iletilemezler. Bu durum paket kaybı olarak adlandırılır. Sistem kontrolünün en etkili şekilde yapılabilmesi için ağdaki paket kaybının en aza indirilmesi gerekmektedir. Örnekleme zamanı seçimi, dolayısıyla ağdaki paket trafiği yoğunluğunun belirlenmesi ve iletişim protokolünün (TCP, UDP gibi) seçimi paket kayıplarının en aza indirilmesi için kullanılabilen tasarım parametreleridir.

PID denetleyiciler yapısal basitlikleri ve etkili sonuç vermeleriyle günümüzde kontrol döngülerinin %97'sinde yer almakta [5] ve endüstri standardı olarak kabul edilmektedirler. PID denetleyicilerin yaygın kullanımının, hızla gelişen ağ tabanlı kontrol sistemlerinde de devam edeceği öngörülmektedir. PID denetleyicilerin popüler olmasının başlıca sebeplerinden bir tanesi, bu denetleyicilerin sistem modeline ihtiyaç duyulmadan kolayca ayarlanabilmesidir. Fakat zaman seğirmelerinin ve paket kayıplarının olduğu ağ tabanlı kontrol sistemlerinde, PID denetleyicilerin analitik yöntemlerle tasarlanması daha güvenli ve gürbüz kontrol için gerekmektedir.

Dörtlü tank sistemi [6], kontrol alanında çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemlerin kanallar arası etkileşimi, minimum fazlı olmayan sıfırlar ve benzeri birçok problemin incelenmesinde kullanılmaktadır. Bu sistemle, proses kontrol endüstrisinde karşılaşılan problemler laboratuvar ölçeğinde temsil edilebilmekte ve geliştirilen kontrol algoritmaları test edilebilmektedir. Bu çalışmada dörtlü tank sistemin merkezi olmayan PID denetleyici ile IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden kablosuz ağ tabanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan düzenekte ağ bağlantısı sadece algılayıcılardan alınan seviye bilgilerinin PID denetleyiciye iletimi için oluşturulmuştur. Sistemin basınç algılayıcılarının gerilim verilerinin Xbee modülü ile IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden kablosuz olarak gerçek zamanlı gönderilmesi

için bir Arduino Uno modülü programlanmıştır. İletilen algılayıcı gerilimi verileri alıcı Xbee modülü ile bir Arduino Mega modülünün seri portuna alınmıştır. Arduino Mega Modülü algılayıcı verilerini okuyup ayrı ayrı iki PWM çıkışına yazması için programlanmıştır. Arduino Meganın iki ayrı PWM çıkışına iki ayrı algılayıcı verisi yazılmıştır. PWM algılayıcı gerilimlerini analoga çevirmek için alçak geçiren filtre tasarlanmıştır. Tasarlanan alçak geçiren filtrenin çıkışından analog algılayıcı verileri alınmıştır. Denetleyici ile eyleyiciler birbirlerine fiziksel olarak bağlıdır. Bu düzenek endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan algılayıcı ölçümlerinin uzak mesafelerden alındığı, sistem ve denetleyicinin aynı yerde oldukları sistemlerin bir örneğini temsil etmektedir. PID denetleyici tasarımı [7]'te giriş/çıkış gecikmesine sahip MIMO sistemler için önerilen merkezi olmayan PID denetleyici tasarım yönteminin ağ tabanlı kontrol için uyarlanmasıyla yapılmıştır. Buna göre ağdan kaynaklı zaman seğirmeleri ağa eklenen tamponlar nedeniyle sabit kabul edilip, çıkış gecikmesi olarak kabul edilmiştir. Ayrıca ağdan kaynaklı seğirmelerin örnekleme periyodundan küçük oldukları kabul edilmiştir.

Bu tez çalışmasının katkısı, basit yapılarına rağmen etkili olmaları nedeniyle günümüz kontrol döngülerinde endüstri standardı kabul edilen PID denetleyicilerin, yaygın olarak kullanılmaya başlanan ağ tabanlı kontrol sistemlerindeki performansını deneysel olarak göstermektir. Önerilen tasarım metodu, mevcut kontrol döngülerindeki PID denetleyicilerin, ağ tabanlı sistemlerde zaman seğirmeleri ve paket kayıpları karşısında daha güvenli ve gürbüz bir kontrol elde etmek için yeniden ayarlanmalarında kullanılabilir.

Bu çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: 2. Bölümde ağ tabanlı kontrol sistemleri ve PID denetleyicilere dair daha önce yapılmış olan bazı çalışmalarla ilgili kaynak taraması verilmiştir, 3. Bölümde oluşturulan ağ tabanlı deney sisteminin bileşenleri, simülasyon için kullanılan yazılımlar ve denetleyici tasarımının ayrıntıları verilmiştir. 4. Bölümde tasarlanan denetleyicinin performans değerlendirilmesi yapılmış ve son olarak 5. Bölümde sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalara dair öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Dörtlü tank sistemi 2000 yılında K. H. Johansson tarafından önerilmiş [6] ve o zamandan bu yana birçok çalışmada önerilen kontrol algoritmalarının test edilmesi için kullanılmıştır. Bu sistem, transfer fonksiyonunun valfler aracılığı ile değiştirilebilmesi nedeniyle, lisans düzeyindeki temel kontrol problemlerinin eğitim amaçlı gösteriminden MIMO sistemler, minimum fazlı olmayan sistemler gibi alanlarda araştırma yapımına kadar birçok farklı amaç için kullanılabilir. Dörtlü tank sisteminin kısmen ayrıştırılmış kontrolü [8]' de, tahmin tabanlı optimal kontrolü [9]' da, kestirimci PID kontrolü [10]' da verilmiştir. Grebeck dörtlü tank sistemini doğrusal karesel Gaussian, H_∞ , çevrim şekillendirme, geri besleme doğrusallaştırma ve model öngörülü kontrol yöntemleriyle kontrol etmiş ve bu beş kontrolörü kıyaslamıştır [11].

Ağ tabanlı kontrol sistemleri ile ilgili çalışmalar 1970'li yıllarda başlamış [12] ve bu çalışmalar bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızlı gelişimine paralel olarak artarak devam etmiştir. Ağ tabanlı kontrol sistemlerine genel bir bakış ve araştırma eğilimleri [13]' te, ağ tabanlı kontrol sistemlerinde kontrol yöntemleri [14]' te, ağ tabanlı kontrol sistemleri hakkında öz bir araştırma [15]' te, ağ tabanlı kontrol sistemlerinde kararlılık incelemesi [1]' de, ağ tabanlı kontrol sistemlerindeki son sonuçların araştırması [16]' da verilmiştir.

Ağ tabanlı kontrol sistemleri doğal olarak kontrol ve iletişim teorilerinin kesiştiği bir alandır. Bu konuda yapılan araştırmalar iki ana kategoride değerlendirilebilir: *ağın kontrolü* ve *kontrolün ağ üzerinden gerçekleşmesi* [13]. Birinci kategoride iletişim ağının gerçek zamanlı kontrol için gereken şartları sağlamasına yönelik iyileştirme yöntemleri, etkili veri iletimi, ağ tıkanıklıklarının önlenmesi gibi konular araştırılırken, ikinci kategoride ağdan kaynaklı zaman seğirmeleri, paket kayıpları gibi problemler karşısında etkili kontrol algoritmalarının geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır [17-18]. Son yıllarda ise ağ ve kontrol tasarımlarının beraber yapıldığı ortak-tasarım (ing. co design) yaklaşımı uygulanmaya başlanmıştır [19-20].

Ağ tabanlı kontrol sistemlerinde ağ güvenliği oldukça önemli bir konudur. Dörtlü tank sisteminin ağ bağlantılı güvenlik analizleri [21]' de verilmiştir.

PID denetleyici tasarımında deneysel ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Deneysel yöntemlerden bazıları Ziegler-Nichols, Cohen- Coon, MIGO ve AMIGO [22-23] yöntemleridir. Analitik olarak ise kök yerleştirme, kazanç ve faz marjları yöntemleri, iç model kontrolü gibi metotlar kullanılmaktadır [24-25].

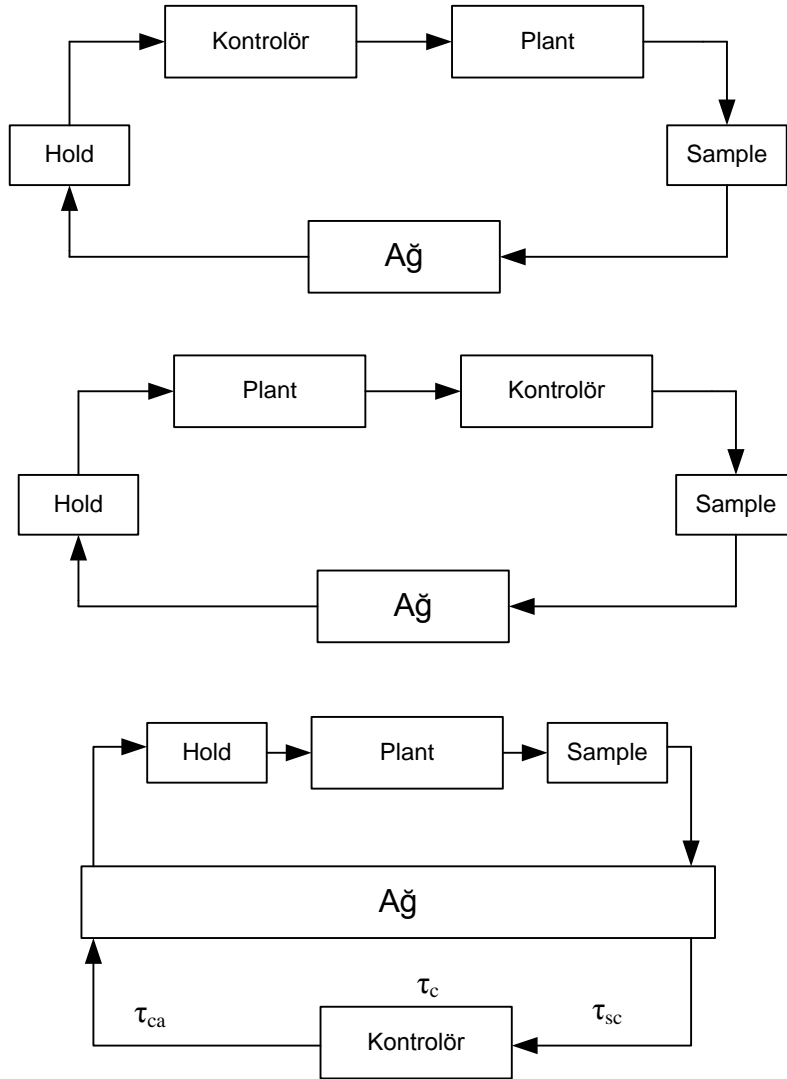
Ağ tabanlı sistemlerde PID denetleyicilerin kullanımı ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [26-33]. [26]' da NCS için çıkış geri beslemeli PID kontrol, dinamik çıkış geri beslemeli PID kontrol, durum geri beslemeli PID kontrol ve dinamik durum geri beslemeli PID kontrol yöntemleri verilmiştir.[27]' de rastgele dereceli zaman gecikmeli MIMO sistemler için NCS için ayrıştırılmış PID kontrolörün parametrik H_{∞} tasarım yöntemi verilmiştir. [28]' de NCS için ağ etkisi Markov zinciriyle temsil edilerek yeni bir PID kontrolör modeli simüle edilmiştir. [29]' da NCS için ayrık zamanlı bir PID kontrolör bir optimizasyon tekniği kullanılarak ayarlanmıştır. [30]'da algılayıcı ağları içeren sistemler için kesin maliyet fonksiyonuna göre kapalı çevrim sistem performansı optimize edilerek ayrık zamanlı PID kontrolör tasarlanmıştır. [31]' de NCS için hem hata takibinde bilgi potansiyelini maksimize eden hem de artan kontrol girişinin karesini minimize eden bir performans içeriğiyle bir PID geri beslemeli kontrol algoritması ve bu algoritmanın simülasyon sonuçları sunulmuştur. [32]' de NCS için gürbüz statik çıkış geri besleme kontrolü için PID kontrolör tasarlanmıştır. [33]' te NCS için yük ve referans bozucuları belirlen seviyeye azaltan gürbüz bir H_{∞} PID kontrolör tasarlanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. AĞ TABANLI DÖRTLÜ TANK SİSTEMİ BİLEŞENLERİ

3.1.1. Ağ Tabanlı Kontrol

Kontrol döngüsünde yer alan denetleyici, sistem, algılayıcı ve eyleyicilerin bilgi alış-verişlerinin, bir iletişim ağı aracılığıyla sağlandığı sistemler ağ tabanlı kontrol sistemleri olarak adlandırılırlar. Bu sistemlerde, bileşenler arasındaki ağ bağlantıları kontrol edilmek istenen sisteme ait fiziksel özellikler ya da daha esnek bir kontrol sistemi elde edebilmek gibi sebepler nedeniyle farklı şekillerde kurgulanabilirler. Bu duruma ait bazı örnekler Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Ağ tabanlı kontrol sistemlerini klasik kontrol sistemlerinden ayıran temel fark klasik kontrol döngülerinde ideal ve kayıpsız olduğu varsayılan bloklar arası bağlantının yerini sınırlı kapasiteli ve kayıpların yaşandığı ağ bağlantısının almasıdır. Bu nedenle ağ tabanlı kontrol sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ağ kaynaklı bazı faktörler bulunmaktadır. Bunları kısaca irdelersek;

Sınırlı bant kapasitesi: İletişim ağlarında bilgi *paket* adı verilen temel üniteler aracılığıyla iletilmektedir. İletilen bilginin büyüklüğünden bağımsız olarak bütün paketler ağ kaynaklarını eşit olarak kullanmaktadırlar. Bu sebeple bir iletişim kanalının birim zamanda iletebileceği paket sayısı sınırlıdır. Bu durum, kapalı döngü sistemin kararlılığını ve performansını ağ kapasitesi ile sınırlamaktadır [16].

Örnekleme periyodu ve zaman gecikmeleri: Ağ tabanlı kontrol sistemleri tasarımında örnekleme periyodunun seçimi önemli bir parametredir. Örnekleme periyodunun küçülmesiyle kontrol performansı artar ama bu aynı zamanda ağ trafiğinin yoğunlaşmasına neden olur. Yoğun ağ trafiği, ağ kaynaklı seğirmelerin artmasına ve bazen de paket kayıplarının yaşanmasına sebep olur. Bu nedenle örnekleme periyodu seçiminde performans ile ağ yoğunluğu arasındaki denge gözetilmektedir. Ağ tabanlı kontrol sistemlerinde ağ trafiğini mümkün olduğu kadar azaltmak için değişken periyotlu örnekleme algoritmalarının kullanımı aktif olan araştırma konularındandır. Örnekleme periyot seçiminde kullanılabilecek bir ölçüt kapalı döngü doğal frekansı ω ve örnekleme periyodu T cinsinden (3.1)' de verilmiştir [34]:

$$0.2 \leq \omega T \leq 0.6 \quad (3.1)$$

Zaman gecikmelerinin kontrol sistemlerinin performansları üzerindeki azaltıcı etkisi iyi bilinen bir gerçektir. Ağ tabanlı kontrol sistemlerinde de kaçınılmaz olarak ağ kaynaklı zaman seğirmeleri meydana gelmektedir. Bu seğirmeler en genel olarak (3.2)'deki şekilde ifade edilirler:

$$\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} \quad (3.2)$$

Burada τ_{sc} algılayıcı ile denetleyici arasındaki zaman seğirmesini, τ_{ca} denetleyici ile eyleyici arasındaki zaman gecikmesini ve τ_c ise denetleyicide kontrol

sinyalinin hesaplanması için gereken süre ve τ ise ağdan kaynaklı toplam zaman gecikmesini temsil etmektedir. Bu gecikmeler aynı zamanda Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Denetleyici yapılarının PID denetleyiciler gibi basit olduğu durumlarda τ_c ihmal edilebilmektedir. Yine Şekil 3.1' de verilen ilk iki kontrol mimarisine göre τ_{ca} veya τ_{sc} de ihmal edilmektedir.

Ağ kaynaklı seğirmeler kullanılan ağ protokolü, ağ trafik yoğunluğu ve paket büyüklüğü gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlikler göstermektedir. Bu ağ seğirmeleri sabit, bağımsız rastgele (ing. stochastic) ve bağımlı rastgele gibi çeşitli formlarda modellenebilir. Ağ seğirmeleri [35]' te önerildiği gibi ağa eklenecek bir tampon yardımıyla sabit hale getirilip daha sonrasında Pade yaklaşımı ya da Smith tahmin edicisi gibi klasik yöntemlerle denetleyici tasarlanabilir. Denetleyici alan ağları (ing. controller area network (CAN)) gibi rastgele olmayan (ing. deterministic) ortam erişim protokollerinin kullanıldığı sistemlerde de bu seğirmeler sabit kabul edilebilmektedir. Bu yöntem ağdaki gecikmeleri olabilecek en büyük değere taşınmasına rağmen denetleyici tasarımdaki kolaylık ve daha basit yapıları denetleyiciler sentezlenebilmesi gibi avantajlar nedeniyle tercih edilebilmektedir. Zaman seğirmesinin rastgele olarak modellendiği durumlarda kontrol tasarımı optimal rastgele kontrol metotlarıyla yapılmaktadır. Denetleyici tasarımının gürbüz (ing. robust) kontrol yöntemleri ile yapıldığı durumlarda ise zaman seğirmeleri sisteme ait belirsizlik gibi modellenir.

Zaman gecikmelerinin kontrol sistemi kararlılığa etkisi zaman gecikmelerinin örnekleme periyodundan küçük ve büyük olduğu durumlar için ayrı ayrı ele alınmaktadır. Zaman gecikmesinin örnekleme periyodundan büyük olduğu durumlarda bir periyotta birden fazla paketin bir düğüme gelme ihtimali bu durum için kararlılık analizini güçleştirmektedir. Zaman gecikmesinin örnekleme periyodundan küçük olduğu durumlarda ise sistem kararlılığı maksimum kabul edilebilir gecikme sınırı (ing. maximum allowable delay bound (MADB)) adı verilen bir parametre üzerinden tanımlanır. Bu yöntemle ağ tabanlı kontrol sistem tasarımı şu şekilde gerçekleştirilir: Sistem için öncelikle bir denetleyici tasarlanır ve denetleyici tasarlanan sistem için MADB hesaplanır, MADB bu durumda seçilebilecek maksimum örnekleme periyodunu belirlemektedir. Son olarak ise

belirlenen periyottan yola çıkarak bir ağ zamanlama (ing. network scheduling) algoritması geliştirilir. MADB hesaplaması için kullanılan yöntemler oldukça tutucu (ing. conservative) bir başka ifade ile gerçek değerinden oldukça küçük sonuçlar vermektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar kararlılığı garanti eden en büyük MADB değerini sağlayan yöntemler geliştirme üzerinde yoğunlaşmıştır [36].

Paket kayıpları: Paket kayıpları çoğunlukla ağdaki yoğun trafik sonucu oluşan tıkanıklıklar ya da ağ bağlantılarında meydana gelen iletişim hatalarından kaynaklanmaktadır. Örnekleme periyodunun artırılmasıyla ağ trafiği azaltılabilir ve dolayısıyla paket kayıplarına sebep olan ağdaki tampon taşmaları engellenmiş olur. Örnekleme periyodunun ağ trafiğini önemli derecede artıracak kadar düşük olmaması ve sistem kararlılığını tehlikeye atacak kadar da yüksek olmaması gerekir. TCP/IP, CSMA/CD gibi iletişim protokolleri paket kayıplarını fark edip kaybolan paketin yeniden gönderilmesini sağlayacak mekanizmalara sahiptirler [37]. Gerçek zamanlı kontrolün gerçekleştirildiği ağ tabanlı kontrol sistemlerinde eski kayıp paketlerin yeniden gönderilmesinin kontrol açısından herhangi bir yararı bulunmamaktadır. Bu yüzden ağ tabanlı kontrol sistemi tasarımında bahsi geçen protokollerin yerine UDP, CSMA/CA gibi protokollerin kullanımı daha uygundur. Yine bu sistemlerin belli oranlarda yaşanabilecek paket kayıpları karşısında sistem kararlılığını koruyabilecek gürbüzlükte tasarlanması gerekir.

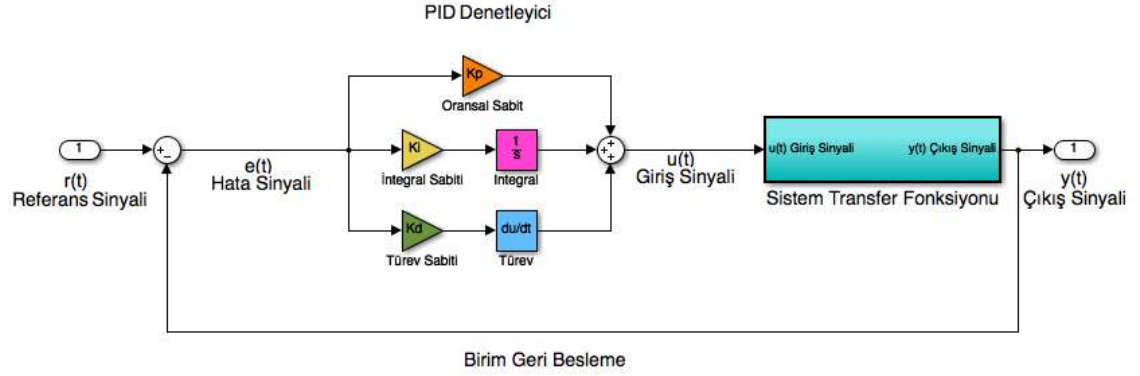
Ağ güvenliği: Ağ döngülerinin kablosuz ağ ile kapatıldığı sistemler hizmet reddi (ing. denial of service (DoS)) gibi ciddi tehlikelere maruz kalabilmektedirler. Bu yüzden ağ tabanlı kontrol sistemleri tasarımının güvenlik boyutu da ciddi bir şekilde ele alınmalıdır. Son yıllarda ağ tabanlı kontrol sistemleri alanında siber güvenlik ve gizlilik (ing. privacy) konuları aktif olarak araştırılmaktadır [38].

3.1.2. PID Denetleyici

Bir PID denetleyicinin $e(t)$ hata sinyaline karşılık verdiği giriş sinyali $u(t)$ ' nin denklemi (3.3)' te verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3)$$

Bu denklemden yola çıkılarak oluşturulmuş paralel PID denetleyici blok şeması Şekil 3.2' de verilmiştir.



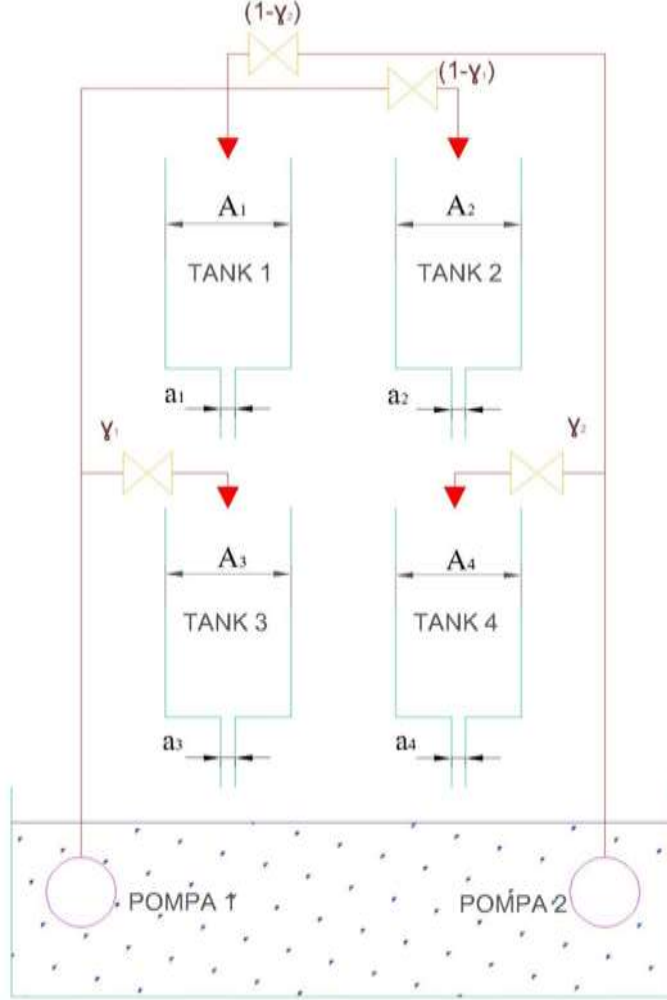
Şekil 3.2. PID denetleyici blok şeması

PID denetleyicilerin popüler olmasının başlıca sebeplerinden bir tanesi bu denetleyicilerin sistem modeline ihtiyaç duyulmadan kolayca ayarlanabilmesidir. Fakat ağ tabanlı kontrol gibi zaman gecikmelerinin ve paket kayıplarının olduğu sistemlerde, PID denetleyicilerin analitik yöntemlerle tasarlanması daha güvenli ve gürbüz kontrol için gerekmektedir.

3.1.3. Dörtlü Tank Sistemi

Dörtlü tank sistemi ilk olarak 2000 yılında Johansson [6] tarafından çoklu girişli – çoklu çıkışlı (MIMO) sistemlerin kontrolünde karşılaşılan kanallar arası etkileşim, minimum fazlı olmayan sıfırlar gibi birçok problemin incelenmesi için geliştirilmiş ve büyük ilgi görmüştür. Bu sistemle süreç (ing. process) kontrol uygulamalarında karşılaşılan problemler temsil edilebilmekte ve geliştirilen kontrol algoritmaları gerçek zamanlı olarak test edilebilmektedir. Şekil 3.3' te gösterilen sistem iki motor ve dört tanktan oluşmaktadır. Bir numaralı motor iki ve üç numaralı tanklara, iki numaralı motorda bir ve dört numaralı tanklara su pompalamaktadır. Altta bulunan iki ve dört numaralı tanklardaki sıvı seviyeleri sistemin çıkış değerleri, pompalara uygulanan voltaj değerleri de giriş değerleridir. Valflerin açıklık durumlarına göre sistemin sıfırlarının yerleri sağ ve sol yarı düzlem üzerinde değiştirilebilmektedir. Bu sistemin minimum fazlı olmama durumu, fiziksel olarak

motorların pompaladığı suyun büyük bir kısmının üst taraftaki tanklara gitmesi olarak açıklanabilir. Sistemin alt iki tankının valf sabiti toplamı minimum fazlı olmayan sistem için $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ eşitsizliğini, minimum fazlı sistem için $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ eşitsizliğini sağlar.

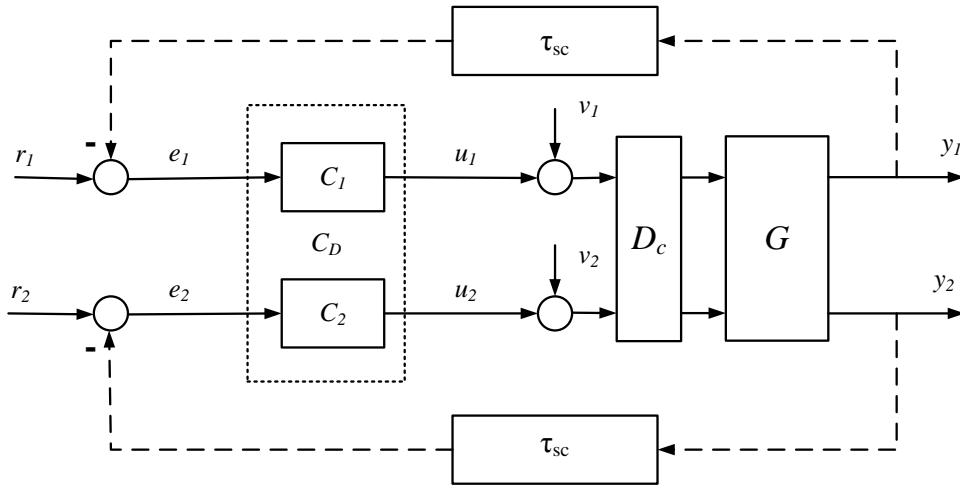


Şekil 3.3. Dörtlü tank sistemi şeması

Sağ yarı düzlemde sıfırı bulunan sistemlerin kontrolü daha zordur. Bu zorluk dörtlü tank sisteminde açıkça görülebilmektedir. Bu sistemin kontrolünde karşılaşılan bir başka problem de kontrol kanalları arasındaki güçlü etkileşimdir. İkinci tankın seviye kontrolü için kullanılan bir numaralı motor aynı zamanda üç numaralı tankta da su pompalayarak dört numaralı tanktaki sıvı seviyesini etkilemektedir. Bu problem genellikle tasarlanan bir ayrıştırıcı ve merkezi olmayan denetleyiciler ile çözülmeye çalışılır.

3.1.4. Ağ Tabanlı İki Kanallı Merkezi Olmayan Çok Giriş Çok Çıkışlı Sistemler için PID Denetleyici Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan ağ tabanlı iki kanallı merkezi olmayan çok giriş çok çıkışlı (MIMO) kontrol sistemi Şekil 3.4' te verilmiştir. Bu modelde sistem ile denetleyici arasındaki geri besleme döngüsü ağ bağlantısı ile kapatılmıştır. Ağdan kaynaklı toplam zaman seğirmesi (3.2)' de verilen τ_{ca} ve τ_c gecikmelerinin ihmal edilmesiyle $\tau = \tau_{sc}$ olarak elde edilir. τ_c zaman gecikmesi PID denetleyicinin basit yapısı nedeniyle ihmal edilmiştir. Ağdan kaynaklı zaman seğirmesi τ_{sc} ağa eklenen tamponlar ile sabit hale getirilmiş ve çıkış gecikmesi olarak sistem transfer fonksiyonuna eklenmiştir. Zaman gecikmesinin ağın örnekleme periyodundan daha küçük olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.4. Ağ tabanlı iki kanallı merkezi olmayan kontrol sistemi

Merkezi olmayan denetleyici $C_D = \text{diag}(C_1, C_2)$ şeklinde tanımlanmış olup her bir kanaldaki PID denetleyici (3.4)' te verilen formattadır.

$$C_j = K_{Pj} + \frac{K_{Ij}}{s} + \frac{K_{Dj}s}{\tau_{j}s+1} \quad j=1,2 \quad (3.4)$$

Burada K_P , K_I ve K_D sırasıyla orantısal, integral ve türev kazançlarıdır. Giriş/Çıkış (I/O) zaman gecikmesi içeren MIMO sistem transfer fonksiyonu G 'nin ise (3.5)' teki şekilde ayrıştırılabilir olduğu varsayılmıştır.

$$G = \begin{bmatrix} \hat{G}_{11} & \hat{G}_{12} \\ \hat{G}_{21} & \hat{G}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{11}G_{11}\tilde{\Lambda}_{11} & \Lambda_{12}G_{22}\tilde{\Lambda}_{12} \\ \Lambda_{21}G_{21}\tilde{\Lambda}_{21} & \Lambda_{22}G_{22}\tilde{\Lambda}_{22} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Her bir kanaldaki giriş ve çıkış zaman gecikmeleri sırasıyla Λ_{ij} ve $\tilde{\Lambda}_{ij}$ $i, j \in \{1,2\}$ ile gösterilmiştir. Kanallar arası etkileşimin azaltılması için kontrol döngüsüne $D_c = G(0)^{-1}$ statik ayrıştırıcısı eklenmiştir. Merkezi olmayan PID denetleyici C_D tasarımında Öneri 3.1’de verilen yöntem kullanılmıştır [7].

Öneri 3.1 [7].: $G \in S^{r \times r}$ ve $rankG(s) = r$ olsun. C_j denetleyicisinin PD denetleyici olması için $M_j = 0$, PID denetleyici olması için ise $M_j = I$, $rankG(0) = r$ ve $rankG_{22}(0) = r_2$ olsun. Bu durumda:

- a) Seçilen herhangi $\hat{K}_{P_2}, \hat{K}_{D_2} \in \mathbb{R}^{r_2 \times r_2}$, $\tau_2 > 0$ değerleri için (3.6)’ da verilen C_2 PID denetleyicisi (3.7)’ de verilen şartı sağlayan herhangi bir β_2 değeri için \hat{G}_{22} transfer fonksiyonunun kapalı döngü sistem kararlılığını sağlar.

$$C_2 =: \beta_2 \hat{C}_2 = \beta_2 \hat{K}_{P_2} + \frac{\beta_2 \hat{K}_{D_2} s}{\tau_2 s + 1} + \frac{\beta_2 G_{22}(0)^{-1}}{s} M_2 \quad (3.6)$$

$$0 < \beta_2 < \|s^{-1}[s\hat{G}_{22}(s)\hat{C}_2 - M_2]\|_{\infty}^{-1} \quad (3.7)$$

- b) (3.6)’da verilen C_2 denetleyicisi için \hat{W} transfer fonksiyonu $\hat{W} := \hat{G}_{11} - \hat{G}_{12}C_2(I + \hat{G}_{22}C_2)^{-1}\hat{G}_{21}$ şeklinde tanımlanmış olsun. Bu durumda, seçilen herhangi $\hat{K}_{P_1}, \hat{K}_{D_1} \in \mathbb{R}^{r_1 \times r_1}$, $\tau_1 > 0$ değerleri için (3.8)’ de verilen C_1 PID denetleyiciyi (3.9)’ da verilen şartı sağlayan herhangi bir β_1 değeri için \hat{W} transfer fonksiyonunun kapalı döngü sistem kararlılığını sağlar.

$$C_1 =: \beta_1 \hat{C}_1 = \beta_1 \hat{K}_{P_1} + \frac{\beta_1 \hat{K}_{D_1} s}{\tau_1 s + 1} + \frac{\beta_1 \hat{W}(0)^{-1}}{s} M_1 \quad (3.8)$$

$$0 < \beta_1 < \|s^{-1}[s\hat{W}(s)\hat{C}_1 - M_1]\|_{\infty}^{-1} \quad (3.9)$$

- c) (3.10)’ da verilen merkezi olmayan C_D PID denetleyicisi (3.5)’de verilen G zaman gecikmeli transfer fonksiyonunun kapalı döngü sistem kararlılığını sağlar.

$$C_D = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu yöntemle tasarlanan merkezi olmayan PID denetleyici, birinci kanaldaki denetleyicinin arızalanıp devreden çıkarıldığı durumlarda da her iki kanal için kararlılığı koruyabilmektedir. Bu özellik bu denetleyicinin kullanılacağı ağ tabanlı kontrol sistemlerinde birinci kanalda meydana gelebilecek muhtemel iletişim hatalarına karşı bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

3.2. AĞ BAĞLANTISI, BİLEŞENLERİ VE SİMÜLASYONU

3.2.1. Kablosuz İletişim Protokolleri

Kablosuz ağ tabanlı kontrol sistemlerinin endüstriyel kullanımı, bu sistemlerin maliyet düşürme ve otomasyon sistemlerinin kurulumunda sağladıkları esneklik gibi avantajlardan dolayı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tür sistemlerde en çok kullanılan üç iletişim protokolü IEEE 802.15.4/Zigbee, IEEE 802.15.1 (Bluetooth) ve IEEE 802.11 (a/b/g) Wi-Fi' dir. Kablosuz iletişim protokolünün seçimi tasarlanan sistemdeki iletişim gereksinimlerine göre yapılır. Örneğin, dörtlü tank sistemi gibi yavaş dinamiklere sahip dolayısıyla uzun örnekleme periyotlarının kullanılabilmesi ve iletilmesi gereken algılayıcı verilerinin çok küçük boyutlu olduğu sistemlerin ağ tabanlı kontrolü için Zigbee en ideal olan protokol seçimidir. Yüksek bant genişliği gerektiren ve hızlı dinamiklere sahip sistemler için ise IEEE 802.11 protokolünün kullanımı daha uygun olacaktır. Bu üç protokole ait temel özellikler Çizelge 3.1' de verilmiştir [39].

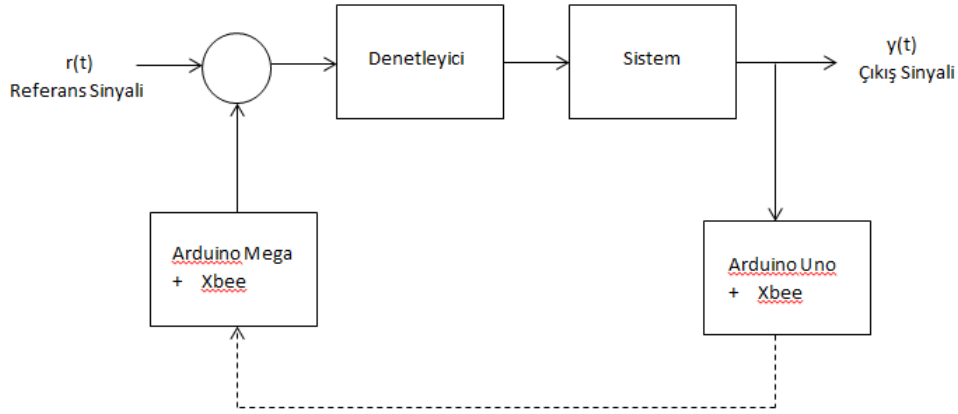
Çizelge 3.1. Kablosuz iletişim protokollerinin karşılaştırılması

	IEEE 802.15.1 Bluetooth	IEEE 802.15.4 Zigbee	IEEE 802.11 (a/b/g) Wi-Fi
Menzil	10 m	10 m	30-100 m
Veri aktarım hızı	1 Mb/s	20, 40, 250 kb/s	11, 54 Mb/s
Güç tüketimi	Düşük	Çok düşük	Orta

3.2.2. Ağ Bağlantısının Gerçeklenmesi

Sistemde algılayıcıdan alınan verileri kablosuz olarak iletmek için kullanılan cihaz Digi International firması tarafından üretilen fiziksel radyo frekansı (RF) alıcı verici haberleşme cihazıdır. Xbee modülü Zigbee topluluğuna ait IEEE 802.15.4 standardı üzerine inşa edilmiş Zigbee açık küresel protokolü üzerinden haberleşir. Xbee Pro kapalı alanda 90 m'ye kadar, açık alanda 3.2 km'ye kadar mesafede veri iletimi sağlar. RF veri hızı 250000 b/s'dir. Çalışma frekans bandı ISM 2.4 GHz' dir. Desteklenen ağ topolojileri nokta-nokta, nokta-çoklu nokta, kısım-kısım ve örgüdür [40].

Bu çalışmada biri verici diğeri alıcı olmak üzere iki adet Xbee modülü, algılayıcı verilerini dijitale çevirip Xbee ile göndermek için bir adet Arduino Uno, Xbee ile alınan verileri PWM çıkışlarına yazmak için bir adet Arduino Mega kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ağ bağlantılı sistemin blok şeması Şekil 3.5' te, gerçekleştirilmiş sistem Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.5. Algılayıcı verilerinin kablosuz iletimi için oluşturulan sistem şeması



Şekil 3.6. Algılayıcı verilerinin kablosuz iletimi için oluşturulan sistem

Tank 2 ve Tank 4'ün analog algılayıcı verileri Arduino Unonun analog girişleri A0 ve A1'e girilmiştir. Arduino Unoya gömülen program ile A0 ve A1 pinlerindeki algılayıcı verileri Arduino içerisindeki analog dijital dönüştürücü ile dijitale çevrilmiş ve seri porta yazılmıştır.

Verici Xbee modülü Arduino Unonun seri portuna bağlanmıştır. Alıcı Xbee modülü Arduino Meganın seri portuna bağlanmış, algılayıcı verisi paketi alınmıştır. Arduino Megaya gömülen program ile gelen paketteki algılayıcı verileri ayrılmış, Arduino Meganın 2 ve 3 numaralı PWM çıkış pinlerine gerilim değeri olarak yazılmıştır.

Arduino Meganın ikinci ve üçüncü PWM çıkışları tasarlanan alçak geçiren filtrelerle girilmiştir. Böylece analoğa çevrilen algılayıcı verileri PSUPA kartı üzerinden veri işleme kartı aracılığıyla bilgisayara girilmiştir.

3.2.3. TrueTime Araç Kutusu.

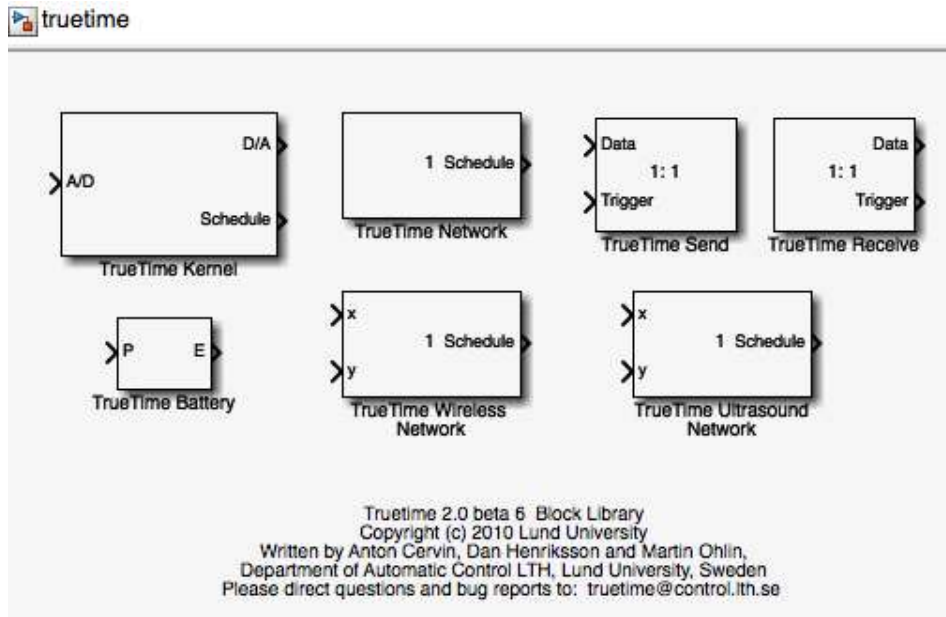
True-Time, ayırık zamanlı, ağ işlem kontrolünü simüle etmek için Matlab ve SIMULINK 'te kullanılan simülasyon bloklarından oluşan bir kütüphanedir.

Gerçek zamanlı sistemler için Matlab/ SIMULINK'te kullanılan araç kutusu (ing. toolbox), ağ iletiminde, devamlı dinamik tesislerde ve gerçek zamanlı kernelde, kontrol görev uygulamalarında kolaylık sağlar.

TrueTime araç kutusu C++ fonksiyonları ya da kod fonksiyonlarından SIMULINK blok diyagramları ile ve Matlab komutları ile kullanılır. TrueTime kablosuz ağların simülasyonunu ve batarya beslemeli cihazları destekler.

TrueTime araç kutusu simülasyon şeması 3 önemli kısım içerir: TrueTime kernel, TrueTime network ve TrueTime process.

TrueTime kernel, ağ tabanlı veri kazancı veya veri işlemleri ve hesaplamaları ve giriş-çıkış (I/O) için sorumludur. Her cihazda “beyin” ve algoritma/mantık kontrolünü gerçekleştirebilir. Belirlenen bütün olayları işleyen birçok basit M-file kullanılır. Kernel, aynı hedeflerin beraber çalışabileceği birçok bağımsız görevi uygulayabilir [41]. Şekil 3.7’ de TrueTime kütüphanesinde mevcut bloklar görülmektedir.



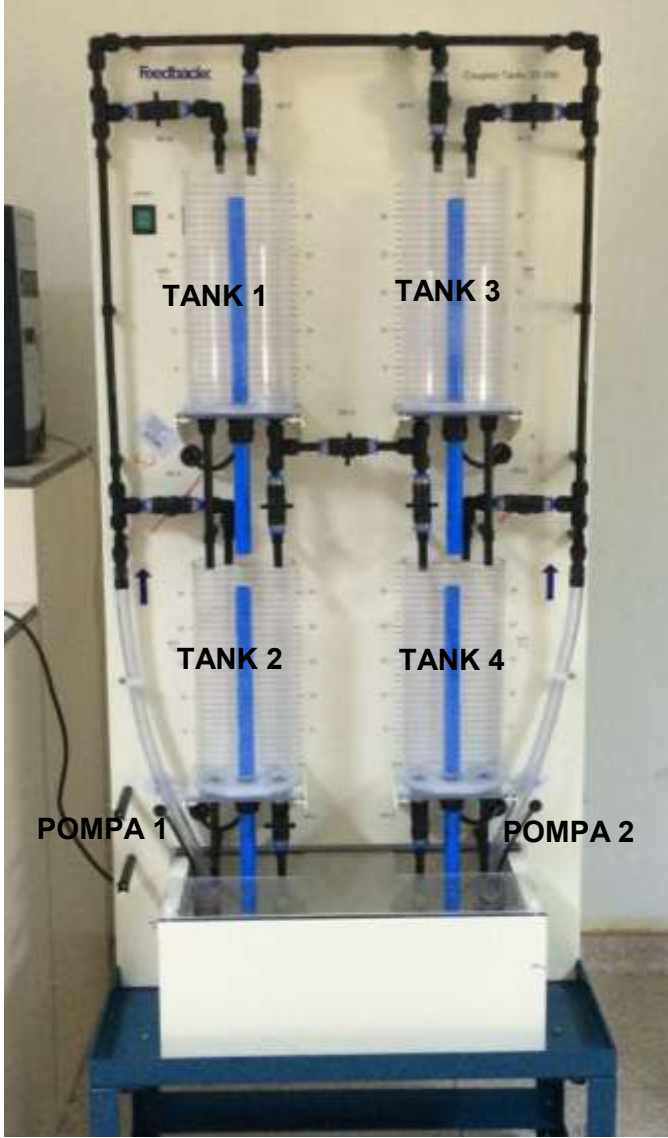
Şekil 3.7. TrueTime SIMULINK kütüphanesi

3.3. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Dörtlü tank sistemi iki giriş ve iki çıkışa sahip doğrusal olmayan bir sistemdir. Doğrusal olmayan sistemler daha düşük performanslı ve kontrolü daha zor sistemlerdir. Bu yüzden dörtlü tank sisteminin doğrusal modeli belirlenen bir çalışma noktası etrafında yapılan Taylor serisi açılımından yararlanılarak elde edilmiştir.

3.3.1. Dörtlü Tank Sisteminin Fiziksel Denklemler ile Modellenmesi

Dörtlü tank için matematiksel model kütle korunumu yasası ve Bernoulli yasası ele alınarak elde edilmiştir. Buna göre sistemde biriken sıvı miktarı, o sisteme giren sıvı miktarıyla o sistemden çıkan sıvı miktarının farkına denktir.



Şekil 3.8. Dörtlü tank sistemi

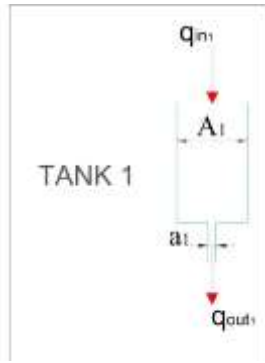
Şekil 3.8’ de gösterilen dörtlü tank sistemi için kütle korunumu yasasından yararlanılarak her bir tank içinde biriken sıvının miktarı ve buna bağlı olarak tankların sıvı yüksekliklerindeki değişimleri her tank için hesaplanarak (3.11), (3.13), (3.15) ve (3.17)’de verilmiştir.

Modelleme yapılırken:

- Tank 2 valf sabiti κ_1 ve Tank 4 valf sabiti κ_2 [0, 1] aralığında,
- Pompa akışı pompaya uygulanan giriş gerilimiyle doğru orantılı,
- Sıcaklık 25 °C, basınç 1 atm,
- Kullanılan sıvının su olduğu,
- Algılayıcıların çıkış gerilimleriyle sıvı yüksekliği çalışma aralığında doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir.

Tank 1;

Şekil 3.9’ da görüldüğü gibi 1 numaralı tanka 2 numaralı pompadan su eklenirken, tankın çıkış çubuğundan su boşalmaktadır.



Şekil 3.9. Tank 1'in sıvı giriş çıkış şeması

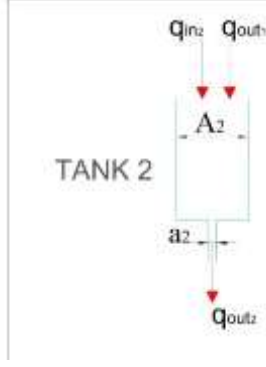
Kütlenin korunumu yasasından yararlanılarak elde edilen Tank 1’ de biriken sıvı miktarı ve Tank 1’in sıvı seviyesinin zamanla değişimini ifade eden denklemler (3.11) ve (3.12)’ de verilmiştir.

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{in_1} - q_{out_1} \quad (3.11)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{[(1-\kappa_2)n_2u_2]}{A_1} - \left[\left(\frac{a_1}{A_1} \right) \sqrt{(2gh_1)} \right] \quad (3.12)$$

Tank 2;

Şekil 3.10’ da görüldüğü gibi 2 numaralı tanka 1 numaralı tanktan çıkan ve 1 numaralı pompadan basılan su eklenirken, tankın çıkış çubuğundan su boşalmaktadır.



Şekil 3.10. Tank 2'nin sıvı giriş çıkış şeması

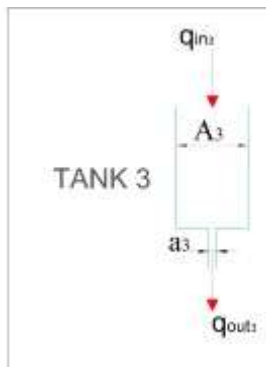
Kütlenin korunumu yasasından yararlanılarak elde edilen Tank 2' de biriken sıvı miktarı ve Tank 2'nin sıvı seviyesinin zamanla değişimini ifade eden denklemler (3.13) ve (3.14)' te verilmiştir.

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_{in_2} + q_{out_1} - q_{out_2} \quad (3.13)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \left[\frac{v_1 n_1 u_1}{A_2} \right] + \left[\frac{a_1 \sqrt{2gh_1}}{A_2} \right] - \left[\left(\frac{a_2}{A_2} \right) \sqrt{2gh_2} \right] \quad (3.14)$$

Tank 3;

Şekil 3.11' de görüldüğü gibi 3 numaralı tanka 1 numaralı pompadan su eklenirken, tankın çıkış çubuğundan su boşalmaktadır.



Şekil 3.11. Tank 3'ün sıvı giriş çıkış şeması

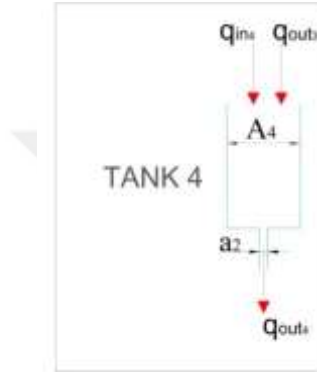
Kütlenin korunumu yasasından yararlanılarak elde edilen Tank 3' te biriken sıvı miktarı ve Tank 3' ün sıvı seviyesinin zamanla değişimini ifade eden denklemler (3.15) ve (3.16)' da verilmiştir.

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = q_{in_3} - q_{out_3} \quad (3.15)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \left[\frac{(1-\gamma_1)n_1u_1}{A_3} \right] - \left[\left(\frac{a_3}{A_3} \right) \sqrt{2gh_3} \right] \quad (3.16)$$

Tank 4;

Şekil 3.12' de görüldüğü gibi 4 numaralı tanka 3 numaralı tanktan çıkan ve 2 numaralı pompadan basılan su eklenirken, tankın çıkış çubuğundan su boşalmaktadır.



Şekil 3.12. Tank 4'ün sıvı giriş çıkış şeması

Kütlenin korunumu yasasından yararlanılarak elde edilen Tank 4' te biriken sıvı miktarı ve Tank 4' ün sıvı seviyesinin zamanla değişimini ifade eden denklemler (3.17) ve (3.18)' de verilmiştir.

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = q_{in_4} + q_{out_3} - q_{out_4} \quad (3.17)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = \left[\frac{\gamma_2 n_2 u_2}{A_4} \right] + \left[\frac{a_3 \sqrt{2gh_3}}{A_4} \right] - \left[\left(\frac{a_2}{A_4} \right) \sqrt{2gh_4} \right] \quad (3.18)$$

Son olarak dörtlü tank sisteminin matematiksel modelini oluşturan dört tanka ait yükseklik değişimi denklemleri (3.19)' da verilmiştir.

$$\frac{dh_1}{dt} = \left[\frac{(1-\gamma_2)n_2u_2}{A_1} \right] - \left[\left(\frac{a_1}{A_1} \right) \sqrt{2gh_1} \right]$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \left[\frac{\gamma_1 n_1 u_1}{A_2} \right] + \left[\frac{a_1 \sqrt{2gh_1}}{A_2} \right] - \left[\left(\frac{a_2}{A_2} \right) \sqrt{2gh_2} \right]$$

$$\begin{aligned}\frac{dh_3}{dt} &= \left[\frac{(1-\gamma_1)n_1u_1}{A_3} \right] - \left[\left(\frac{a_3}{A_3} \right) \sqrt{2gh_3} \right] \\ \frac{dh_4}{dt} &= \left[\frac{\gamma_2n_2u_2}{A_4} \right] + \left[\frac{a_3\sqrt{2gh_3}}{A_4} \right] - \left[\left(\frac{a_2}{A_4} \right) \sqrt{2gh_4} \right]\end{aligned}\quad (3.19)$$

Tanklardaki sıvı seviyelerinin kare köklü terimler ile gösterildiği bu sistem için PID denetleyici tasarımının yapılabilmesi için öncelikle belirlenen bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırma işlemi yapılması gerekmektedir. Bu işlem 3.3.2' gerçekleştirilmiştir.

3.3.2. Dörtlü Tank Sisteminin Durum-Uzay Modelinin Oluşturulması

Dörtlü tank sistemi doğrusal olmayan bir sistemdir; ancak [5]' te önerilen kontrol algoritması doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için geliştirilmiştir. Bu yüzden dörtlü tank sisteminin yerleşik bir nokta etrafında doğrusallaştırılması gerekir. Bunun için ilk adımda denge durumunda sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri bulunur; ikinci adımda ise Taylor serisi açılımından yararlanarak durum uzay modeli oluşturulur.

3.3.2.1. Denge durumunda sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri

Dörtlü tank sisteminin kabul edilen denge durumundaki sıvı seviyelerinin zamana bağlı değişimi sıfırdır. Bu durumda, denge noktalarındaki sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri, (3.19)' de verilen denklemler sifira eşitlenerek (3.20) elde edilir.

$$\begin{aligned}0 &= \frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2g\sqrt{h_1}} + \frac{(1-\gamma_2)}{A_1} u_2 \\ 0 &= \frac{dh_2}{dt} = \frac{\gamma_1n_1u_1}{A_2} - \frac{a_1\sqrt{2g\sqrt{h_1}}}{A_2} - \frac{a_2\sqrt{2g\sqrt{h_2}}}{A_2} \\ 0 &= \frac{dh_3}{dt} = \frac{(1-\gamma_1)n_1u_1}{A_3} - \frac{a_3\sqrt{2g\sqrt{h_3}}}{A_3} \\ 0 &= \frac{dh_4}{dt} = \frac{\gamma_2n_2u_2}{A_4} - \frac{a_3\sqrt{2g\sqrt{h_3}}}{A_4} - \frac{a_4\sqrt{2g\sqrt{h_4}}}{A_4}\end{aligned}\quad (3.20)$$

Burada işlem kolaylığı için sabitler (3.21)' deki gibi isimlendirilir.

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2g} \\
 P_2 &= \frac{(1-\gamma_2)n_2}{A_1} \\
 P_3 &= \frac{\gamma_1 n_1}{A_2} \\
 P_4 &= \frac{a_1}{A_2} \sqrt{2g} \\
 P_5 &= \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2g} \\
 P_6 &= \frac{(1-\gamma_1)n_1}{A_3} \\
 P_7 &= \frac{a_3}{A_3} \sqrt{2g} \\
 P_8 &= \frac{\gamma_2 n_2}{A_4} \\
 P_9 &= \frac{a_3}{A_4} \sqrt{2g} \\
 P_{10} &= \frac{a_4}{A_4} \sqrt{2g}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Denklemlerdeki değişkenler belirlendiği gibi P değişkenleriyle değiştirildiğinde tüm denklemler (3.22)'deki şekilde elde edilir.

$$0 = \begin{bmatrix} -P_1 & 0 & 0 & 0 \\ P_4 & -P_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -P_7 & 0 \\ 0 & 0 & P_9 & -P_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{h_1^0} \\ \sqrt{h_2^0} \\ \sqrt{h_3^0} \\ \sqrt{h_4^0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & P_2 \\ P_3 & 0 \\ P_6 & 0 \\ 0 & P_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^0 \\ u_2^0 \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

Yukarıdaki denklemin birinci ve üçüncü satırlarından u_2^0 ve u_1^0 (3.23)'teki gibi bulunur.

$$\begin{aligned}
 u_2 &= \frac{P_1}{P_2} \sqrt{h_1} \\
 u_1 &= \frac{P_7}{P_6} \sqrt{h_3}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Yine (3.22)'de verilen denklemin ikinci ve dördüncü satırları düzenlendiğinde (3.24) elde edilir.

$$\begin{aligned}
 0 &= P_4\sqrt{h_1} - P_5\sqrt{h_2} + \frac{P_3P_7\sqrt{h_3}}{P_6} \\
 0 &= P_9\sqrt{h_3} - P_{10}\sqrt{h_4} + \frac{P_8P_1\sqrt{h_1}}{P_2}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

(3.24) düzenlendiğinde (3.25) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{h_2^\circ} \\ \sqrt{h_4^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_4}{P_5} & \frac{P_3P_7}{P_6P_5} \\ \frac{P_8P_1}{P_2P_{10}} & \frac{P_9}{P_{10}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{h_1} \\ \sqrt{h_3} \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

h_2° ve h_4° için belirlenen değerler yerine konduğunda, h_1° ve h_3° (3.26)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{h_1^\circ} \\ \sqrt{h_3^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_4}{P_5} & \frac{P_3P_7}{P_6P_5} \\ \frac{P_8P_1}{P_2P_{10}} & \frac{P_9}{P_{10}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sqrt{h_2^\circ} \\ \sqrt{h_4^\circ} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

3.3.2.2. Sistemin Taylor serisi yaklaşımıyla doğrusallaştırılması ile durum uzay modelinin elde edilmesi

Sistemin doğrusallaştırılması için Taylor serisi yaklaşımı modele uygulandığında diferansiyel denklemin genel şekli (3.27)'deki gibi olur [42].

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= \frac{d\Delta h}{dt} = f(\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta u_1, \Delta u_2) \\
 \mathbf{x} &= \Delta \mathbf{h} = \mathbf{h} - \mathbf{h}^0 \\
 \Delta \mathbf{u} &= \mathbf{u} - \mathbf{u}^0
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Doğrusal yaklaşım için Taylor serisi açılımı kullanıldığında denklem (3.28)'deki gibi olur.

$$\frac{dx}{dt} = f(\mathbf{h}, \mathbf{u}) = f(\Delta \mathbf{h} + \mathbf{h}^0, \Delta \mathbf{u} + \mathbf{u}^0) \tag{3.28}$$

Doğrusal yaklaşımdan elde edilen denklemde yüksek dereceli terimler ayırıldığında denklem (3.29)'daki şekli alır.

$$\frac{dx}{dt} = f(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0) + \frac{df}{dh}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0)\Delta\mathbf{h} + \frac{df}{du}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0)\Delta\mathbf{u} + \text{yüksek dereceli terimler} \quad (3.29)$$

İşlem kolaylığı için yüksek dereceli terimleri ihmal edilirse f ' in h_n^0 ve u_n^0 denge durumu noktalarında elde edilen Jacobian matrisi (3.30)' daki gibi olur.

$$\mathbf{A} = \frac{df}{dh}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0) = \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dh_1} & \frac{dx_1}{dh_2} & \frac{dx_1}{dh_3} & \frac{dx_1}{dh_4} \\ \frac{dx_2}{dh_1} & \frac{dx_2}{dh_2} & \frac{dx_2}{dh_3} & \frac{dx_2}{dh_4} \\ \frac{dx_3}{dh_1} & \frac{dx_3}{dh_2} & \frac{dx_3}{dh_3} & \frac{dx_3}{dh_4} \\ \frac{dx_4}{dh_1} & \frac{dx_4}{dh_2} & \frac{dx_4}{dh_3} & \frac{dx_4}{dh_4} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \frac{df}{du}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0) = \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{du_1} & \frac{dx_1}{du_2} \\ \frac{dx_2}{du_1} & \frac{dx_2}{du_2} \\ \frac{dx_3}{du_1} & \frac{dx_3}{du_2} \\ \frac{dx_4}{du_1} & \frac{dx_4}{du_2} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Jacobian bir denge noktasında veya bir denge noktasına yakın yerlerde sistemin diferansiyel denklemlerini çözmek için kullanılır. h_n^0 sabit olduğu için türevi de 0 olduğundan sıvı seviyesindeki değişim (3.31)' deki gibi olur.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{d\Delta h}{dt} + \frac{dh^0}{dt} = \frac{d\Delta h}{dt} \quad (3.31)$$

Ayrıca $f(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0) = 0$ olduğundan sıvı seviyesi değişiminin zamana göre türevi (3.32)' deki gibi elde edilir.

$$\frac{d\Delta h}{dt} = \frac{df}{dh}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0)\Delta\mathbf{h} + \frac{df}{du}(\mathbf{h}^0, \mathbf{u}^0)\Delta\mathbf{u} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{h} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \quad (3.32)$$

Durum uzay modeli denklemi (3.33)' te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Durum uzay modelinde durum vektörü $\mathbf{x} = [\Delta h_1 \ \Delta h_2 \ \Delta h_3 \ \Delta h_4]^T$, giriş vektörü $\mathbf{u} = [\Delta u_1 \ \Delta u_2]^T$, çıkış vektörü $\mathbf{y} = [\Delta h_2 \ \Delta h_4]^T$ olarak belirlenmiştir.

Sistemin zaman sabitleri her tank için (3.34)' teki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{A_1}{a_1} \sqrt{\left(\frac{2h_1^0}{g}\right)} \\ T_2 &= \frac{A_2}{a_2} \sqrt{\left(\frac{2h_2^0}{g}\right)} \\ T_3 &= \frac{A_3}{a_3} \sqrt{\left(\frac{2h_3^0}{g}\right)} \\ T_4 &= \frac{A_4}{a_4} \sqrt{\left(\frac{2h_4^0}{g}\right)} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Durum uzay modelinin A, B, C ve D matrisleri (3.35)'teki gibi olur.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{A_1}{A_2 T_1} & \frac{-1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_3}{A_4 T_3} & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-\gamma_2)n_2}{A_1} \\ \frac{\gamma_1 n_1 u_1}{A_2} & 0 \\ \frac{(1-\gamma_1)n_1 u_1}{A_3} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 n_2 u_2}{A_4} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Sistemin durum uzay modeli denklemlerinin son hali (3.36)' daki denklemlerde verilmiştir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{A_1}{A_2 T_1} & \frac{-1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_3}{A_4 T_3} & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-\gamma_2)n_2}{A_1} \\ \frac{\gamma_1 n_1}{A_2} & 0 \\ \frac{(1-\gamma_1)n_1}{A_3} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 n_2}{A_4} \end{bmatrix} \mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (3.36)$$

3.3.3. Sistemin Doğrusal Transfer Fonksiyonunun Oluşturulması

Durum uzay modeli belirlenmiş olan bir sistemin transfer fonksiyonu matrisi (3.37)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{\mathbf{y}}{\mathbf{u}} = \mathbf{G} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (3.37)$$

Elde edilen \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} ve \mathbf{D} matrisleri (3.37)' de yerine yazıldığında transfer fonksiyonu matrisi (3.38)' deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{T_2 \gamma_1 n_1}{A_2 T_2 s + 1} & \frac{-T_2 n_2 (\gamma_2 - 1)}{A_2 (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \\ \frac{-T_4 n_1 (\gamma_1 - 1)}{A_4 (T_3 s + 1)(T_4 s + 1)} & \frac{T_4 \gamma_2 n_2}{A_4 T_4 s + 1} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

3.4. GERÇEK SİSTEMİN MODELİ

Bu çalışmada Feedback Inc. firmasının 33-041 kodlu deney seti kullanılmıştır. Bu sete ait sistem parametreleri Çizelge 3.2' de verilmiştir [43].

Çizelge 3.2. Sistem parametreleri

$n_1=7$ cm/Vs	$a_1=0.50265$ cm ²	$A_1=138.9$ cm ²
$n_2=7$ cm/Vs	$a_2=0.50265$ cm ²	$A_2=138.9$ cm ²
$k_c=1$ V/cm	$a_3=0.50265$ cm ²	$A_3=138.9$ cm ²
$g=981$ cm/s ²	$a_4=0.50265$ cm ²	$A_4=138.9$ cm ²

Sistemdeki tankların sıvı seviyesi 0-28 cm arasında değiştiğinden ve düşük seviyelerde algılayıcıların doğrusal olmama etkisi daha çok görüldüğünden alt

tanklar için çalışma noktası sıvı seviyesi tankın yarı yüksekliğinden biraz fazla olan 16 cm olarak belirlenmiştir.

3.4.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistemin Modeli

Minimum fazlı durum için valf pozisyonları $\alpha_1=0.70$ ve $\alpha_2=0.70$ olarak belirlenmiştir.

Minimum fazlı durum için MATLAB' te hesaplanan denge durumu sıvı seviye noktaları ve pompa gerilimleri aşağıdaki Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Minimum fazlı sistem için hesaplanan çalışma noktaları

$h_1^0(\text{cm})$	$h_2^0(\text{cm})$	$h_3^0(\text{cm})$	$h_4^0(\text{cm})$	$u_1^0(\text{V})$	$u_2^0(\text{V})$
1.44	16	1.44	16	12.7276	12.7276

Minimum fazlı durum için elde edilen durum uzay modeline sistem parametreleri girilerek MATLAB' te elde edilen durum uzay modeli (3.39)' da verilmiştir.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0.06679 & 0 & 0 & 0 \\ 0.06679 & -0.02004 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.06679 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0679 & -0.02004 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0.01512 \\ 0.03528 & 0 \\ 0.01512 & 0 \\ 0 & 0.03528 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u \quad (3.39)$$

Minimum fazlı durum için MATLAB' te hesaplanan transfer fonksiyonu (3.40)' ta verilmiştir.

$$G = \begin{bmatrix} \frac{0.03528}{s+0.02004} & \frac{0.00101}{s^2+0.08683s+0.001338} \\ \frac{0.00101}{s^2+0.08683s+0.001338} & \frac{0.03528}{s+0.02004} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Transfer fonksiyonu (3.40)' ta verilen minimum fazlı sistemin kutupları -0.0200 , -0.0668 , -0.0200 ve -0.0668 noktalarında; sıfırları -0.0954 ve -0.0382 noktalarındadır.

3.4.2. Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistemin Modeli

Minimum fazlı olmayan durum için valf pozisyonları $\tau_1=0.30$ ve $\tau_2=0.30$ olarak belirlenmiştir.

Minimum fazlı olmayan durum için MATLAB' te hesaplanan denge durumu sıvı seviye noktaları ve pompa gerilimleri Çizelge 3.4' te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Minimum fazlı olmayan sistem için hesaplanan çalışma noktaları

h_1^0 (cm)	h_2^0 (cm)	h_3^0 (cm)	h_4^0 (cm)	u_1^0 (V)	u_2^0 (V)
7.84	16	7.84	16	12.7276	12.7276

Minimum fazlı olmayan durum için elde edilen durum uzay modeline sistem parametreleri girilerek MATLAB' te elde edilen durum uzay modeli (3.41)' de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} = & \begin{bmatrix} -0.02862 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02862 & -0.02004 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.02862 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02862 & -0.02004 \end{bmatrix} x \\
 & + \begin{bmatrix} 0 & 0.03528 \\ 0.01512 & 0 \\ 0.03528 & 0 \\ 0 & 0.01512 \end{bmatrix} u \\
 y = & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Minimum fazlı olmayan durum için MATLAB' te hesaplanan transfer fonksiyonu (3.42)' de verilmiştir.

$$G = \begin{bmatrix} \frac{0.01512}{s+0.02004} & \frac{0.00101}{s^2+0.04866s+0.0005735} \\ \frac{0.00101}{s^2+0.04866s+0.0005735} & \frac{0.01512}{s+0.02004} \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

Transfer fonksiyonu (3.42)' de verilen minimum fazlı olmayan sistemin kutupları -0.0200 , -0.0286 , -0.0200 ve -0.0286 noktalarında; sıfırları -0.0954 ve 0.0382 noktalarındadır.

3.5. GERÇEK SİSTEMİN BASINÇ ALGILAYICISI KALİBRASYONU

Sistemin basınç algılayıcısı doğrusal olmadığı için, sıvı seviyesi 0 cm iken algılayıcı gerilimi 1 V; 25 cm iken algılayıcı gerilimi 3.5 V olacak şekilde, bu noktalar etrafında doğrusallaştırılması için algılayıcı kalibrasyonu yapılmıştır.

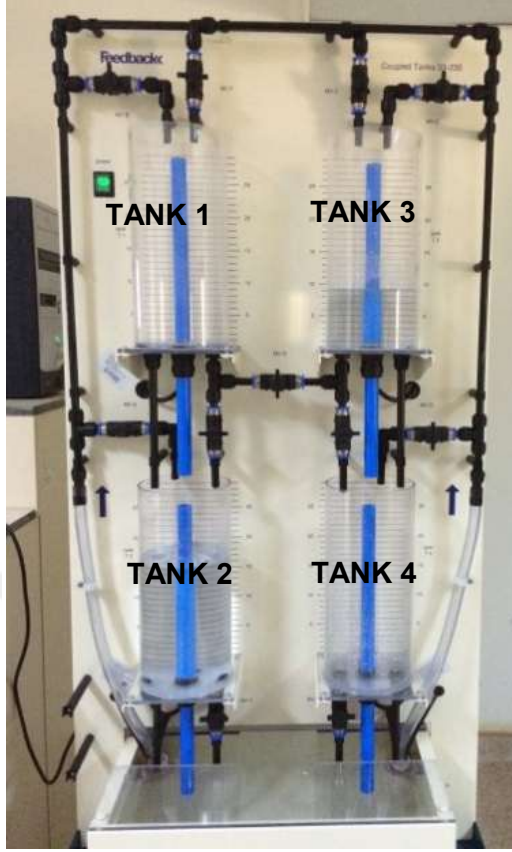
İlk olarak algılayıcı kazancı sıfırlanmıştır. Daha sonra algılayıcı geriliminin sıvı seviyesi 0 cm' de iken 1V olması için offset ayarı yapılmıştır. Daha sonra pompadan sıvı gönderilerek Tank1'in sıvı seviyesi 25 cm yapılmıştır. Bu durumda basınç algılayıcısının gerilim değerinin 3.5 V olması gerektiğinden algılayıcı kazancı bu değere ayarlanmıştır.

3.6. GERÇEK SİSTEMİN VALF POZİSYONLARININ AYARLANMASI

3.6.1. Minimum Fazlı Durum İçin Valf Pozisyonlarının Ayarlanması

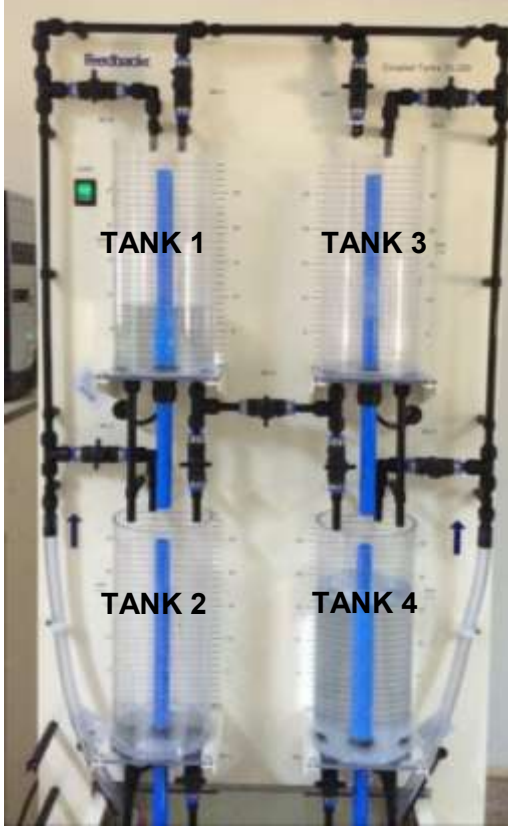
Sistemin γ_1 ve γ_2 değerinin 0.7 olduğu minimum fazlı durum için valf pozisyonları ayarlanmıştır. Valf sabitlerini hesaplamak için sistem iki ayrı kısım olarak ele alınmıştır.

İlk kısımda Tank 2 ve Tank 3 için pompa 1 çalıştırılıp Tank 2' ye ait olan vana tamamen açılmış, Tank 3'ün vanası biraz açılmıştır. Bu durumda γ_1 değeri $\gamma_1 = \frac{h_2}{h_2+h_3}$ eşitliğinden bulunmuştur. Tank 3'ün vana pozisyonu değiştirilerek γ_1 0.7'ye ayarlanmıştır. Şekil 3.13' te görüldüğü gibi $h_2=8.5$ cm, $h_3=19.5$ cm iken $\gamma_1=0.7$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.13. Minimum faz sisteme τ_1 değeri ayarlanması

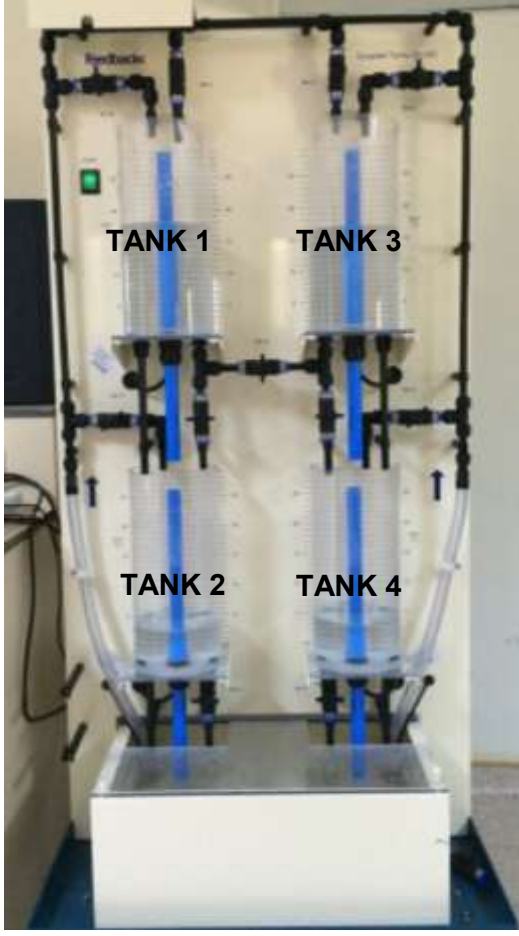
İkinci kısımda Tank 1 ve Tank 4 için pompa 2 çalıştırılıp yukarıda yapılan işlemler tekrar edilmiştir. Tank 1'in vanası biraz açılmıştır. Bu durumda τ_2 değeri $\tau_2 = \frac{h_4}{h_1+h_4}$ eşitliğinden bulunmuştur. Tank 1'in vana pozisyonu değiştirilerek τ_2 0.7'ye ayarlanmıştır. Şekil 3.14' te görüldüğü gibi $h_1=9\text{cm}$, $h_4=21\text{ cm}$ iken $\tau_2 = 0.7$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.14. Minimum faz sisteme τ_2 değeri ayarlanması

3.6.2. Minimum Fazlı Olmayan Durum İçin Valf Pozisyonlarının Ayarlanması

Sistemin τ_1 ve τ_2 değerinin 0.3 olduğu minimum fazlı olmayan durum için valf pozisyonları ayarlanmıştır. Valf sabitlerini hesaplamak için bu defa sistem tek kısım olarak ele alınmıştır. τ_1 değeri $\tau_1 = \frac{h_2}{h_2+h_3}$, τ_2 değeri $\tau_2 = \frac{h_4}{h_1+h_4}$ eşitliğinden bulunmuştur. Tank 2' nin vana pozisyonu değiştirilerek τ_1 0.3'e ayarlanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi $h_2=6.5$ cm, $h_3=15$ cm iken $\tau_1=0.3$ olarak ayarlanmıştır. Tank 4' ün vana pozisyonu değiştirilerek τ_2 0.3'e ayarlanmıştır. Şekil 3.15' de görüldüğü gibi $h_4=7$ cm, $h_1=16$ cm iken $\tau_2=0.3$ olarak ayarlanmıştır.



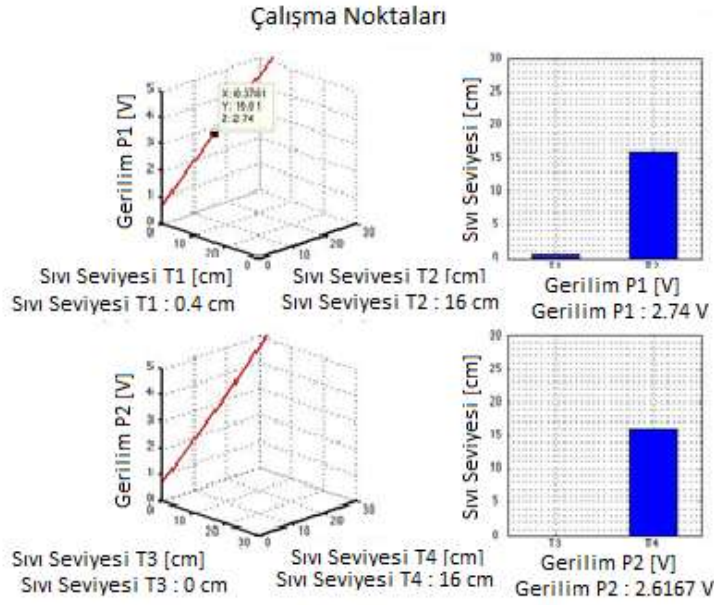
Şekil 3.15. Minimum fazlı olmayan sisteme τ_1 ve τ_2 değeri ayarlanması

3.7. GERÇEK SİSTEMİN ÇALIŞMA NOKTALARININ BELİRLENMESİ

Sistemin çalışma noktalarının belirlenmesi için sisteme 0-5 V aralığında 10 noktada 500 saniye boyunca kontrol sinyali uygulanmıştır. Elde edilen sıvı seviyeleriyle çalışma noktaları grafiği elde edilmiştir. Bu grafik üzerinde $h_2=16$ cm ve $h_4=16$ cm noktalarına karşılık gelen h_1 , h_3 , u_1 ve u_2 değerleri bulunarak çalışma noktaları belirlenmiştir.

3.7.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistemin Çalışma Noktalarının Belirlenmesi

Elde edilen sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri grafiği Şekil 3.16' da verilmiştir.



Şekil 3.16. Minimum fazlı sistemin çalışma noktası grafiği

Şekil 3.16' da verilen grafik üzerinde daha önce belirlenen h_2^0 ve h_4^0 değerlerine karşılık gelen h_1^0 , h_3^0 , u_1^0 ve u_2^0 noktaları belirlenerek Çizelge 3.5' teki çalışma noktaları tablosu oluşturulmuştur.

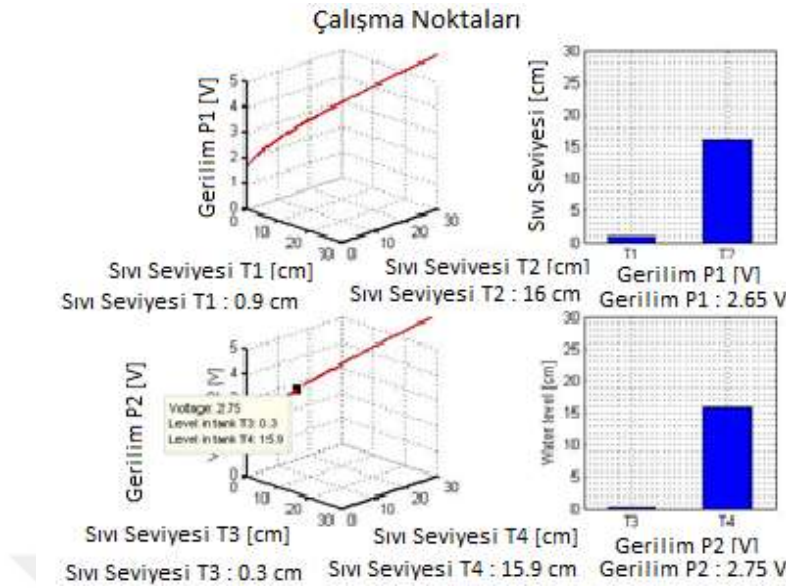
Şekil 3.16' da verilen grafik üzerinde görülen gerilim değerleri veri işleme kartında 0 - 5 V arasında örneklendiğinden gerçek örnekleme değeri olan 0 – 24 V aralığına çekilmek için 24/5 ile çarpılmıştır.

Çizelge 3.5. Minimum fazlı gerçek sistemin çalışma noktaları

h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	H_4 (cm)	u_1 (V)	u_2 (V)
0.4	16	0	16	13.152	12.576

3.7.2. Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistemin Çalışma Noktalarının Belirlenmesi

Elde edilen sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri grafiği Şekil 3.17' de verilmiştir.



Şekil 3.17. Minimum fazlı olmayan sistemin çalışma noktası grafiği

Şekil 3.17’ de verilen grafik üzerinde daha önce belirlenen h_2^0 ve h_4^0 değerlerine karşılık gelen h_1^0 , h_3^0 , u_1^0 ve u_2^0 noktaları belirlenerek Çizelge 3.6’ daki çalışma noktaları tablosu oluşturulmuştur.

Şekil 3.17’ de verilen grafik üzerinde görülen gerilim değerleri veri işleme kartında 0 - 5 V arasında örneklendiğinden gerçek örnekleme değeri olan 0 – 24 V aralığına çekilmek için 24/5 ile çarpılmıştır.

Çizelge 3.6. Minimum fazlı olmayan gerçek sistemin çalışma noktaları

h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	u_1 (V)	u_2 (V)
0.9	16	0.3	15.9	12.72	13.2

3.8. GERÇEK SİSTEM İÇİN PID DENETLEYİCİ TASARIMI

Merkezi olmayan denetleyici tasarımı Öneri 3.1’de verilen yöntemle tasarlanmıştır. Dörtlü tank sisteminin ağ üzerinden kontrolü için örnekleme periyodu $T = 2 sn$ olarak belirlenmiştir. Bu seçim (3.1)’de verilen ölçüt doğrultusunda ağ üzerinde minimum paket kaybının sağlanması için seçilmiştir. Denetleyici performansı ağ gecikmesinin $0.25 T$ ve $0.5 T$ olarak kabul edildiği iki durum için basamak tepkisi üzerinden değerlendirilmiştir.

3.8.1. Minimum Fazlı Gerçek Sistem İçin PID Denetleyici Tasarımı

$K_{P_2} = 90$, $K_{D_2} = 0$ ve $K_{P_1} = 90$, $K_{D_1} = 0$ olarak belirlendiğinde;

- Zaman gecikmesi 0 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 2.071 + 0.02301 \frac{1}{s}$$

$C_2 = 2.071 + 0.02301 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.

- Zaman gecikmesi 0.5 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 2.095 + 0.02328 \frac{1}{s}$$

$C_2 = 2.095 + 0.02328 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.

- Zaman gecikmesi 1 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 2.12 + 0.02355 \frac{1}{s}$$

$C_2 = 2.12 + 0.02355 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.

3.8.2 Minimum Fazlı Olmayan Gerçek Sistem İçin PID Denetleyici Tasarımı

$K_{P_2} = 53$, $K_{D_2} = 0$ ve $K_{P_1} = 53$, $K_{D_1} = 0$ olarak belirlendiğinde;

- Zaman gecikmesi 0 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 1.325 + 0.02519 \frac{1}{s}$$

$C_2 = 1.325 + 0.02519 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.

- Zaman gecikmesi 0.5 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 1.307 + 0.02466 \frac{1}{s}$$

$C_2 = 1.307 + 0.02466 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.

- Zaman gecikmesi 1 saniye olarak kabul edildiğinde;

$$C_1 = 1.289 + 0.02433 \frac{1}{s}$$

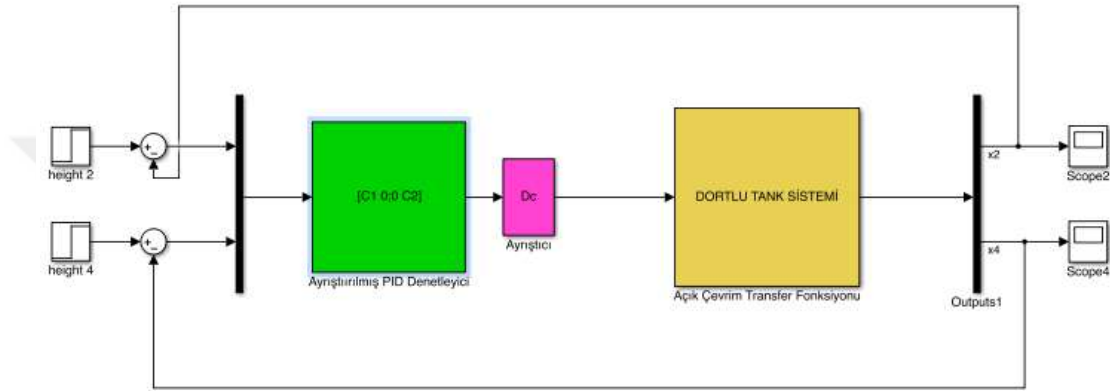
$C_2 = 1.289 + 0.02433 \frac{1}{s}$ olarak elde edilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. GERÇEK SİSTEM İÇİN TASARLANAN PID DENETLEYİCİLERİN TRUETIME ARAÇ KUTUSU İLE SİMULASYONU

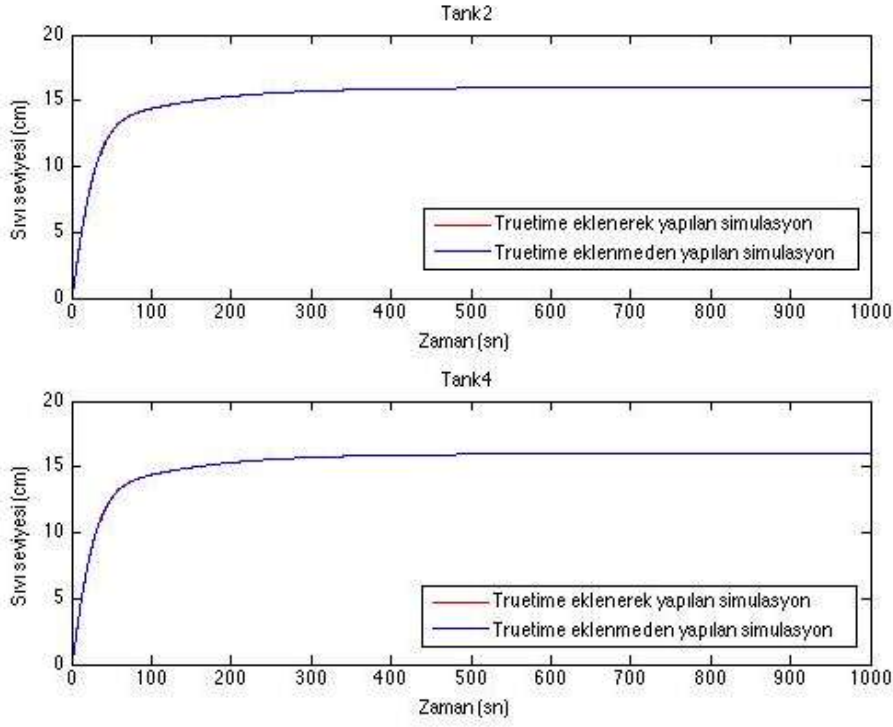
Dörtlü tank sistemi için ayrıştırıcı tasarlanmıştır. Ayrıştırılmış sistem modeli için tasarlanan PID denetleyiciler eklenerek elde edilen birim geri beslemeli sistem Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



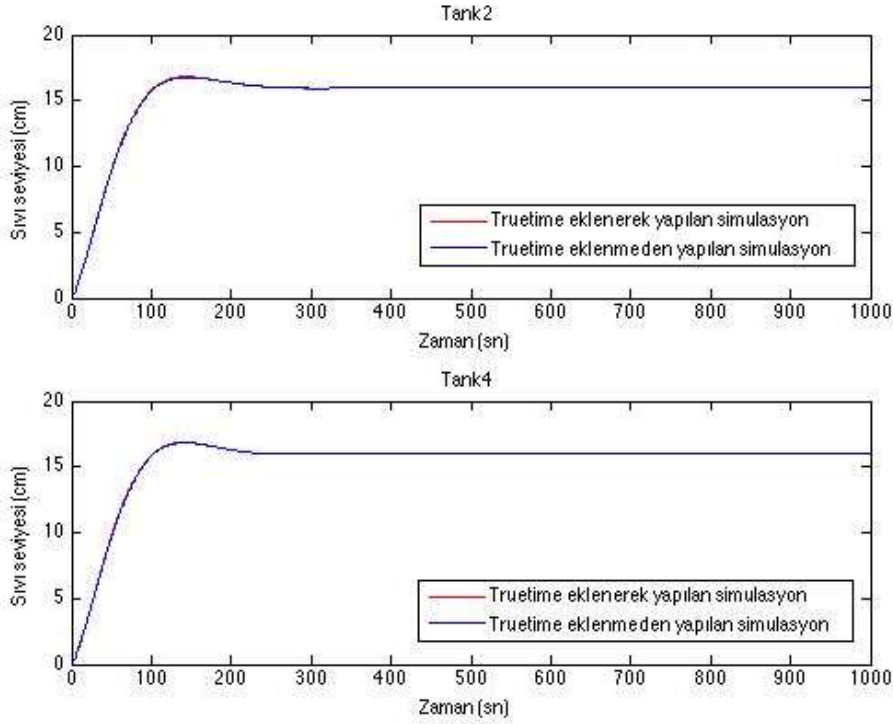
Şekil 4.1. Ağ bağlantısız sistemin SIMULINK modeli

Şekil 4.1’de gösterilen modelde geri besleme döngüleri TrueTime araç kutusunda bulunan alıcı ve verici düğümlerle kapatılmıştır. Böylece ağ tabanlı PID denetleyicili sistem modeli elde edilmiştir. Ayrıca ağ trafiğini artırmak için rastgele veriler gönderip alan bir çift alıcı-verici düğümü eklenmiştir. Sonuç olarak merkezi olmayan PID denetleyicinin ağ tabanlı sistemdeki performansının değerlendirilmesi için Şekil 4.2’ de gösterilen SIMULINK modeli oluşturulmuştur. Denetleyici performansları paket kayıp olasılıklarının 0.1 ve 0.3 olarak kabul edildiği iki durum için incelenmiştir.

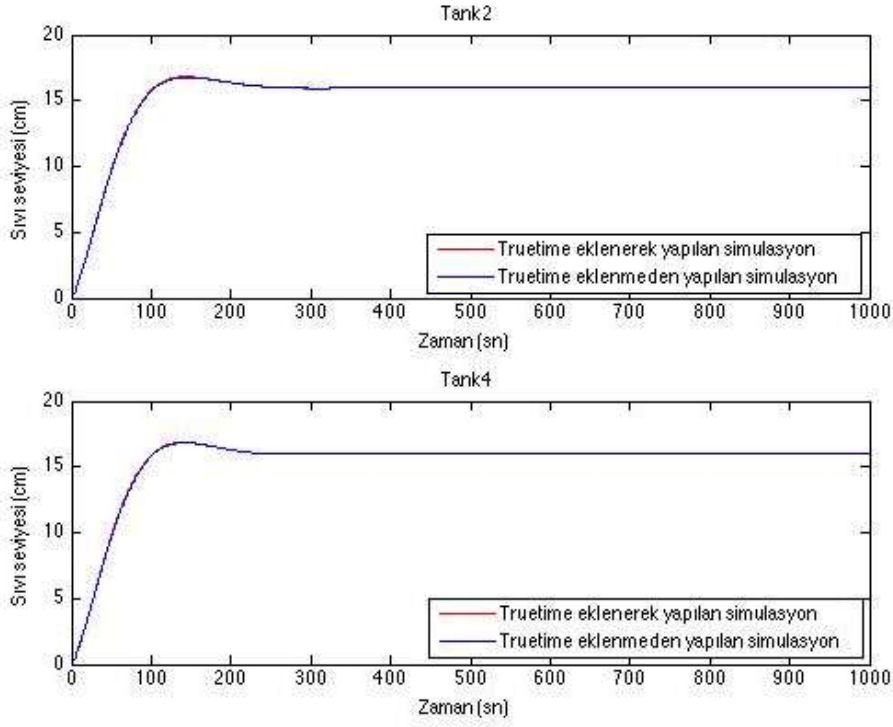
Simülasyon sonuçları ağ bağlantısının olmadığı durum ile kıyaslanarak Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ daki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Minimum fazlı sistemde paket kaybı %30 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi



Şekil 4.5. Minimum fazlı olmayan sistemde paket kaybı %10 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi

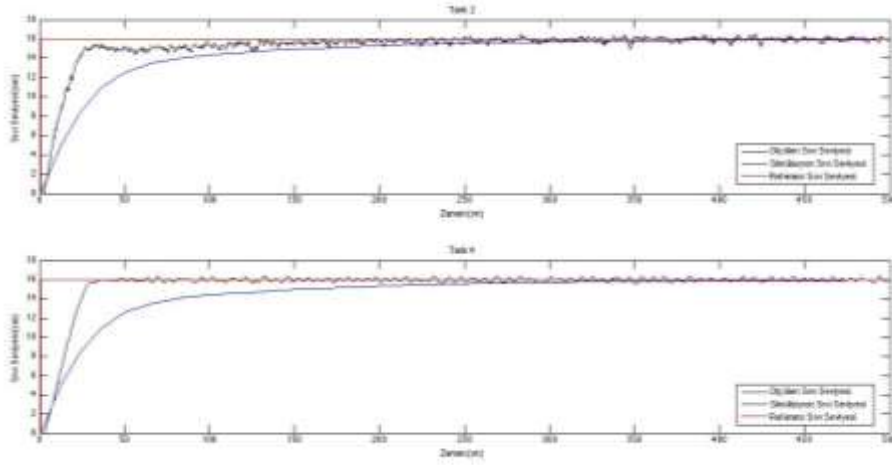


Şekil 4.6. Minimum fazlı olmayan sistemde paket kaybı %30 olan ağ tabanlı sistemin basamak tepkisi ile kablolu bağlantılı sistemin basamak tepkisi

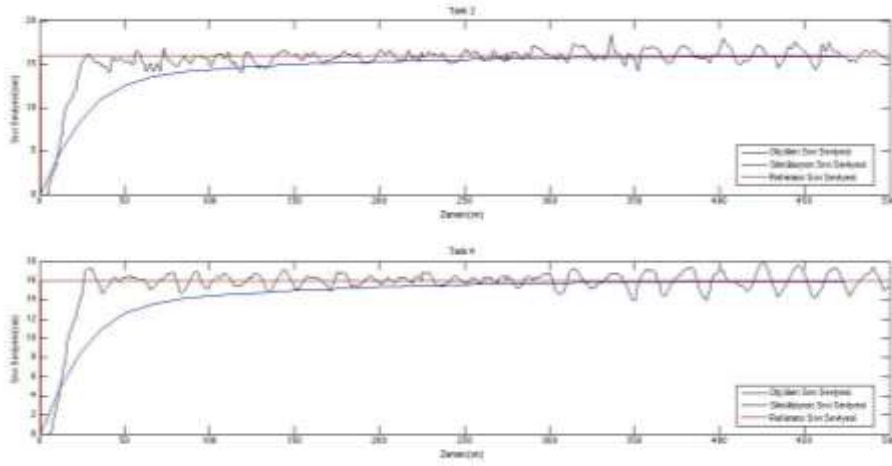
Bu grafikler incelendiğinde Zigbee protokolü kullanılarak oluşturulan ağ bağlantısında paket kaybı %10 ve %30 olarak belirlendiğinde hem minimum fazlı olan durumda hem de minimum fazlı olmayan durumda Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi sistem tepkisinin kayda değer bir bozulmaya uğramadığı görülmüştür.

4.2. MİNİMUM FAZLI SİSTEMİN SIVI SEVİYE KONTROLÜ

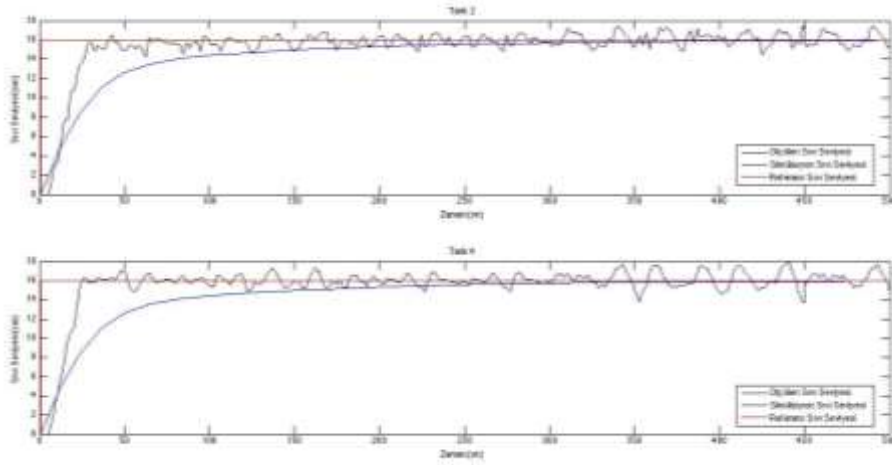
Minimum fazlı sistemin basınç algılayıcısı verilerinin veri işleme kartına kablolu olarak girildiği durumda zaman gecikmesi 0 sn olarak kabul edilip tasarlanan denetleyici sisteme uygulanmış bu durumdaki basamak tepkisi Şekil 4.7’de verilmiştir. Minimum fazlı sistemin basınç algılayıcısı verilerinin veri işleme kartına kablosuz olarak girildiği durumda zaman gecikmesi için 0 sn, 0.5 sn ve 1 sn olarak belirlendiği koşullarda elde edilen üç denetleyici sisteme uygulanmış ve bu üç durumdaki basamak tepkisi sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’ da verilmiştir.



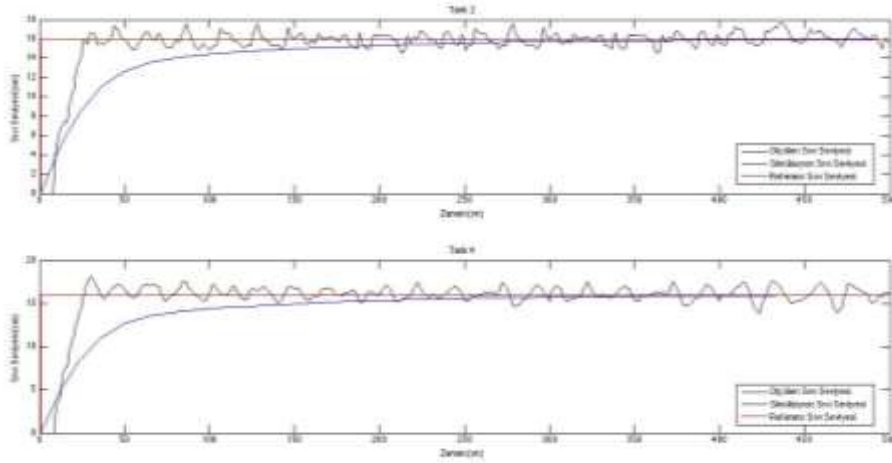
Şekil 4.7. Minimum fazlı kablolu basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn



Şekil 4.8. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn

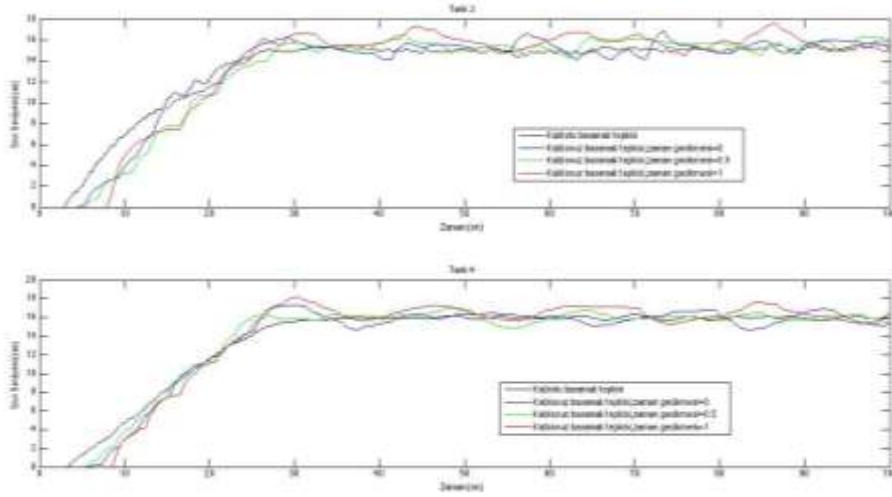


Şekil 4.9. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0.5 sn



Şekil 4.10. Minimum fazlı kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=1 sn

Minimum fazlı durum için tüm durumlarda birim basamak tepkisinin ilk 100 saniyesi çizdirilerek Şekil 4.11’ de verilmiştir, ölçüm ve simülasyon grafikleri üzerinde yükselme zamanı, oturma zamanı, tepe zamanı, maksimum taşma analiz edilerek Çizelge 4.1. elde edilmiştir. Zaman gecikmesi eklenmesinin birim basamak tepkisinde pek etkili olmadığı gözlemlenmiştir.



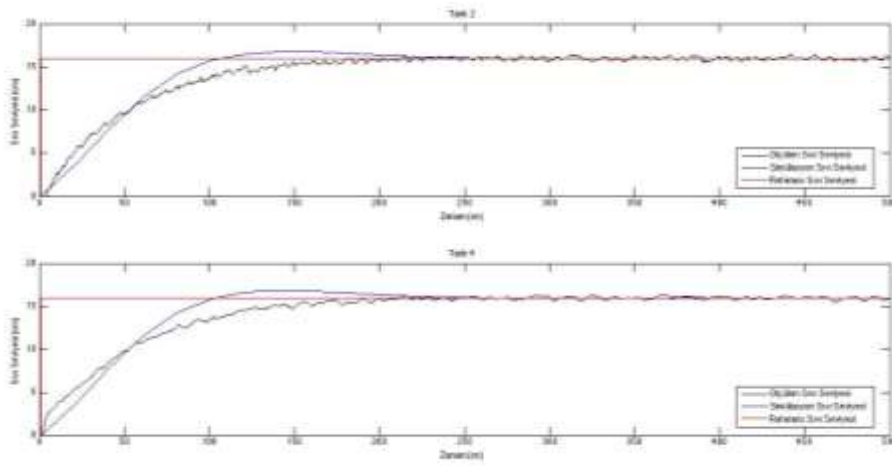
Şekil 4.11. Minimum fazlı basamak tepkisi

Çizelge 4.1. Minimum fazlı sistem basamak tepkisi parametreleri

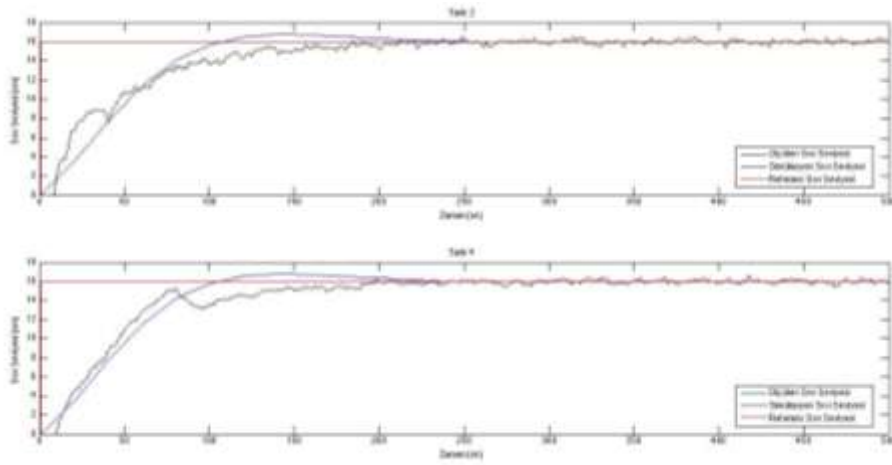
Kablolu, Zaman Gecikmesi=0 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	24.8	103	140	250	-	-	-	-
TANK 4	25.5	102.7	45	240	-	-	-	-
Kablosuz, Zaman Gecikmesi=0 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	24	102	26	235	-	-	-	-
TANK 4	24.6	102.3	26	234	-	-	-	-
Kablosuz, Zaman Gecikmesi=0.5 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	27.1	101	60	200	-	-	-	-
TANK 4	23	100.5	57	230	-	-	-	-
Kablosuz, Zaman Gecikmesi=1 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	24.5	98	25.5	232	-	-	-	-
TANK 4	24.5	99	25.4	234	-	-	-	-

4.3. MİNİMUM FAZLI OLMAYAN SİSTEMİN SIVI SEVİYE KONTROLÜ

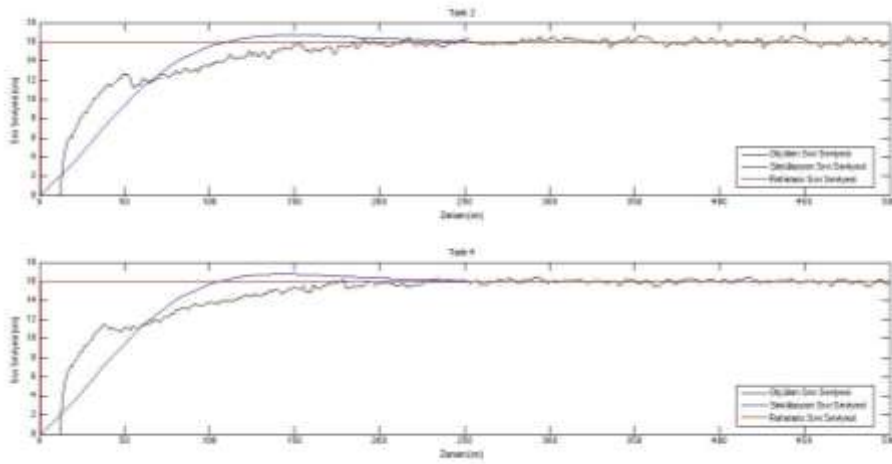
Minimum fazlı olmayan sistemin basınç algılayıcısı verilerinin veri işleme kartına kablolu olarak girildiği durumda zaman gecikmesi 0 sn olarak kabul edilip tasarlanan denetleyici sisteme uygulanmış bu durumdaki basamak tepkisi Şekil 4.12’ de verilmiştir. Minimum fazlı olmayan sistemin basınç algılayıcısı verilerinin veri işleme kartına kablosuz olarak girildiği durumda zaman gecikmesi için 0 sn, 0.5 sn ve 1 sn olarak belirlendiği koşullarda elde edilen üç denetleyici sisteme uygulanmış ve bu üç durumdaki basamak tepkisi sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’ te verilmiştir.



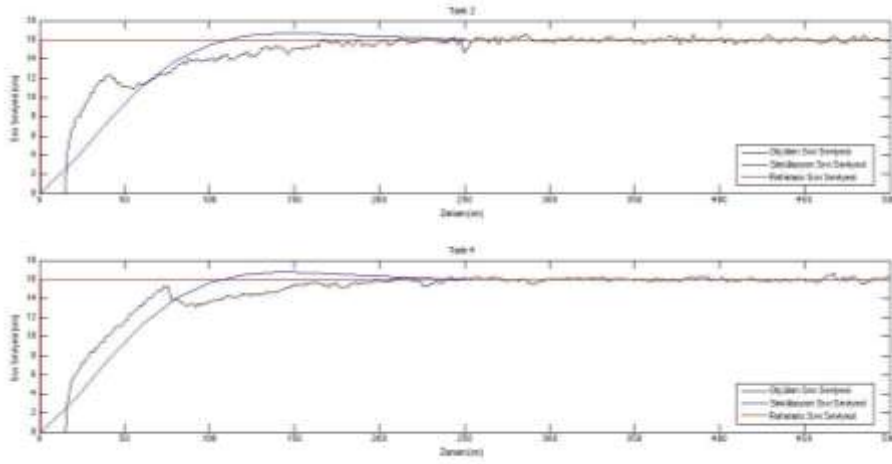
Şekil 4.12. Minimum fazlı olmayan kablolu basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn



Şekil 4.13. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0 sn

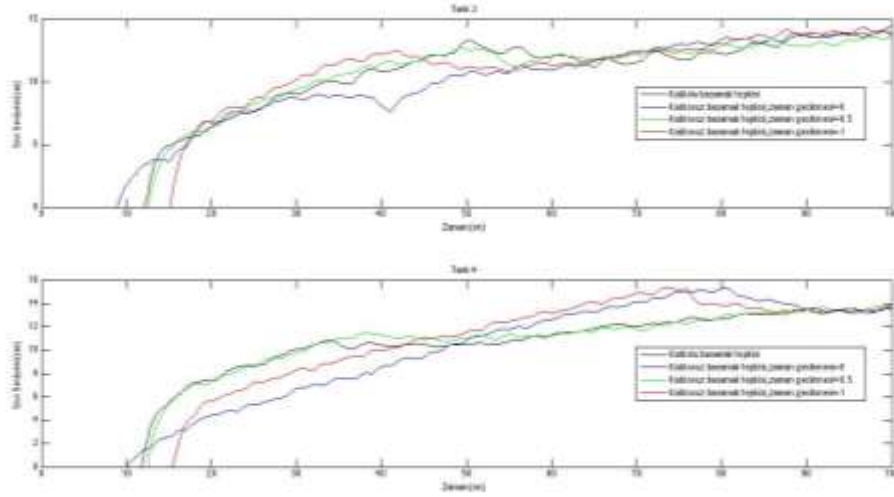


Şekil 4.14. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=0.5 sn



Şekil 4.15. Minimum fazlı olmayan kablosuz basamak tepkisi, Zaman gecikmesi=1 sn

Minimum fazlı olmayan durum için tüm durumlarda birim basamak tepkisinin ilk 100 saniyesi çizdirilerek Şekil 4.16' da verilmiştir, ölçüm ve simülasyon grafikleri üzerinde yükselme zamanı, oturma zamanı, tepe zamanı, maksimum taşma analiz edilerek Çizelge 4.2. elde edilmiştir. Sistemde zaman gecikmesinin 0 sn olarak hesaplandığı durumda gerçek sistem tepkisi simülasyon tepkisine en yakındır. Bunun yanında minimum fazlı olmayan sistemde simülasyonlarda elde edilen az miktarda taşma gerçek sistemde gözlenmemiştir.



Şekil 4.16. Minimum fazlı olmayan basamak tepkisi

Çizelge 4.2. Minimum fazlı olmayan sistem basamak tepkisi parametreleri

Kablolü, Zaman Gecikmesi=0 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	108	84.3	145	98.2	-	141	-	1.05
TANK 4	117	83	155	96	-	141	-	5.1
Kablosuz, Zaman Gecikmesi=0 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	84	109	220	240	-	141	-	4.75
TANK 4	73	84	195	235	-	140	-	5.06

Çizelge 4.2 (devamı)

Kablosuz, Zaman Gecikmesi=0.5 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	112	85.5	180	235	-	141	-	4.56
TANK 4	120	85	98	186	-	141	-	5.01
Kablosuz, Zaman Gecikmesi=1 sn	t_r (sn)		t_s (sn)		t_p (sn)		Maksimum taşma %	
	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.	Ölçüm	Sim.
TANK 2	109	87	165	240	-	141	-	4.38
TANK 4	66	86	180	230	-	141	-	4.98

Çizelge 4.2. Minimum fazlı olmayan sistem basamak tepkisi parametreleri

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde gerçek sonuçların minimum fazlı olmayan sistemde minimum fazlı olan sisteme göre simülasyon sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni minimum fazlı sistemin minimum fazlı olmayan sistemden daha hızlı bir sistem olması ve gerçek zamanlı kablosuz veri iletim hızının minimum fazlı sistem hızına yeterli gelmemesidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dörtlü tank sisteminin merkezi olmayan PID denetleyici ile IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden kablosuz ağ tabanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan algılayıcı ölçümlerinin uzak mesafelerden alındığı, sistem ve denetleyicinin aynı yerde oldukları sistemlerin bir örneğini temsil etmektedir.

PID denetleyici tasarımı [7]' de giriş/çıkış gecikmesine sahip MIMO sistemler için önerilen merkezi olmayan PID denetleyici tasarım yönteminin ağ tabanlı kontrol için uyarlanmasıyla yapılmıştır. Buna göre ağdan kaynaklı zaman seğirmeleri ağa eklenen tamponlar nedeniyle sabit kabul edilip, çıkış gecikmesi olarak kabul edilmiştir. Ayrıca ağdan kaynaklı gecikmelerin örnekleme periyodundan küçük oldukları kabul edilmiştir.

Bu tez çalışması ile önerilen merkezi olmayan PID denetleyicilerin, IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden, ağ tabanlı kontrol sistemlerindeki performansı deneysel olarak gösterilmiştir. Önerilen tasarım metodu, mevcut kontrol döngülerindeki PID denetleyicilerin, ağ tabanlı sistemlerde zaman seğirmeleri ve paket kayıpları karşısında daha güvenli ve gürbüz bir kontrol elde etmek için yeniden ayarlanmalarında kullanılabilir.

İleride yapılacak çalışmalarda ağ gecikmelerinin örnekleme periyodundan daha büyük kabul edildiği sistemler üzerinde, önerilen merkezi olmayan PID denetleyicinin performansı değerlendirilecektir. Ayrıca bu denetleyici dörtlü tank sisteminden daha hızlı dinamiklere sahip bir sistemde daha yüksek bir örnekleme zamanı ile de test edilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Wei Zhang, Michael S. Branicky and Stephen M. Phillips, “Stability of Networked Control Systems,” IEEE Control System Magazine : 84-99, (2001).
- [2] Gupta, R.A., Mo-Yuen, C., “Networked Control System: Overview and Research Trends”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(7): 2527-2535, (2010).
- [3] Petersen, S., Myhre, B., Doyle, P., Mikkelsen, E., Carlsen, S., Sjong, D., Skavhaug, A., Van Der Linden, J.H., Sansom, M. “A survey of wireless technology for the oil and gas industry”, Society of Petroleum Engineers - Intelligent Energy Conference and Exhibition: Intelligent Energy 2: 826-835 (2008).
- [4] Paavola, M., “Wireless technologies in process automation - a review and an application example” Tech. rep., University of Oulu, Control Engineering Laboratory (2007).
- [5] Desborough, L., Miller, R., “Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell’s experience,” in Sixth International Conference on Chemical Process Control, AIChE Symposium Series Number 326 (Volume 98), (2002).
- [6] Johansson, K.H., “The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero”, Control Systems Technology, IEEE Transactions on , 8(3):456-465, (2000).
- [7] Mete, A. N., Gundes, A. N., Özbay, H., “Decoupled PID Controller Synthesis for MIMO Plants with I/O Delays”, IEEE Conference on Decision and Control, 45:852-857, (2006).
- [8] Yu, H., Tan, W., “Partially decentralized control for a quadruple tank process”, Chinese Control and Decision Conference, art. no.6561319:2294-2299, (2013).
- [9] Muthukumar, N., Gomathi, V., Ramkumar, K., Balasubramanian, G., “Prediction based optimal control of a quadruple tank process”, Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, art. no. 6529033:685-690, (2013).

- [10] Saeed, Q., Uddin, V., Katebi, R., “MIMO predictive PID control: A practical approach for quadruple tank”, *Journal of Circuits, Systems and Computers* 22(3) , art. no. 1350009, (2013).
- [11] Grebeck, M., “A comparison of controllers for the quadruple tank system”, *Internal report, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 30s., (1998).*
- [12] Siljak, D., Vukcevic, M. B., “Decentralization, stabilization, and estimation of large-scale linear systems”, *IEEE Trans. Autom. Control* 21: 363-366, 1976.
- [13] Gupta, R. and Chow M., “Networked control system: Overview and research trends,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* 57(7): 2527-2535, (2010).
- [14] Tipsuwan, Y. and Chow, M., “Control methodologies in networked control systems,” *Control Eng. Practice* 11(10): 1099-1111, (2003).
- [15] Yang, T., “Networked control system: A brief survey,” *IET Control Theory Appl.* 153(4): 403-412, (2006).
- [16] Hespanha, J., Naghshtabrizi, P., and Xu, Y., “A survey of recent results in networked control systems,” *Proc. IEEE* 95(1): 138–162, (2007).
- [17] Shi, Y., Yu, B., ‘Robust mixed H_2/H_∞ control of networked control systems with random time delays in both forward and backward communication links.’ , *Automatica* 47: 754-760, (2011).
- [18] Zhang, W.A., Yu, L., ‘Modelling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout’ , *Automatica* , 44: 3206-3210, (2008).
- [19] Demirel, B., Zou, Z., Soldati, P., and Johansson, M., “ Modular design of jointly optimal controllers and forwarding policies for wireless control”, *IEEE Transactions on Automatic Control* 59(12): 3252-3265, (2014).
- [20] Demirel, B., Zou, Z., Soldati, P., and Johansson, M., “ Modular co-design of controllers and transmission schedules in WirelessHART”, In *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 5951-5958, (2011).

- [21] Navarro, A.F., “Security analysis of a wireless quadruple tank control system”, KTH Electrical Engineering, Master’s Degree Project, 106 s., (2011).
- [22] Hägglund, T., Åström, K.J., “Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control”, *Journal of Process Control*, 14(6): 635–650, (2004).
- [23] Ziegler, J.G., Nichols, N.B., “Optimum settings for automatic controllers”, *Trans. ASME*, 64:759–768, (1942).
- [24] Åström, K.J., Hägglund, T., ‘PID Controllers: Theory, Design, and Tuning’ , 2nd Ed. Research Triangle Park, NC: The Instrument, Systems, and Automation Society, (1995).
- [25] Gundes, A. N., Mete, A. N., Palazoglu, A. N., ‘Reliable Decentralized PID Controller Synthesis for Two-Channel MIMO Processes’, *Automatica*, 45:353-363, (2009).
- [26] Dang, X., Zhang, Q., “Stability and PID control for networked control system”, *World Congress on Intelligent Control and Automation*, 921-926, (2010).
- [27] Ou, L., Shao, Q., Chen, J., Su, Y., Yu, L., “Decentralized PID controller design for the cooperative control of networked multi-agent systems”, *International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision (ICARCV)*, 554-559, (2012).
- [28] Teng, L., Wen, P., “Networked PID control system modeling and simulation using Markov Chain”, *IEEE International Conference on Integration Technology (ICIT '07.)*, 83-86, (2007).
- [29] Pohjola, M., Eriksson, L., Koivo, H., “Tuning of PID Controllers for Networked Control Systems”, *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (IECON)*, 4650-4655, (2006).
- [30] Eriksson, L., Koivo, H.N., “Tuning of Discrete-Time PID Controllers in Sensor Network based Control Systems”, in *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2005)*, Espoo, Finland, 6 s., (2005).

- [31] Hao, J., He, H., Du, L., and Du, X., “A new PID controller for nonlinear networked control systems with stochastic time delays”, *Intell. Comp. Tech. and Automation (ICICTA)*: 467-470, (2012).
- [32] Zhang, H., Shi, Y., and Mehr, A. S., “Robust static output feedback control and remote PID design for networked motor systems”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 58(12): 5396-5405, (2011).
- [33] Zhang, H., Shi, Y., and Mehr, A. S., “Robust H_{∞} PID control for multivariable networked control systems with disturbance/noise attenuation”, *J. Robust and Nonlinear Control*, 22(2): 183-204, (2012).
- [34] Danielson, C.F.M., Vanfretti, L., Almas, M.S., Choompoobutrgool, Y., Gjerde, J.O., “Analysis of communication network challenges for synchrophasor-based wide-area applications”, *Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP)*: 1-13 (2013).
- [35] Dong-Sung, K., Young S. L., Wook H. K., Hong S. P., “Maximum allowable delay bounds of networked control systems”, *Control Engineering Practice*, 11(11):1301-1313, (2003).
- [36] Luck, R., and Ray A., “An observer-based compensator for distributed delays”, *Automatica*, 26(5): 903–908, (1990).
- [37] Sandberg, H., Amin, S., and Johansson, K. H., “Cyberphysical Security in Network Control Systems”, *IEEE Control Systems Magazine*, 35(1): 20-23, (2015).
- [38] Mazumder, S. K., *Wireless Networking Based Control*, Springer, (2011).
- [39] Xbee/XBee Pro Zigbee RF Modülleri Xbee2, XbeePro2, ProS2B Kullanım Kılavuzu, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_W.pdf
- [40] Chvostek T., Kratky A., “Simulation Of Network Using Truetime Toolbox”, *Institute of Control and Industrial Informatics., Slovak Republic.*

- [41] Jayaprakash J., SenthilRajan T., Harish Babu T., “Analysis of Modelling Methods of Quadruple Tank System”, *IJAREEIE*, 3(8):11552-11565, (2014).
- [42] Feedback Inc 33041 Veri Föyü, http://www.feedback-instruments.com/pdf/brochures/33-041_Datasheet_CoupledTanksSystem_MATLAB_10_2013.pdf



EKLER

Ek-1 Gönderici Xbee takılan Arduino Unoya Gömülen Program Kodu

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
SoftwareSerial mySerial(0, 1); // RX, TX
```

```
void setup ( )
```

```
{  
  Serial.begin(9600);
```

```
}
```

```
void loop ( )
```

```
{  
  int sensorValue = analogRead(A0);  
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);  
  int sensorValue1 = analogRead(A1);  
  float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);  
  Serial.print(voltage);  
  Serial.println(voltage1);  
  delay(2000);  
}
```

Ek-2 Alıcı Xbee takılan Arduino Megaya Gömülen Program Kodu

```
char inputBuffer[32]; // For incoming serial data

void setup ( )
{
  Serial.begin(9600); // Opens serial port, sets data rate to 9600 bit/s.
}
void loop ( )
{
  if (Serial.available() > 0) {
    Serial.readBytes(inputBuffer, Serial.available());
    delay(1000);
    float a=inputBuffer[0]-48;
    float b=inputBuffer[2]-48;
    float c=inputBuffer[3]-48;
    float d=a+b/10.0+c/100.0;
    float e=inputBuffer[4]-48;
    float f=inputBuffer[6]-48;
    float g=inputBuffer[7]-48;
    float h=e+f/10.0+g/100.0;
    int t2=d*255.0/5.0;
    int t4=h*255.0/5.0;
    analogWrite(2, t2);
    analogWrite(3, t4);
  }
  delay(1000);
}
```

Ek-3 MATLAB Kodu

```
% bu m-file tank parametrelerini tanımlar,  
% doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonunu elde eder,  
% bu transfer fonksiyonu için ayrıştırıcı tasarlar,  
% ayrıştırıcı tasarlanmış sisteme zaman gecikmesi ekler,  
% ayrıştırılmış zaman gecikmeli sistem için [7] 'deki yöntemle pid  
% denetleyici tasarlar.  
  
clc  
clear all  
  
%% parametrelerin tanımlanması  
% gama1 MVA valfinin pozisyonu (0-1)  
% gama2 MVD valfinin pozisyonu (0-1)  
% minimum fazlı sistem için gama1=gama2=0.7  
% minimum fazlı olmayan sistem için gama1=gama2=0.3  
  
gama1=0.3; %MVA valfinin pozisyonu (0-1)  
gama2=0.3; %MVD valfinin pozisyonu (0-1)  
n1=7; %P1 pompasının akış voltaj oranı  $cm^3/Vs$   
n2=7; %P2 pompasının akış voltaj oranı  $cm^3/Vs$   
kc=1; %ölçüm sabiti  
a1=0.50265; %T1 tankının çıkış pipetinin taban alanı  $cm^2$   
a2=0.50265; %T2 tankının çıkış pipetinin taban alanı  $cm^2$   
a3=0.50265; %T3 tankının çıkış pipetinin taban alanı  $cm^2$   
a4=0.50265; %T4 tankının çıkış pipetinin taban alanı  $cm^2$   
A1=138.9; %T1 tankının taban alanı  $cm^2$   
A2=138.9; %T2 tankının taban alanı  $cm^2$   
A3=138.9; %T3 tankının taban alanı  $cm^2$   
A4=138.9; %T4 tankının taban alanı  $cm^2$   
g=981; %yer çekimi sabiti  $cm/s^2$   
%%
```


%% çalışma noktalarının bulunması

h20=16; %Tank 2 için bir çalışma noktası tanımlama

h40=16; %Tank 4 için bir çalışma noktası tanımlama

%%sabitleri hesaplama

p1=a1*sqrt(2*g); p2=(1-gama2)*n2; p3=a2*sqrt(2*g); p4=a1*sqrt(2*g);

p5=gama1*n1;

p6=a3*sqrt(2*g); p7=(1-gama1)*n1; p8=a4*sqrt(2*g); p9=a3*sqrt(2*g);

p10=gama2*n2;

Ac=[p4 p5*p6/p7; p10*p1/p2 p9];

Bc=[p3*sqrt(h20); p8*sqrt(h40)];

Cc=inv(Ac)*Bc;

h10=Cc(1)^2; %Tank 1 için çalışma noktası hesaplama

h30=Cc(2)^2; %Tank 3 için çalışma noktası hesaplama

u20=p1*Cc(1)/p2; %Pompa 1 için çalışma noktası hesaplama

u10=p6*Cc(2)/p7; %Pompa 1 için çalışma noktası hesaplama

op=[h10 h20 h30 h40 u10 u20]; %çalışma noktası vektörü oluşturma

disp('operating point is [h1 h2 h3 h4 u1 u2]=')

disp(op)

%% doğrusallaştırılmış modelin elde edilmesi

T1=A1*sqrt(2*h10/g)/a1; %T1 tankının zaman sabiti s

T2=A2*sqrt(2*h20/g)/a2; %T2 tankının zaman sabiti s

T3=A3*sqrt(2*h30/g)/a3; %T3 tankının zaman sabiti s

T4=A4*sqrt(2*h40/g)/a4; %T4 tankının zaman sabiti s

A=[-1/T1 0 0 0; A1/(A2*T1) -1/T2 0 0; 0 0 -1/T3 0; 0 0 A3/(A4*T3) -1/T4];

$B=[0 \ (1-gama2)*n2/A1; \ gama1*n1/A2 \ 0;(1-gama1)*n1/A3 \ 0;0 \ gama2*n2/A4];$

$C=[0 \ kc \ 0 \ 0;0 \ 0 \ 0 \ kc];$

$D=zeros(2,2);$

$qtank=ss(A,B,C,D)$ %dörtlü tank sistemi durum uzay modeli oluşturulması

$s=tf('s');$

%% dörtlü tank sistemi transfer fonksiyonu oluşturulması

$G1=minreal(C*inv(s*eye(4)-A)*B+D)$

$tzero(qtank)$

$Dc=inv(evalfr(G1,0));$ %sisteme ayrıştırıcı tasarlanması

$G=minreal(G1*Dc);$ %ayrıştırılmış sistem transfer fonksiyonunun hesaplanması

%% Sistemin zaman gecikmelerinin oluşturulması

$[n1 \ d1]=pade(0,2);$

$del1=tf(n1,d1);$ %Tank 2 algılayıcı verisi gecikmesi

$[n2 \ d2]=pade(0,2);$

$del2=tf(n2,d2);$ %Tank 4 algılayıcı verisi gecikmesi

%%%

%% Gecikmeli sistemin oluşturulması

$P1=G(1,1); P12=G(1,2); P2=G(2,2); P21=G(2,1);$

$P1hat=P1*del1; P12hat=P12*del2; P21hat=P21*del1; P2hat=P2*del2;$

%% Denetleyici tasarımı

%% Denetleyici 2 tasarımı

$Kphat2=53;$

$Kdhat2=0;$

$td2=1/10;$

%%

$$C2hat = Kphat2 + Kdhat2 * tf([1 \ 0], [td2 \ 1]) + inv(evalfr(P2, 0)) * tf([0 \ 1], [1 \ 0]);$$

$$F2 = tf([1 \ 0], [0 \ 1]) * P2 * del2 * C2hat - 1;$$

$$F2j = \minreal(F2 * tf([0 \ 1], [1 \ 0]));$$

$$maxbeta2 = inv(norm(F2j, inf))$$

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%beta2 tepe değeri%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

$$beta2 = maxbeta2;$$

C2 = beta2 * C2hat %Denetleyici hesaplanması

%%

$$V = \minreal(C2 * inv(1 + P2hat * C2));$$

$$W2 = \minreal(P1hat - P12hat * V * P21hat);$$

%%%Denetleyici 1 tasarımı

$$Kphat1 = 53;$$

$$Kdhat1 = 0;$$

$$td1 = 1/10;$$

$$C1hat = Kphat1 + Kdhat1 * tf([1 \ 0], [td1 \ 1]) + inv(evalfr(W2, 0)) * tf([0 \ 1], [1 \ 0]);$$

%%%norm hesaplamaları%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

$$F1 = tf([1 \ 0], [0 \ 1]) * W2 * C1hat - 1;$$

$$F1j = \minreal(F1 * tf([0 \ 1], [1 \ 0]));$$

$$fet1 = inv(norm(F1j, inf));$$

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%beta1 tepe değeri%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

$$beta1 = fet1;$$

C1 = C1hat * beta1 %Denetleyici 1 hesaplanması

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Ayşenur EMRULLAH

Doğum Tarihi: 01/09/1989

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Ayten Kemal Akınal Anadolu Lisesi	2003-2007
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Gaziantep Üniversitesi	2007-2012
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Mersin Üniversitesi	2012-

Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2013-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1.