

**AĐ TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL
İLE DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN DENETİMİ**

EMRE ÖZER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
TEMMUZ – 2016**

AĐ TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL İLE DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN DENETİMİ

EMRE ÖZER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

**MERSİN
TEMMUZ – 2016**

Emre ÖZER tarafından Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE danışmanlığında hazırlanan “AĞ TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL İLE DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN DENETİMİ ” 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. Kemal BALIKÇI

.....

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ayla ÇELİK
Enstitü Müdürü

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

AĞ TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL İLE DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN DENETİMİ

Emre ÖZER

ÖZ

Bilgisayar ve haberleşme alanındaki hızlı gelişmelerle birlikte ağ bağlantılı kontrol sistemlerine olan ilgi de giderek artmaktadır. Esnekliği, maliyeti azaltması, karmaşık uygulamalarda çözüm üretmesi, uzaktan müdahale ve kontrol gibi önemli yönleriyle bu sistemler üzerine birçok araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada ileri kontrol tekniklerinden bir tanesi olan Model Öngörülü Kontrol'ün (Model Predictive Control - MPC) ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde ne derece etkili olabileceği araştırılmıştır. Bu çalışmada çok girişli-çok çıkışlı sistemlerin kontrolünde karşılaşılan birçok problemin incelenmesi için geliştirilmiş bir sistem olan dörtlü tank sistemi kullanılmıştır. Dörtlü tank sistemindeki sıvı seviyesi kontrolü IEEE 802.15.4 protokolüyle kablosuz ağ üzerinden Model Öngörülü Kontrolör tarafından sağlanmıştır. Kablosuz ağdan kaynaklanan paket kayıpları ve zaman gecikmeleri gibi kısıtlamaların kontrolör performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu tezdeki benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağ Bağlantılı Kontrol Sistemi, Model Öngörülü Kontrol (MPC), Dörtlü Tank Sistemi, IEEE 802.15.4

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

NETWORKED BASED MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A QUADRUPLE TANK PROCESS

EMRE ÖZER

ABSTRACT

Interest in the networked control systems is increasing with the rapid developments in the computer and telecommunications fields. A significant amount of research has been carried out on important aspects of these systems such as flexibility, cost reduction, remote operations and control. In this thesis, performance of Model Predictive Control (MPC) in a networked control setting is investigated experimentally. Experimental setup used in this work is a quadruple tank system which is developed for examining difficulties of controlling multi-input-multi-output (MIMO) systems. Water levels of the lower two tanks are controlled by a networked MPC controller where level measurement are sent over a wireless network based on the IEEE 802.15.4 protocol. MPC controller performance is evaluated under the restrictions such as network induced time delays and packet drops. System simulations are performed by using MATLAB / Simulink program.

Keywords: Networked Control Systems, Model Predictive Control (MPC), The Quadruple Tank System, IEEE 802.15.4

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

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde ve gerçekleştirilmesinde değerli zamanını ayıran, karşılaştığım sorunlarda yaklaşımıyla bakış açımı genişleten değerli danışman hocam Ahmet Naci METE 'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bu güne kadar her zaman beni destekleyen ve maddi, manevi her konuda yanımda olan fedakâr aileme, babam İlyas ÖZER, annem Asiye ÖZER ve kardeşim Remzi ÖZER' e teşekkür ederim. Bu süreçte sabırla yanımda olan sevgili eşime de teşekkür ederim.

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince BAP-FBE EEMB (EÖ) 2014-2 YL Proje Numarası ile desteklenmiştir.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
EKLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM	9
3.1. KONTROL SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ.....	9
3.1.1. Model Öngörülü Kontrol	9
3.1.2. Ağ Bağlantılı Kontrol.....	11
3.1.3. Dörtlü Tank Sistemi	16
3.2. AĞ BAĞLANTISININ BİLEŞENLERİ	17
3.2.1. Kablosuz İletişim Protokolleri	17
3.2.2. Ağ Bağlantısının Gerçeklenmesi	19
3.2.3. TrueTime Araç Kutusu	23
3.3. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	24
3.3.1. Dörtlü Tank Sisteminin Matematiksel Modelinin Oluşturulması.....	24

3.3.2. Gerçek Sistem Modeli.....	27
3.3.3. Minimum Fazlı Durum Matematiksel Modeli	29
3.3.4. Minimum Fazlı Olmayan Durum Matematiksel Modeli	30
3.3.5. Gerçek Sistem Kalibrasyon ve Valf Pozisyonu Ayarı	32
3.4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖR TASARIMI	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	37
4.1. TASARLANAN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖRÜN AĞ BAĞLANTILI SİMULASYONU	37
4.2. MİNİMUM FAZLI SİSTEMİN MPC İLE KONTROLÜ	42
4.3. MİNİMUM FAZLI OLMAYAN SİSTEMİN MPC İLE KONTROLÜ ..	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR	68
EKLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Zigbee/Bluetooth/Wi-fi ait özelliklerin karşılaştırılması	19
Çizelge 3.2. Sistem parametreleri	27
Çizelge 3.3. Minimum fazlı sistem için çalışma noktası değerleri	29
Çizelge 3.4. Minimum fazlı olmayan sistem için çalışma noktası değerleri ..	32
Çizelge 3.5. Minimum fazlı durum MPC MATLAB parametreleri	36
Çizelge 3.6. Minimum fazlı olmayan durum MPC MATLAB parametreleri.	36
Çizelge 4.1. Minimum fazlı durum basamak tepkisi parametreleri (GS: gerçek sistem, ZGS: zaman gecikmeli sistem)	54
Çizelge 4.2. Minimum fazlı durum integral mutlak hata (IAE) değerleri	54
Çizelge 4.3. Minimum fazlı olmayan durum basamak tepkisi parametreleri (GS: gerçek sistem, ZGS: zaman gecikmeli sistem)	65
Çizelge 4.4. Minimum fazlı olmayan durum integral mutlak hata (IAE) analizi	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. MPC stratejisi	10
Şekil 3.2. MPC'nin temel mimarisi.....	11
Şekil 3.3. Genel ağ bağlantılı kontrol mimarisi	12
Şekil 3.4. Tek kanallı geri beslemeli ağ bağlantılı çeşitli kontrol mimarileri .	13
Şekil 3.5. Zaman gecikmeleri ile kontrol sistemi	15
Şekil 3.6. Dörtlü tank sistemi şeması	16
Şekil 3.7. γ_1 ve γ_2 değerine göre sistemin durumu.....	17
Şekil 3.8. Verinin iletimi için tasarlanan sistem şeması.....	19
Şekil 3.9. Kullanılan Xbee modülü	20
Şekil 3.10. Kullanılan RP-SMA yarım dalga anten	20
Şekil 3.11. Kablosuz bağlantı şeması.....	21
Şekil 3.12. Kablosuz bağlantı verici tarafı	22
Şekil 3.13. Kablosuz bağlantı alıcı tarafı	22
Şekil 3.14. Truetime blok kütüphanesi	24
Şekil 3.15. Dörtlü tank sistemi.....	25
Şekil 3.16. Feedback Inc. firmasının 33-041 kodlu deney seti	28
Şekil 3.17. Model hatası.....	31
Şekil 3.18. Sıvı seviyelerinin gözlenmesi için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası.....	33
Şekil 3.19. Gama ayarının belirlenmesi için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası.....	34
Şekil 3.20. Sistem simülasyonu için oluşturulan MATLAB/Simulink dosyası	35
Şekil 4.1. TrueTime ile sistemin ağ bağlantısı için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası	38
Şekil 4.2. Minimum fazlı sistemin %10 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu	39
Şekil 4.3. Minimum fazlı sistemin %30 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu	40
Şekil 4.4. Minimum fazlı olmayan sistemin %10 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu	41
Şekil 4.5. Minimum fazlı olmayan sistemin % 30 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu	42
Şekil 4.6. Sistemin kontrolü için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası	43
Şekil 4.7. Minimum fazlı durumun MPC ile denetimi	44

Şekil 4.8. Minimum fazlı durumun MPC ile denetimi ölçeklendirilmiş sonuçlar	45
Şekil 4.9. Minimum fazlı durum gerçek sistem ile 0.5 saniye gecikmeli sistem cevabı	46
Şekil 4.10. Minimum fazlı durum 0.5 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem	47
Şekil 4.11. Minimum fazlı durum 0.5 saniye gecikmeli sistem.....	48
Şekil 4.12. Minimum fazlı durum 1 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem ...	49
Şekil 4.13. Minimum fazlı durum 1 saniye gecikmeli sistem.....	50
Şekil 4.14. Minimum fazlı durum 2 saniye gecikmeli sistem.....	51
Şekil 4.15. Minimum fazlı durum üç zaman gecikmesinin karşılaştırılması ..	53
Şekil 4.16. Minimum fazlı olmayan durumun MPC ile denetimi.....	57
Şekil 4.17. Minimum fazlı olmayan 0.5 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem	57
Şekil 4.18. Minimum fazlı olmayan 0.5 saniye gecikmeli sistem	58
Şekil 4.19. Minimum fazlı olmayan durum 1 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem	59
Şekil 4.20. Minimum fazlı olmayan durum 1 saniye gecikmeli sistem	60
Şekil 4.21. Minimum fazlı olmayan, 2 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem	61
Şekil 4.22. Minimum fazlı olmayan, 2 saniye gecikmeli sistem	62
Şekil 4.23. Minimum fazlı olmayan durum üç zaman gecikmesinin karşılaştırılması	64

EKLER DİZİNİ

Sayfa

Ek- 1. MATLAB kodu	73
Ek- 2. Verici arduino üzerindeki program kodu	76
Ek- 3. Alıcı arduino üzerindeki program kodu	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

Sembol	Anlamı	Birimi
t	Zaman	sn
$u(t)$	giriş sinyali	V
T1	Tank 1	
T2	Tank 2	
T3	Tank 3	
T4	Tank 4	
P1	Pompa 1	
P2	Pompa 2	
v_1	Pompa 1'in voltajı	V
v_2	Pompa 2'nin voltajı	V
y_1	Tank 2 deki sıvı seviyesi	cm
y_2	Tank 4 deki sıvı seviyesi	cm
γ_1	Pompa 1 den Tank 2 ye sıvı akışı sağlayan valf pozisyonu (0-1 aralığında)	
γ_2	Pompa 2 den Tank 4 ye sıvı akışı sağlayan valf pozisyonu (0-1 aralığında)	
g	yerçekimi ivmesi	cm/s ²
A_1	Tank1 in enine kesit alanı	cm ²
A_2	Tank2 nin enine kesit alanı	cm ²
A_3	Tank3 ün enine kesit alanı	cm ²
A_4	Tank4 ün enine kesit alanı	cm ²
a_1	Tank 1 in çıkış pipetinin taban alanı	cm ²
a_2	Tank 2 nin çıkış pipetinin taban alanı	cm ²

a_3	Tank 3 ün çıkış pipetinin taban alanı	cm^2
a_4	Tank 4 ün çıkış pipetinin taban alanı	cm^2
h_1^0	1.Tank'ın durağan durumda sıvı yüksekliği	cm
h_2^0	2.Tank'ın durağan durumda sıvı yüksekliği	cm
h_3^0	3.Tank'ın durağan durumda sıvı yüksekliği	cm
h_4^0	4.Tank'ın durağan durumda sıvı yüksekliği	cm
u_1^0	1.Pompanın durağan durumda voltajı	V
u_2^0	2.Pompanın durağan durumda voltajı	V
n_1	1.Pompanın volt x saniye'de akış miktarı	cm^3/Vs
n_2	2.Pompanın volt x saniye'de akış miktarı	cm^3/Vs
k_c	Ölçüm sabiti	V/cm^2
t_r	Yükselme Zamanı	sn
t_p	Tepe Zamanı	sn
h_{smmin}	Oturma zamanı en küçük değeri	cm
h_{smak}	Oturma zamanı en büyük değeri	cm
MAC	Ortam Erişim Kontrolü	
MPC	Model Öngörülü Kontrol	
MBPC	Modele Dayalı Öngörülü Kontrol	
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü	
IAE	İntegral Mutlak Hata	
MIMO	Çok giriş çok çıkış	
SISO	Tek giriş tek çıkış	
PAN	Kişisel Ağ Bağlantısı	
LAN	Yerel Ağ bağlantısı	

MAN	Yerleşke Ağ Bağlantısı
WAN	Geniş Ağ Bağlantısı
CAN	Kontrol Alan Ağı
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
PSUPA	Güç Kaynağı Güç amplifikatörü



1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim bugün hayatımızın her alanında karşılaştığımız bir olgudur. Cep telefonlarımızla iletişimde ve kişisel bilgisayarlarımızla bu özelliği sıklıkla kullanırız. Bu teknolojinin evlerimiz ve ofislerimizde kullanımın yanı sıra özellikle endüstrideki büyük ölçekli kontrol uygulamalarında kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. Kablolama maliyetlerinin azaltılması, uzaktan müdahale etme imkânı sağlaması, fiziksel tasarımlarda karşılaşılan zorluklara sistemin esnek yapıda olması sayesinde daha kolay çözüm bulunması, kabloların aşınma ve yırtılma durumlarına bağlı olarak gelişen hataların azaltılması ve hızlı müdahale etme imkânı vermesi kablosuz bağlantının başlıca avantajlarıdır. Kablosuz iletişim özellikle dağıtık kontrol sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Kablosuz ağlarla yapılan uygulamalar izleme ve takip olmak üzere temelde iki şekildedir. Bunlara örnek olarak bir habitat izlemesi, nesli tükenme tehlikesi yaşayan bir hayvan türünün izlemesi, trafik takip uygulamaları olabileceği gibi hasta takibi, kimyasal bir sürecin takibi, çevresel değişimlerin takip edilmesi (hava sıcaklığı, hava durumu) uygulamaları da verilebilir. Örnekleri çoğaltacak olursak akıllı şebekeler, güç sistemleri, insansız hava araçları, robotik, uzaktan kontrol alanlarında ağ bağlantılı kontrolün uygulandığı görülmektedir [1]. Geniş ölçekli bir sulama ağının oluşturulması [2] (geniş ölçekten kasıt bir şehir ya da birkaç şehir büyüklüğünde bir alan), otomobil süspansiyon sistemleri [3], akıllı şebekelerin izlenmesi [4], güç sistemlerinin kontrolü ve iletişimi [5], tren kontrol sistemlerindeki [6] uygulamalar örnek olarak verilebilir.

Ağ bağlantısının birçok avantajının yanında eksik kalan yönleri de bulunmaktadır. Bu alanda ağ güvenliği, enerji verimliliği, mimari, heterojenlik, veri toplanması ve iletimi, MAC katman sorunları, senkronizasyon, gerçek zamanlı operasyon, verinin anlamlandırılması, sınırlı bellek ve depolama alanı araştırma konuları ve zorlukları olarak sıralanabilirler. Kapalı çevrim bir kontrol sistemindeki geri beslemeyi kablosuz ağ bağlantısı ile gerçekleştirmeye çalıştığımızda bazı faktörleri göz önünde bulundurmamız kaçınılmazdır. Bunlar: paket kayıpları, ağ kaynaklı değişken zaman gecikmesi, analog sinyal şeklindeki verinin dijitale dönüştürülmesi sürecinde yaşanan hatalar gibi sistem performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Paket, sistemden elde edilen ölçüm bilgilerini içeren dizidir. Paket

kayıpları, ya sensörün veriyi okuyamaması ya da okunan verinin eyleyiciye ulaşamaması şeklinde olabilir. Paket kayıplarının sistemin etkili bir şekilde kontrol edilmesini zorlaştıracığı açıktır. Bu yüzden ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde paket kayıplarının en aza indirilmesini sağlayacak önlemler alınmalıdır. Paket kaybının en aza indirilmesi için örnekleme zamanının seçimi önemlidir. Örnekleme zamanı, sisteme ait ölçüm bilgilerinin alınma aralığını belirler. Bu zaman aralığının geniş tutulması daha az veri alınması anlamına gelir. Bu durumda kısıtlı sistem verisi ile kontrol eyleminin gerçekleştirilmesi gerekir. Zaman aralığının dar olması ise çok fazla veri alınmasına ve dolayısıyla ağ tarafından gönderilmesi gereken paket sayısının artmasına neden olur. Artan ağ trafiği, paket kayıplarında da artış meydana getirmektedir.

Ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde ağdan kaynaklanan problemlerden bir diğeri ise değişken zaman gecikmesidir. Klasik kontrol sistemlerinde ölçüm sinyalinin alınması ve alınan bu sinyale karşılık kontrol sisteminin cevabı arasında bir zaman farklılığı yaşanmadığı veya sabit bir zaman gecikmesinin olduğu varsayımı ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde geçerli olmamaktadır. Ağ tabanlı değişken zaman gecikmesinin sisteme olumsuz etkisini azaltmak amacıyla bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımlardan birisi değişken zaman gecikmeleri için en geniş zamanı belirleyip o zamanı ağa ekleyip çözüm bulmak şeklindedir. Bu işlemde öncelikle birçok bilgi paketi için ölçüm verisinin alındığı zaman ile ulaştığı zaman değerlendirilerek gecikmenin en büyük değeri belirlenir ve sonrasında ağa eklenen tampon yardımıyla tüm paketler için geçerli, sabit bir gecikme oluşturulmuş olur. Bu durum haliyle performansın istenilen derecede iyileştirilememesi anlamına gelir. İkinci yaklaşım ise zaman gecikmesinin stokastik olarak modellenmesidir. Bu model sistemi daha gerçekçi yapmakla birlikte, kontrolör tasarımı daha karmaşık ve daha zor olmaktadır.

Model öngörülü kontrol, teorisi kırk yıl kadar geriye gitmesine rağmen kabul görmüş ve günümüzde endüstri uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmıştır. Sadece doğrusal sistemlerle kalmayıp doğrusal olmayan (non-linear) sistemler içinde kontrolör tasarımı güncel araştırma konularındandır. Klasik kontrolör ile karşılaştırıldığında daha yumuşak geçişlere sebep olması ve sistemin dinamiklerini zorlamaması, bir sonraki adım öngörüldüğü için sistem yanıtının daha hızlı olması

yani ölü zaman etkisini gidermesi bu kontrolörlerin tercih edilmesinde öne çıkan özelliklerdendir. Bu çalışmada MPC denetleyicinin ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde ağ tabanlı zaman gecikmesi ve paket kayıpları yaşandığı durumlar altında performansları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, ağ bağlantısının sıklıkla kullanıldığı günümüzde kontrol uygulamalarında MPC denetleyicinin kullanımının yaygınlaşmasına ve daha etkili kontrol sonuçlarının alınmasına katkı sağlayacaktır.

Dörtlü tank sistemi çok giriş çok çıkışlı (MIMO) sistemler için bir model teşkil etmektedir. Bu sayede çok giriş çok çıkışlı sistemlerin kanallar arası etkileşimi, minimum fazlı veya minimum fazlı olmama (non-minimum fazlı olma) gibi durumlardaki kontrol problemleri incelenirken dörtlü tank sisteminden faydalanılabilir. Bu çalışmada dörtlü tank sisteminin kontrolü MPC ile IEEE 802.15.4 protokolü kullanılarak kablosuz ağ üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kablosuz bağlantıda modüller noktadan noktaya iletişim mimarisıyla haberleşmektedir. Bu işlem gerçekleştirilirken iki adet Xbee modül ve iki adet Arduino işlemci kullanılmıştır. Bir Arduino ve bir Xbee modülü verici kısmı, diğer Arduino ve Xbee modülünde alıcı kısmı oluşturur. Verici kısmındaki işlemler şu şekildedir: dörtlü tank sisteminde kontrol edilen tankların sıvı seviyesi bilgisi Arduino'nun analog pinlerine aktarılır. Arduino üzerindeki çalıştırılan program analog verileri dijitale dönüştürür. Dijital ölçüm verisi Arduino'ya seri olarak bağlı olan Xbee modülü tarafından alıcı modüle gönderilir. Bu veri, alıcı kısımdaki Xbee tarafından algılanır ve Xbee modülüne seri bağlı olan Arduino tarafından PWM çıkışlarına yazılır. Daha sonra ise PWM sinyalleri alçak geçirgen filtreden geçirilir. Bu işlemler kablosuz olarak gerçekleştirildikten sonra sistemde bilgi iletimi kablolu olarak gerçekleştirilir. Alıcı kısmından sonra veri PSUPA kartı üzerinden bilgisayara ulaşır. Bilgisayarda tasarlanan MPC kontrolör vasıtasıyla kontrol işlemi gerçekleştirilir. Kablosuz bağlantıda ağdan kaynaklanan zaman gecikmelerinin örnekleme periyodundan küçük olduğu ve ağa eklenen tamponlar sayesinde sabit olduğu varsayılmıştır. Paket kayıplarının farklı yüzde oranları (yüzde on ve yüzde otuz) yaşandığı durumlar altında sistemin kontrolü sağlanmıştır.

Bu tezin katkısı, ileri kontrol tekniklerinden biri olan model öngörülü kontrolörlerin ağ bağlantılı kontrol sistemlerindeki performansının değerlendirilmesidir.

Tezi oluşturan bölümler ana hatlarıyla aşağıdaki şekildedir.

Bölüm 2’de literatürde yer alan model öngörülü kontrol ve ağ bağlantısının kullanımına dair çalışmalar taranarak kaynak araştırılması yapılmıştır. Bölüm 3’te yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği olan dörtlü tank sisteminin matematiksel olarak modellenmesi, tasarlanan kontrol sisteminin bileşenleri ve ağ bağlantısının gerçekleşmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçları Bölüm 4’te verilmiştir. Son olarak Bölüm 5’te bulgular ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control-MPC), kontrol alanında kullanılan ileri bir kontrol tekniği olarak kabul görmüş ve kullanım alanı özellikle endüstriyel alanda çeşitlenmiştir. Model öngörülü kontrolün temelleri 1960'da Kalman'ın Linear Quadratic Gaussian (LQG) kontrolör tasarımına kadar uzanır [7]. Endüstriyel uygulama alandaki ilk çalışma örnekleri 1978 yılına Richalet ve arkadaşlarına tarafından gösterilmiştir [8]. Model Predictive Heuristic Control (MPHC) ismi ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Yine bu çalışmada açık çevrim kararlı sistemler için dürtü yanıtı modeli (ing. impulse response model) kullanılmış ve birinci dereceden sistemin hesaplanan referans yörüngesi ile çıkış arasındaki hatası minimize edilmiştir.

Model öngörülü kontrolün zaman içinde gelişiminde çeşitli algoritmalar önerilmiştir. 1980'de Cutler ve Ramaker Dinamik Model Öngörülü (DMC) kontrol yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem Richalet'in kullandığı dürtü yanıtı modeli yerine basamak cevabı modelini (ing. step response model) kullanır [9]. 1987 yılında ise Clarke ve arkadaşları Genelleştirilmiş Öngörülü kontrol (GPC) yöntemini önerdiler [10]. 2000'li yıllarda MPC artık alanında kitap basılacak olgunlukta bir konu olmuştur [11].

Dörtlü tank sistemi çok giriş-çok çıkışlı (MIMO) sistem davranışlarını anlamakta kolaylık sağlayan deneysel bir düzenektir. İlk olarak 2000 yılında Johansson tarafından önerilmiş olan sistem, değiştirilebilir sıfır noktasına sahip ve sıfır noktasının durumuna göre de minimum fazlı ve minimum fazlı olmayan durumları içerir. Johansson bu çalışmada sistemin kontrolünü ayrıştırılmış PI kontrolör (ing. Decentralized PI Control) ile yapmıştır [12].

[13]'de yapılan çalışma da MPC'nin alt kollarından birisi olan IMC kontrolör ile dörtlü tank sisteminin kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Günümüze gelinceye kadar da popülerliği devam eden dörtlü tank sisteminin, hem klasik bir kontrol tekniği olan PID kontrolör ile hem de gelişmiş (gürbüz kontrol, MPC gibi) birçok kontrolörle denetimi üzerine çalışmalar yapılmıştır [12, 13-15].

Dörtlü tank sisteminin kontrolü için MPC denetleyici kabul görmüş ve üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle 2010 sonrası bilimsel yayınlar

incelediğinde popülerliğinin devam ettiği görülmektedir. Bunlarla ilgili bazı çalışmalar şu şekildedir:

Alvarado ve arkadaşları dörtlü tank sistemi için merkezi bir kontrolör ve ayrıştırıcı MPC yöntemi kullanılarak sekiz ayrı durumdaki kontrolörle sistemin denetimini sağlamaya çalışmışlardır [16].

Bir diğer çalışmada MPC denetleyici için önemli olan üç parametre: tahmin ufku, kontrol ufku, örnekleme aralıkları için emperyalist rekabetçi algoritma (ing. Imperialist Competitive Algorithm) yöntemi kullanılmıştır. Ağ bağlantısı kullanılmaksızın tasarlanan MPC sisteme uygulanmıştır [17].

[18]'deki çalışmada Dadhich ve arkadaşı dörtlü tank sistemi için PID kontrolör ve IMC-PID kontrolör uygulanan sistemin performans karşılaştırması yapmıştır.

Lagos ve arkadaşları dörtlü tank sistemine dağıtık hibrit bir MPC dizaynı ile merkezi bir MPC'nin performansının karşılaştırıldığı çalışmayı yapmışlardır [19].

Son zamanlarda dörtlü tank sistemi üzerine yapılan çalışmalarda sistemin birbiriyle etkileşen kanallar değiştirilmek suretiyle sistemin davranışı üzerine incelemelerde bulunmaktadır. Bu şekildeki çalışmalara bir örnek olarak doğrusal olmayan MPC ile dörtlü tank sisteminin kontrolü Goutan ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [20]. Burada kullanılan dörtlü tank sisteminde küçük değişiklikler mevcuttur. Bu değişiklikler üsteki her bir tankın alttaki iki tankla da etkileşim halinde olması ve pompaların doğrudan üstteki tanklara su göndermesidir. Bu durumdaki sistemin öncelikle matematiksel modeli elde edilmiş sonrasında deneysel olarak kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bir diğer çalışmada, dörtlü tank sistemini kontrolde, model öngörülü kontrol algoritması elde edilirken karşılaşılan optimizasyon problemi için Lagrange çift yöntemi (ing. Lagrange dual method) önerilmiştir [21].

Dörtlü tank problemine uygulanan bir başka optimizasyon çalışması da genelleştirilmiş Hopfield ağı (ing. generalized Hopfield network) yöntemi üzerine yapılmıştır [22].

Son olarak 2016 yılında yapılan çalışma, MPC'nin kararlı durum hatasını en aza indirmek ve model uyumsuzluğunu telafi edebilmek üzerine yapılmıştır. Bu sistemde dörtlü tank sistemi biraz değiştirilerek, alttaki tanklar (tank 1 ve tank 2)

birbiriyle bağlantılı hale getirilmiştir ve benzer şekilde üstteki tanklar da (tank 3 ve tank 4) birbiriyle bağlantılıdır. Tank 2 ve tank 4'ün alt kısmındaki çıkış boruları sayesinde su haznesinde toplanmaktadır. Bu çalışmada ağ bağlantısı kullanılmamıştır [23].

Bütün bu çalışmalardaki ortak nokta, dörtlü tank sistemine MPC'nin uygulanmış olmasıdır. Bu çalışmaların yanı sıra gelişmiş hesaplama yeteneğine sahip bilgisayarlar, sensör ve eyleyicilerin daha ucuza elde edilebilme imkânları, gelişen iletişim teknolojileri sayesinde kontrol uygulamalarının kablosuz olarak gerçekleştirilmesi fikri güçlenmiştir. Dolayısıyla kablosuz sensör ağların MPC ile uygulanması fikri üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [24]. Bu çalışmada kablosuz sensör ağların MPC kontrol uygulaması alanında ilgililenen konularla ilgili bilgi verilmiş ve güç kontrolü ile ilgili önerilen algoritmanın simülasyon sonuçları ortaya konmuştur.

Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yapay sinir ağı temelli MPC ile sistemin performansı izlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sistem dörtlü tank sistemini anımsatan birbiriyle etkileşimli ikili tank sistemidir ve kontrol ağ üzerinden Ethernet ile yapılmaktadır [25].

Ağ bağlantılı kontrol başlığında çok geniş bir alanı kapsayan birçok konu araştırılmaktadır. Bilginin kablosuz olarak iletilmesinde, ağdan kaynaklanan bazı sorunlar oluşmaktadır. Bunlar enerji, güvenlik, kullanılacak haberleşme standardı seçimi (IEEE 802.11, IEEE802.15.4 gibi) gerçek zamanlı iletişimde karşılaşılan problemler gibi birçok konuyu kapsar. Karşılaşılan sorunlar arasında paket kaybı ve değişken zaman gecikmesi öne çıkan araştırma konularındandır. Ağ bağlantılı kontrol sistemlerinin kararlılığı üzerine yapılan araştırmalar 1980'lere kadar uzanır.

Marti ve arkadaşları zaman gecikmesini gidermek amacıyla esnek bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmayla sistem çalışmadan ayarlama yapılabilirken, aynı zamanda sistem çalışırken de zaman gecikmelerini tespit edebilmekte ve zaman gecikmesinden kaynaklı performans kötüleşmesini telafi edebilmektedir [26].

Valencia ve arkadaşları dörtlü tank sistemi için hareketli bir ufuk tahmincisi ile ölçümden kaynaklı zaman gecikmelerini telafi etmeye çalışmıştır [27].

Bir başka çalışmada, paket kayıplarının yaşandığı sistemi öngörülü ağ kontrol şeması oluşturularak iyileştirme çalışması yapılmıştır [28].

Ağ bağlantılı kontrol alanında paket kayıplarının incelendiği bir diğer çalışma Wang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [29]. Sensörden alınan bilginin kontrolöre iletiminde yaşanan paket kayıpları için bir olay tetikleyici (ing. event-trigger) kullanılmıştır.

Kablosuz ağ bağlantısıyla uzaktan kontrol ve MPC denetleyicinin deneysel bir örneğini Bemporad ve Henriksson sunmuşlardır [30]. Laboratuvar ortamında oluşturulan sistemin yazılımsal ve donanımsal bileşenleri anlatılmış, kontrol işlemi için hibrit MPC tasarlanmış ve paket kaybı yaşandığı durumlarda sistemin performansı incelenmiştir.

Ağ bağlantılı MPC uygulamasına bir başka örnekte Bianchi ve arkadaşları tarafından yapılan trafik kontrol gösterilebilir [31]. İletim kanalındaki zaman gecikmeleri için tampon kullanma yöntemini izlemişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

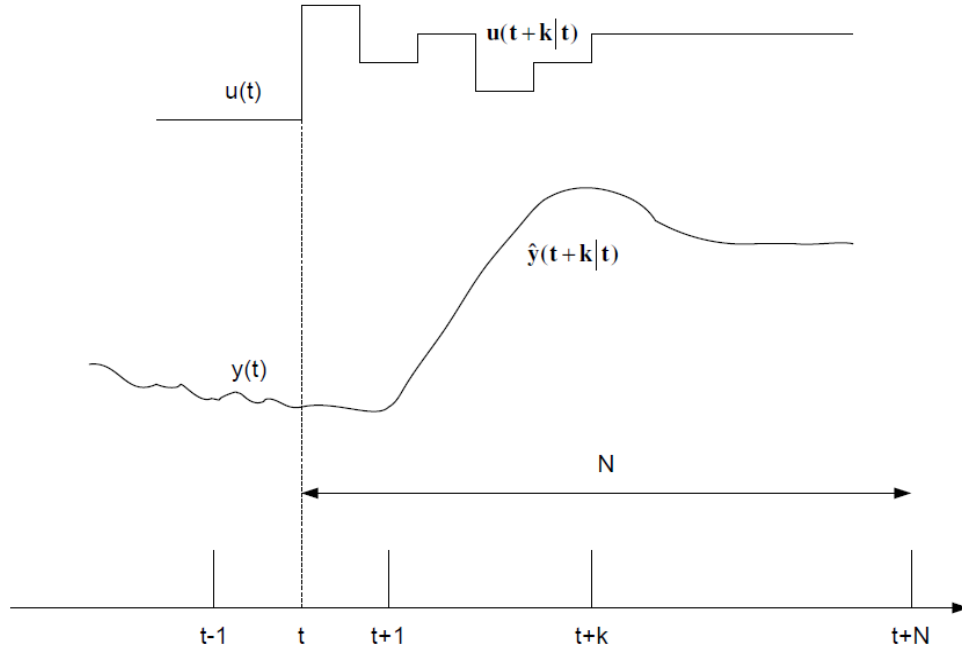
3.1. KONTROL SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ

3.1.1. Model Öngörülü Kontrol

Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control-MPC) veya diğer bir adıyla Modele Dayalı Öngörülü Kontrol (Model Based Predictive Control-MBPC), son yıllarda hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda sıkça rastlanmaya başlayan bir kontrol yöntemidir. MPC 1980'lerden itibaren ortaya çıkmış ve o günden günümüze fark edilir derecede gelişme göstermiştir. İlk olarak güç reaktörlerindeki ve petrol rafinerilerindeki kontrol gereksinimlerine bağlı olarak geliştirilmiş olan yöntemler, sonrasında diğer alanlarda da hızla yaygınlaşmıştır. Endüstride yüzlerce MPC uygulaması vardır. En fazla uygulama, kimya ve petrokimya alanında görülmekle birlikte günümüzde gıda, otomotiv, havacılık, kâğıt endüstrisi, kontrol uygulamaları ve klinik anesteziye kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadır [11].

Model öngörülü kontrol terimi tek bir kontrolör tasarım yöntemini değil birçok tasarım yöntemlerini kapsayan (genelleştirilmiş model öngörülü kontrol, bulanık model öngörülü kontrol, dayanıklı model öngörülü kontrol vb.) genel bir tanımdır. Bu yöntemlerin ortak özelliği ise sistemin modelinin doğrudan kullanılması ve kontrol işaretinin belirli bir ölçüte göre minimumlaştırılarak elde edilmesidir. Bu tasarım yöntemleri ile elde edilen kontrolörler doğrusal yapıdadır.

Modele Dayalı Öngörülü Kontrol yönteminde sistemin gelecekteki çıkışlarının tahmini, geçmişteki, şu anki ve önerilen gelecek optimal kontrol hareketlerin değerleri temel alınarak oluşturulur. MPC ailesinde kullanılan kontrol düşüncesinin izlediği yöntem Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

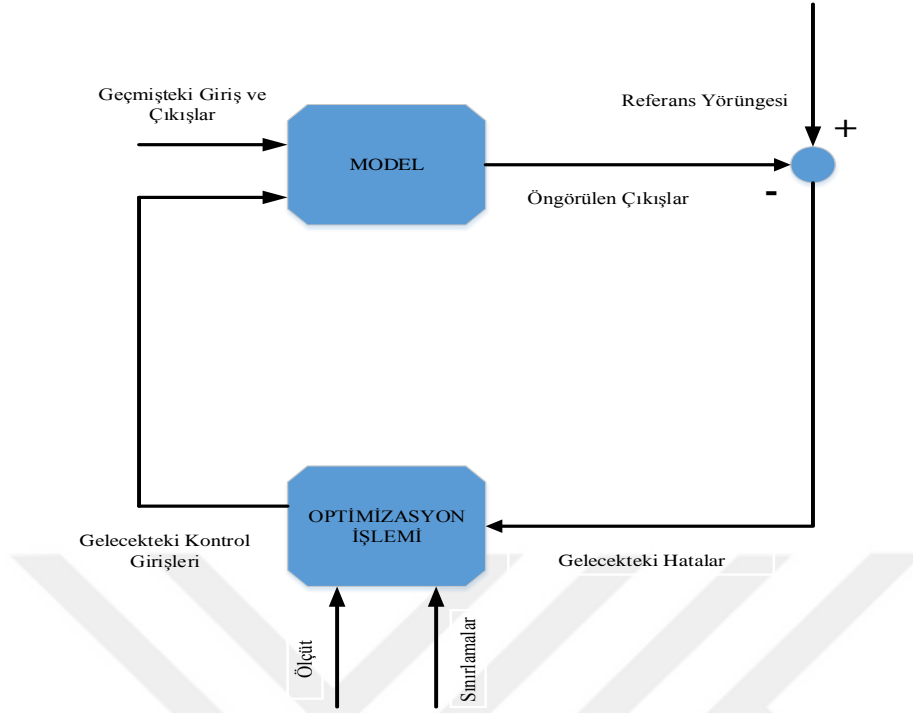


Şekil 3.1. MPC stratejisi [11]

Modele Dayalı Öngörülü Kontrol yöntemlerinin temel ilkeleri:

- Sistem modelinin gelecekteki bir zaman diliminde sistemin yanıtını öngörebilmek için kullanılması
- Bir ölçütü minimumlaştırarak bir kontrol girişi dizisinin hesaplanması
- Kaydırma işlemi, yani her örnekleme anında öngörü ufkunun geleceğe doğru bir adım kaydırılması, her adımda elde edilen kontrol işareti dizisinin ilk elemanının uygulanması olarak sıralanabilir [11].

Şekil 3.2.'de görüldüğü üzere model, geçmişteki (önceki) sistem giriş ve çıkışları ve de gelecekteki (öngörülen) kontrol girişlerini kullanmaktadır. Buna bağlı olarak sistemin gelecekteki yanıtlarını öngörmekte ve istenilen referans yörüngesinde olup olmadığı karşılaştırılmaktadır. Kontrol girişleri, gelecekteki hatalar, ölçütler ve sınırlamalar da dikkate alınarak optimizasyon işleminin gerçekleştirilmesiyle elde edilir.



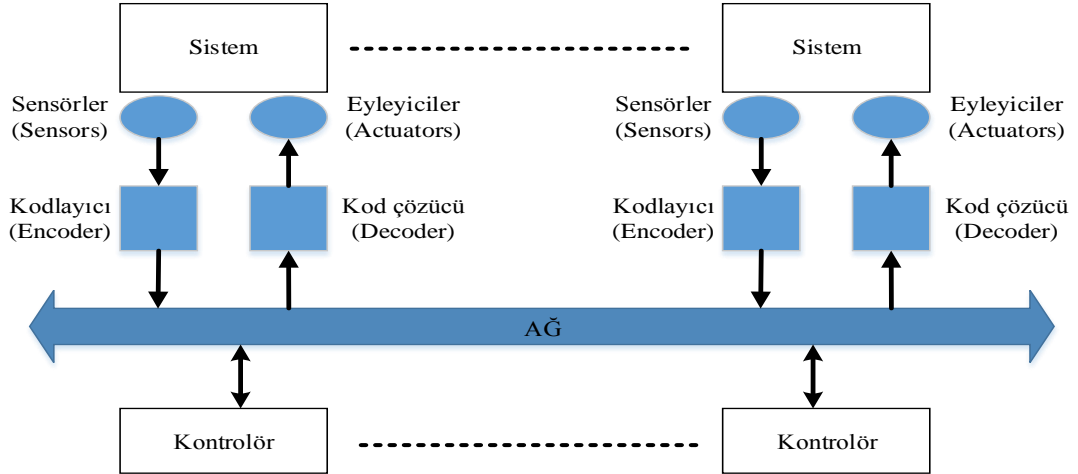
Şekil 3.2. MPC'nin temel mimarisi [11]

Modele Dayalı Öngörülü Kontrolün diğer kontrol metotlarına göre bir dizi avantajları bulunur. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Çok değişkenli kontrol problemlerine uygulanabilir
- Elde edilen MPC yapısı uygulaması kolay doğrusal bir kontrol kuralıdır
- Basit dinamiğe sahip süreçlerde kullanılabildiği gibi kararsız minimum fazlı olmayan veya kararsız sistemler gibi karmaşık dinamiğe sahip süreçlerde de kullanılabilen geniş bir alanda uygulanabilir
- Ölü zaman etkisini giderme özelliğine sahiptir [11].

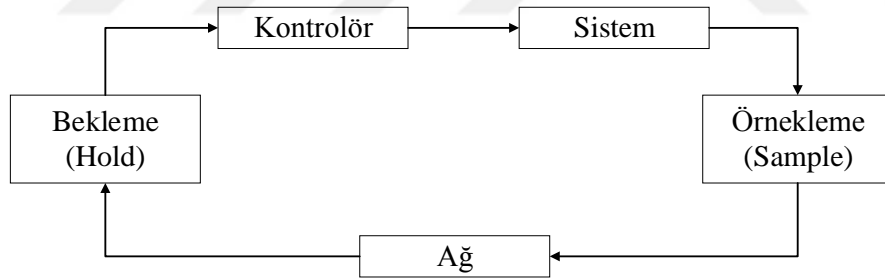
3.1.2. Ağ Bağlantılı Kontrol

Kontrol edilecek sistemdeki sensörlerin, eyleyicilerin ve kontrolörlerin arasındaki iletişimin bir iletişim ağı üzerinden sağlandığı sistemlere ağ bağlantılı kontrol sistemleri denir. Şekil 3.3.'de ağ bağlantılı kontrol sistemlerinin genel bir mimarisi gösterilmiştir. Bu durumda kontrolör ve kontrol edilen sistem fiziksel olarak birbirinden ayrıdır.

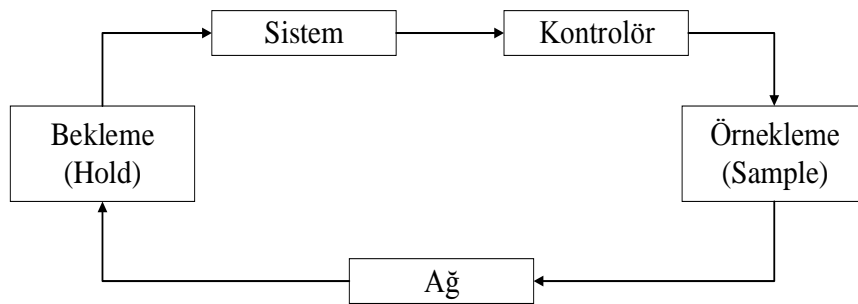


Şekil 3.3. Genel ağ bağlantılı kontrol mimarisi [32]

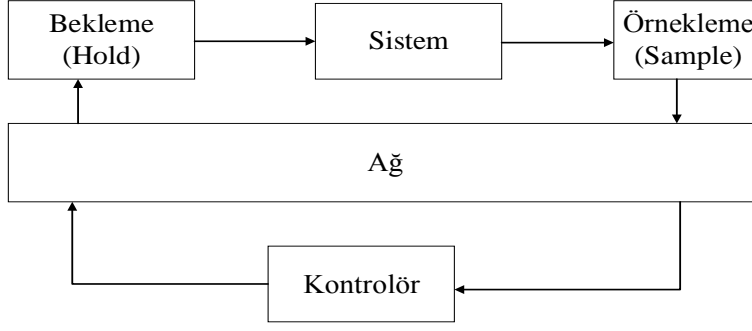
Genel mimarisi verilen ağ bağlantılı kontrol farklı mimarilerde de tasarlanabilir. Esnek mimari yapısı, kurulum ve bakım maliyetlerinin azaltılması, ağ bağlantılı kontrol sistemlerinin ön plana çıkan özellikleridir. Tek kanallı geri beslemeli ağ bağlantılı kontrol mimarilerine farklı örnekler Şekil 3.4.'te gösterilmiştir [32].



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4. Tek kanallı geri beslemeli ağ bağlantılı çeşitli kontrol mimarileri [32]

Şekil 3.4.'de gösterilen ağ bağlantılı kontrol mimarilerinde bazı farklılıklar vardır. Şekil 3.4. (a)'da gösterilen mimaride, sistemden belli bir örnekleme periyoduyla alınan bilgiler ağ üzerinden belli bir beklemeyle kontrolöre ulaşmıştır. Şekil 3.4. (b)'de ise doğrudan sistemden değil de kontrolör çıkışından alınan örneklenmiş bilgiler ağ üzerinden iletilir. Farklı bir mimari de Şekil 3.4. (c)'de gösterilmiştir. Burada sistemden alınan bilgiler kontrolöre ulaşırken ve de kontrolörden alınan bilgiler sisteme ulaşırken ağ kullanılmaktadır.

Ağ bağlantılı kontrol adından da anlaşıldığı üzere kontrol ve iletişim olmak üzere iki temel alanın birbiriyle ilişkili olarak incelendiği bir konudur. Bu noktada kontrol açısından yaklaşımlar birbiriyle iletişim halindeki dinamik sistemlerin davranışıyla ilgilenirken, iletişim açısından çalışmalar bilginin iletilmesinde karşılaşılan sorunlar üzerinedir. Karşılaşılan bu sorunlar sınırlı bant kapasitesi, örnekleme periyodu ve zaman gecikmeleri, paket kayıpları, sistem mimarisinden kaynaklıdır.

Herhangi bir iletişim ağında belli bir zaman diliminde ancak belli bir miktarda bilgi taşınabilmektedir. Bu durum sınırlı bant kapasitesi olarak adlandırılır. Bazı uygulamalarda bant kapasitesinin sınırlı oluşu önemli bir kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Birden çok sensörlerden oluşan bir uygulamada, sensörlerden alınan bilgilerin tek bir kanalla kaynağa gönderildiğini düşünelim. Bu durumda aynı anda ağa taşıyabileceği miktardan fazla giriş yapılmaya çalışılacağından bazı veriler anlık olarak iletilmeyecek ve bekletilecektir. Geri besleme sinyallerinin değişken zaman aralıklarıyla kontrolöre iletilmesinin, yapılmak istenen kontrol üzerinde olumsuz etkilerinin olacağı açıktır. Sınırlı bant kapasitesi için iletişim kanalının güvenli bir

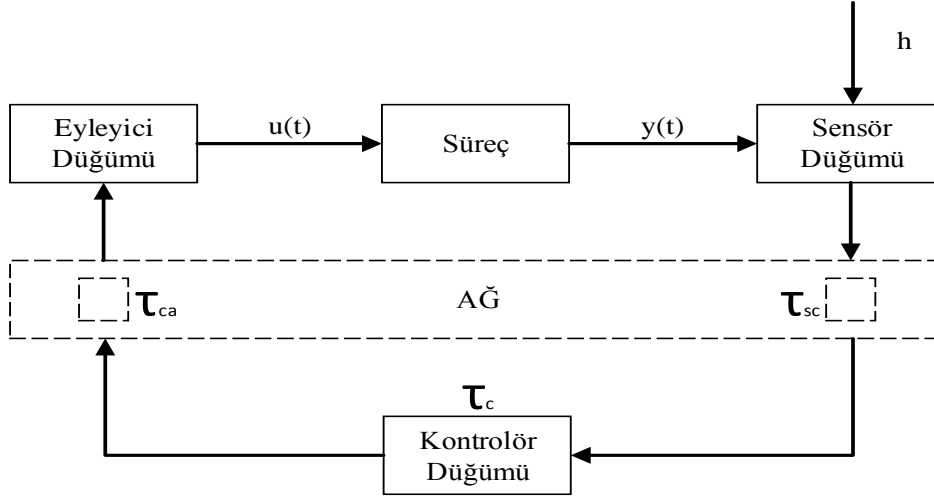
biçimde taşıyabileceği maksimum bit oranının belirlenmesi önemlidir. Benzer biçimde sistemin kararlı ve bozulmaksızın çalışmasını sağlayacak minimum bit oranı da belirlenmelidir.

Ağ bağlantılı kontrol sistemlerinde ölçülen veriler belli zaman aralıklarıyla alınır ve ağ aracılığıyla kontrolöre gönderilir. Bu noktada örnekleme periyodu sistem performansı açısından önemli bir etkiye sahiptir. Örnekleme periyodunun büyük seçilmesi sistem hakkında yeterince bilgi sahibi olmamız ve hatta sistemi yanlış tanımamız anlamına gelebilir. Örnekleme periyodunun küçük seçilmesi yani çok miktarda ölçüm verisinin alınmasının sistemin kontrolünde olumlu bir etkiye sahip olacağı düşünülebilir. Daha fazla miktarda veri olması daha az hata payı ve daha gerçeğe yakın sonuçlar demektir. Ama örnekleme periyodunun düşük olması aynı zamanda ağa daha fazla veri gönderilmesi anlamına gelir. Bu durumda ağdaki paket yoğunluğundan bazı gecikmeler ve kayıplar yaşanabilir. Bu sebeple örnekleme periyodunun seçiminde fazla miktarda verinin sebep olduğu olumsuzluklardan uzak, aynı zamanda sistemi iyi tanıyacak kadar çok veriye imkân sağlayacak bir denge olmalıdır.

Zaman gecikmesi birkaç farklı etkenden kaynaklanan ama göz ardı edemeyeceğimiz bir etkidir. Bu etkenler, sensörle kontrolör arasındaki zaman gecikmesi, kontrolör ile eyleyici arasındaki zaman gecikmesi ve kontrolörün tepki süresinden kaynaklanan zaman gecikmesi şeklindedir ve hepsinin toplamı sistem zaman gecikmesi olarak adlandırılır. Toplam zaman gecikmesi (3.1)'de gösterildiği gibi formüle edilebilir. Bu formülasyonda kontrolör gecikmesi τ_c , sensörle kontrolör arasındaki zaman gecikmesi τ_{sc} ve kontrolör ile eyleyici arasındaki zaman gecikmesine τ_{ca} oranla genellikle ihmal edilebilir [33].

$$\tau_T = \tau_{sc} + \tau_{ca} + \tau_c \quad (3.1)$$

Şekil 3.5.'te zaman gecikmeleriyle birlikte bir kontrol sistemi gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta toplam zaman gecikmesinin örnekleme periyodundan küçük olması gerektiğidir yani $\tau_T \leq h$ şartı sağlanmalıdır [34].



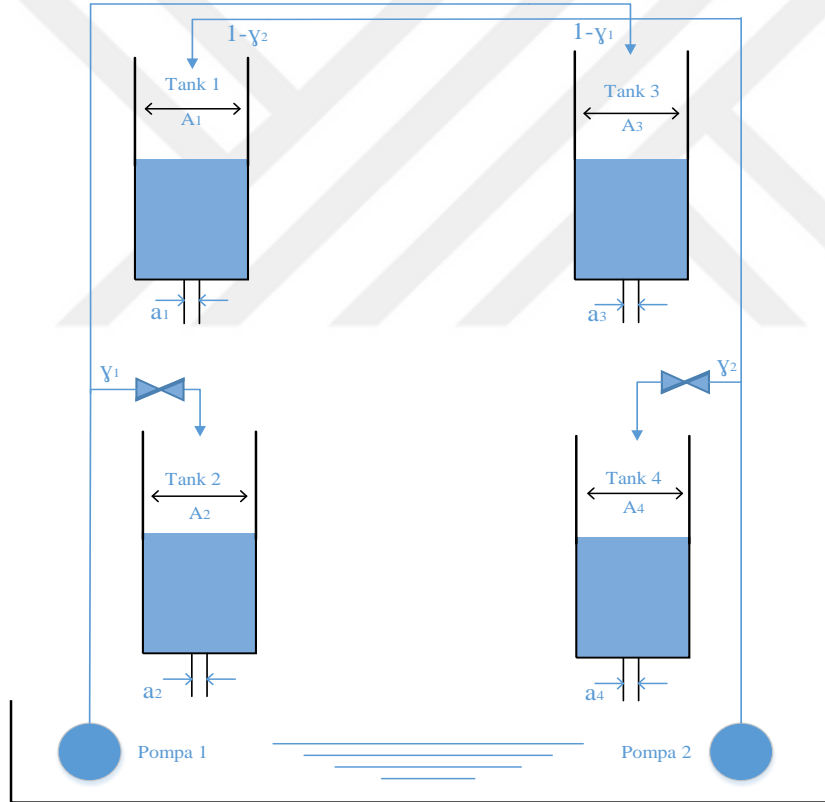
Şekil 3.5. Zaman gecikmeleri ile kontrol sistemi [34]

Ağ üzerinden gerçek zamanlı veri iletimiyle kontrol yapılırken yaşanan bir diğer problem, paket olarak adlandırılan bilginin bir şekilde istenilen noktaya ulaşamamasıdır. Sistemin etkin çalışması açısından paketler de kayıp yaşanmaması çok önemlidir. Paket kayıpları belli bir oranda tolere edilebilir ancak fazla miktarda kayıp kapalı döngü sisteminde geri besleme bağlantısının bozulmasıyla sonuçlanacaktır. Paket kayıplarının önlenmesi için örnekleme periyodunun büyük seçilmesi bir seçenektir. Bu sayede ağ trafiğinde bir sıkışıklık meydana gelmesi önlenmiş olur. Bazı iletişim protokollerinde kaybedilen paketlerin fark edilmesi ve yeniden sisteme gönderilmesi sağlanabilmektedir ancak bu durum kontrol açısından düşünüldüğünde düşen verinin düştükten sonradan gönderilmesinin sisteme bir katkısı bulunmayacaktır önemli olan paket kaybının en aza indirilmesidir [32, 35].

Şekil 3.3.'te gösterilen mimari ağ bağlantısının en genel halidir. Bu gösterimde kodlayıcı bloğu sensörden alınan bilgilerin ağa iletimini sağlayacak şekilde bir akış oluşturur. Kodlayıcı bloğun temel görevi, iletim için sensör sinyalinden örneklemenin ne zaman yapılacağına karar vermektir. Ağ mimarisi, sistemin omurgasını oluşturur. Gerçek zamanlı veri iletişiminin sağlandığı çalışmalarda kurulan ağ yapısı, ağda kullanılan iletişim protokolleri, ağın dışarıdan gelecek saldırılara karşı güvenliğinin sağlanması, bozucu etkilere maruz kalan ağın sağlıklı şekilde çalışmasını sürdürebilmesi kısacası ağın etkinliği açısından tasarlanan mimari büyük önem arz etmektedir.

3.1.3. Dörtlü Tank Sistemi

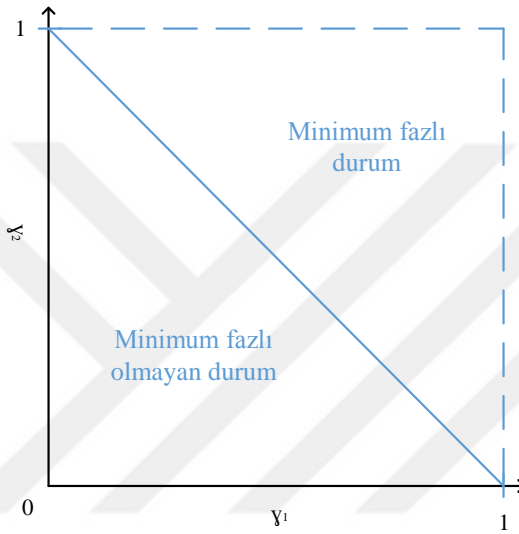
Dörtlü tank sistemi iki giriş ve iki çıkışı bulunan ilk olarak 2000 yılında Johansson [12] tarafından önerilmiş bir sistemdir. Bu sistem Şekil 3.6.'da verilmiştir. Sistemin girişleri her iki pompaya uygulanan voltaj değerleri, sistem çıkışları ise alt tanklardaki sıvı seviyesi yükseklikleridir. Pompa 1 ile tank 2 ve tank 3'e su pompalanırken, pompa 2 ile tank 1 ve tank 4'e su pompalanır. Tank 2 ve tank 4'ün sıvı seviyeleri sistemin çıkışlarıdır. Bu sistem ile kanallar arası etkileşim, minimum fazlı olmama durumu, valf pozisyonlarına göre sistemin transfer fonksiyonunun ve dolayısıyla davranış karakteristiğinin değişmesi gibi süreç kontrol problemlerinde karşılaşılan sorunları laboratuvar ortamında temsil edilebilmektedir.



Şekil 3.6. Dörtlü tank sistemi şeması

Valf pozisyonuna göre sistemin sıfırlarının yerleri sağ yarı düzlem veya sol yarı düzlem olarak ayarlanabilir. Valf açıklıkları $\gamma_1 + \gamma_2$ pompalanan toplam su miktarının, alt ve üst tanklar arasındaki oranını ifade etmektedir. Üstteki tanklardaki sıvı akışının alttaki tanklardan daha fazla olması kontrolün zor olduğu minimum fazlı

olmayan durumdur. Matematiksel ifadeyle sistemin valf sabitleri, minimum fazlı olmayan sistem için $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ şeklinde olmalı, minimum fazlı durum için ise $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ şeklinde olmalıdır. Eğer sağ taraftaki tanklara giden akış ile sol taraftaki tanklara giden akış eşit olursa $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ eşitliği oluşur. Bu da çok değişkenli sıfır noktasının orijinde olması anlamına gelir ve bu durum da kontrol daha zor bir hale gelir. Şekil 3.7.'de γ_1 ve γ_2 değerine göre sistemin durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.7. γ_1 ve γ_2 değerine göre sistemin durumu

3.2. AĞ BAĞLANTISININ BİLEŞENLERİ

3.2.1. Kablosuz İletişim Protokolleri

Kablosuz bir ağ kurularak bir sistemi kontrol etmede kullanılan topolojiler PAN (ing. Personal Area Network-Kişisel Ağ Bağlantısı), LAN (ing. Local Area Network -Yerel Ağ bağlantısı), MAN (ing. Metropolitan Area Network - Yerleşke Ağ Bağlantısı), WAN (ing. WideArea Network - Geniş Ağ Bağlantısı) olmak üzere dört ana grupta toplanabilir. Her bir grupta hız, mesafe, uygulamanın özelliği ya da kullandığı standart özelliklerine göre avantaj veya dezavantajlara sahip olabilir. Ağ standartları genelde IEEE, ISO, ANSI gibi bazı kurum ya da komiteler tarafından oluşturulur.

IEEE tarafından 802.X olarak tanımlanan standart alt kategorilere de ayrılır. Bunlar IEEE 802.15 (Wireless PAN), IEEE 802.11 (Wireless LAN-Wifi), IEEE

802.16 (Wireless MAN-WiMAX), IEEE 802.20 (Wireless WMAN) gibi alt dallara ayrılır. Bu geniş dallanmada yaygın olarak kullanılan standartlar IEEE 802.11 Wi-fi teknolojisi, IEEE 802.15.1 Bluetooth teknolojisi ve IEEE 802.15.4 Zigbee teknolojisi. Bu standartlardan hangisinin kullanılacağı konusu ise uygulamanın özellikleriyle alakalı olarak belirlenmektedir. Çünkü her standardın avantajları yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Kısaca bunlara değinirsek; Wi-fi teknolojisi, yüksek hız altyapısına sahip olduğundan hızın ön planda olduğu uygulamalarda kullanılabilirler. Bunun yanında bu teknoloji enerji tüketimi, karmaşıklık gibi konularda geri planda kalmaktadır. Bluetooth teknolojisi 10 ile 100 metre arasında 1 Mb/s hıza sahip ve 2.4 GHz frekans bandına sahiptir. Kısa mesafede yüksek hızla veri iletiminin istendiği uygulamalarda ön plana çıkan bir teknolojidir. Zigbee teknoloji ise düşük enerji tüketimi ve daha geniş alanları kapsayan uygulamalarda kullanılmaktadır. Kapsama alanının genişliği sayesinde endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Zigbee’de bulunan hücre düğümlerinin sayısı 65000’in üzerinde olduğundan, endüstriyel uygulamalarda birçok nokta ile haberleşmesi anlamına gelmektedir. Veri iletim hızı 250kb/s olup, 100 metreye kadar haberleşme yeteneğine sahiptir. 2.4 GHz frekans bandını kullanmasına rağmen 915MHz, 868MHz frekans bantları için de uygulamalar mevcuttur. Bu üç protokole ait özellikler Çizelge 3.1.’de tablo halinde sunulmuştur [36, 37].

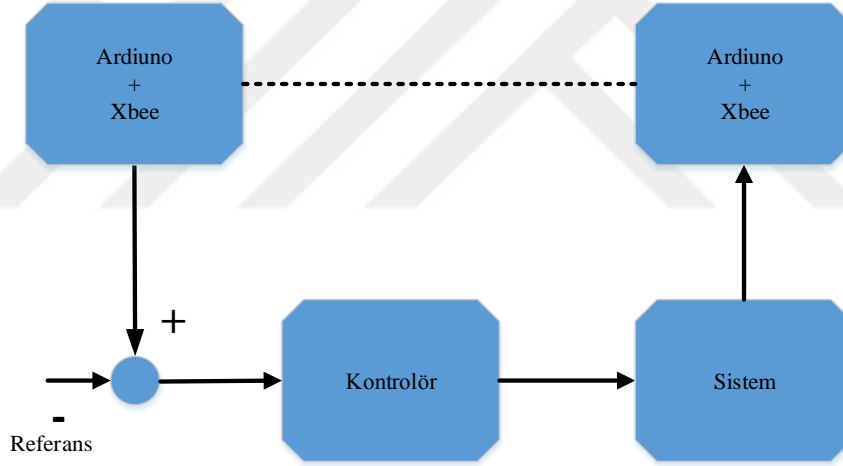
	Zigbee	Bluetooth	Wi-fi
Kullanılan IEEE protokolü	802.15.4	802.15.1	802.11 a/b/c
Frekans Bandı	2.4GHz;868/915MHz	2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Veri iletim hızı	250 Kb/s	1 Mb/s	54Mb/s
Hücre düğümlerinin maksimum sayısı	>65000	8	2007
Ortalama kapsama alanı	10-100m	10m	100m
Enerji Tüketimi	30 mA TX, $3 \cdot 10^{-6}$ mA	40 mA TX, beklemede 0.2 mA	400+ mA TX, beklemede 20 mA
Uygulama Alanları	Endüstriyel Uygulamalarda Uzaktan kontrol ve izleme	Kablosuz kulaklık ve cep telefonu arası veri iletimi	İnternet Altyapısı, veri iletimi

Çizelge 3.1. Zigbee/Bluetooth/Wi-fi ait özelliklerin karşılaştırılması

Yaptığımız çalışmada, dörtlü tank sistemi gibi yavaş bir sürece sahip ve veri haberleşmesinin sürekliliği için enerji tüketiminin az olması da dikkate alınarak, gönderilen ve alınan bilginin çok büyük içeriğe sahip olmaması yani az bayta sahip olması özelliklerinden dolayı Zigbee teknolojisinin kullanılması uygun görülmüştür.

3.2.2. Ağ Bağlantısının Gerçeklenmesi

Sistemin kontrolü için sistemin çıkış sinyalinin denetleyiciye ulaşmaya kadar izlediği yol Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. Şekilde, kesikli çizgiler kablosuz bağlantıyı temsil etmekte olup ağ bağlantısının gerçekleştirildiği yerdir. Diğer kısımlarda ise kablolu fiziksel bağlantılar söz konusudur. Sistemde iki adet Xbee modülü ve iki adet Arduino bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Verinin iletimi için tasarlanan sistem şeması

Kullanılan Xbee modülü Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Bu modül, Digi International firması tarafından üretilmiş 2. seri haberleşme modülü olup, 120 metreye kadar iletişim sağlayabilmektedir ve 2.4GHz frekansında çalışmaktadır. Çıkış gücü 2 mW olup, noktadan noktaya ve çok noktalı ağ mimarilerine uyum sağlamaktadır. Haberleşme protokolü olarak IEEE 802.15.4 kullanılır ve veri iletim hızı 250 Kbps'dir.



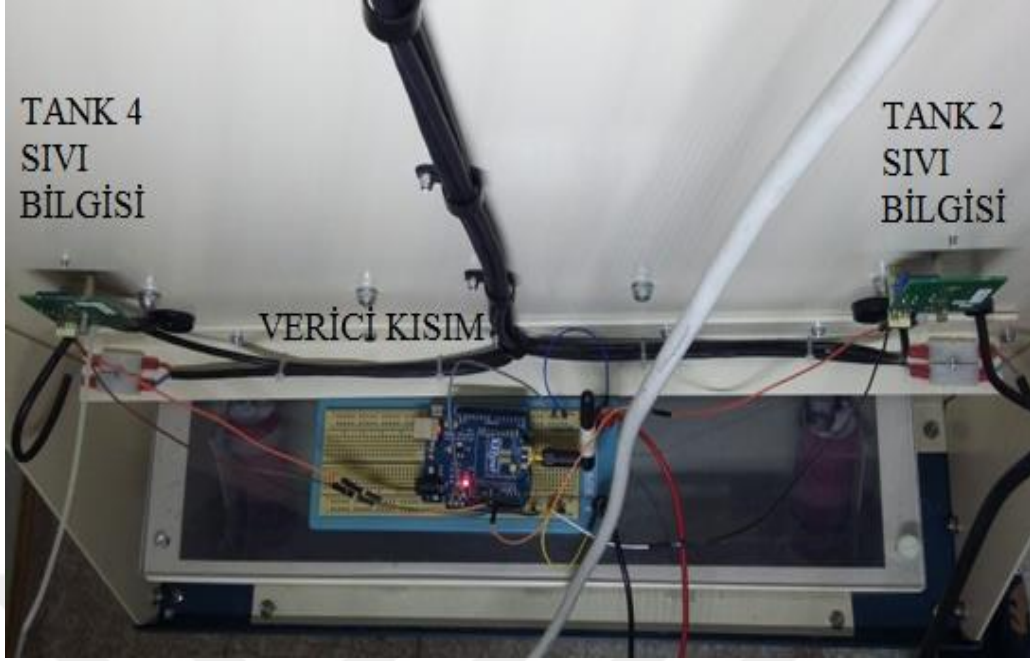
Şekil 3.9. Kullanılan Xbee modülü



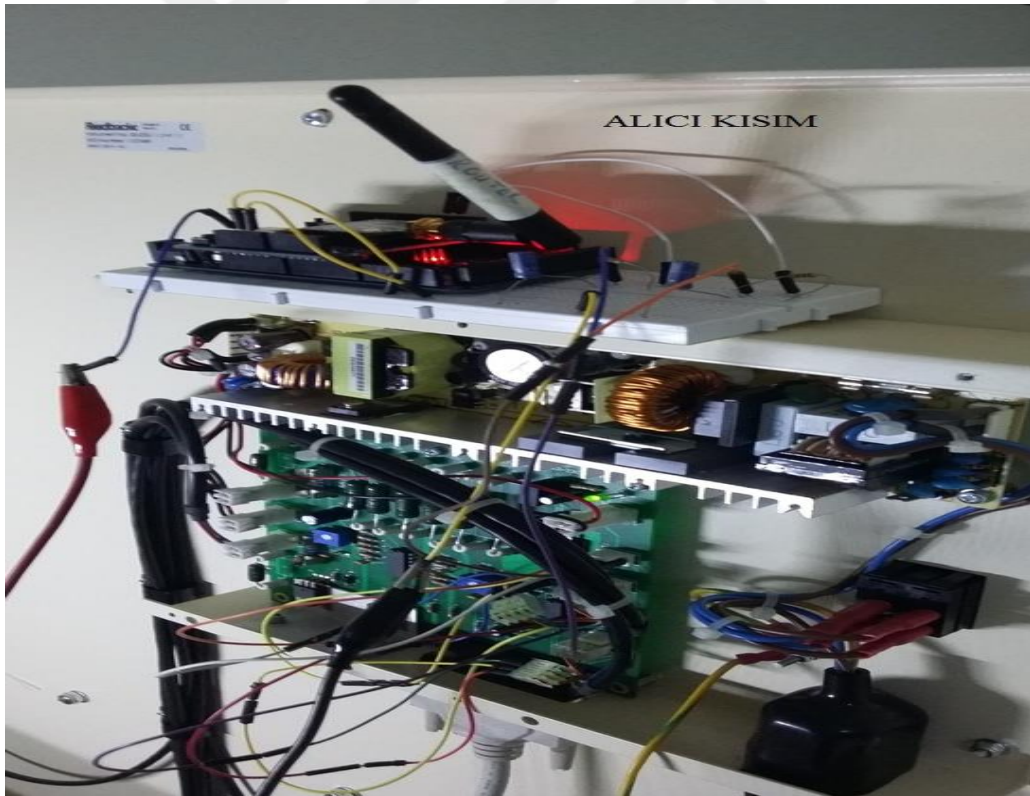
Şekil 3.10. Kullanılan RP-SMA yarım dalga anten

Şekil 3.10.'da gösterilen anten ise Digi International firması tarafından üretilmiş Xbee modülün daha kolay haberleşmesi için 2.4 GHz RP-SMA yarım dalga antendir. Kullanılan Arduino modelleri ise alıcı kısmında Arduino uno ve verici kısmında Arduino megarıdır.

Şekil 3.11.'de kablosuz bağlantı şeması gösterilmiştir. Şeklin sağ kısmında dörtlü tank sisteminin arkadan bakıldığında görünen kısmı yer almaktadır. Burada tank 2 ve tank 4'e ait basınç sensörlerinin çıkışları öncelikle verici kısmındaki Arduinonun A1 ve A2 pinine bağlanmıştır. Bu pinlere gelen analog ölçüm değerleri Arduinodaki gömülü program aracılığıyla dijitalleştirilir. Bu işlemden sonra seri olarak bağladığımız Xbee modülü sayesinde dijital veriler kablosuz olarak alıcı kısma gönderilir.



Şekil 3.12. Kablosuz bağlantı verici tarafı



Şekil 3.13. Kablosuz bağlantı alıcı tarafı

3.2.3. TrueTime Araç Kutusu

TrueTime gerçek zamanlı simülasyon imkanı sağlayan MATLAB/Simulink tabanlı bir programdır. Bu program aracılığıyla dağıtık gerçek zamanlı sistem dinamikleri simüle edilebilir [38].

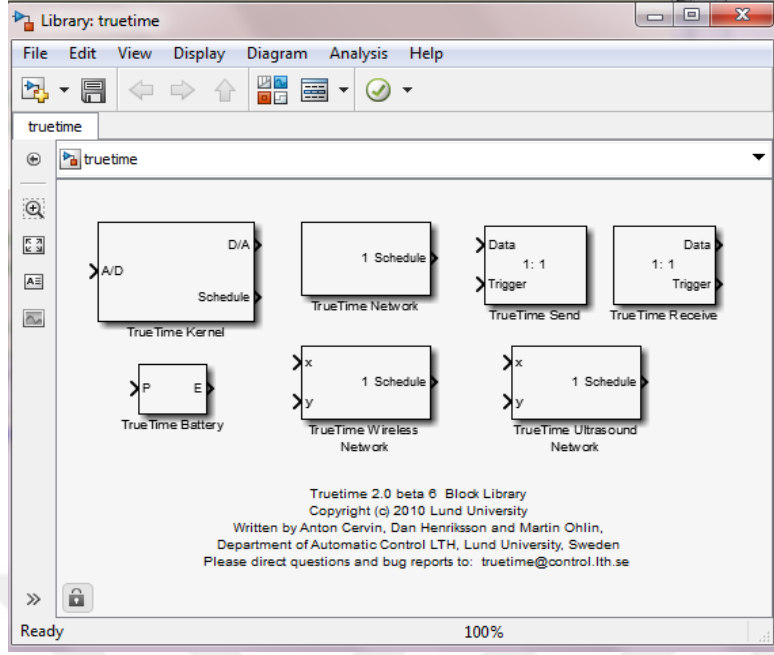
TrueTimekernel bloğu ve TrueTime network bloğu olmak üzere temel olarak iki blok içerir. Uygulama kullanıcı tarafından yazılan kod fonksiyonları(C++ fonksiyonları veya m-file) veya grafiksel olarak simulink bloklarının kullanımı şeklinde çalıştırılabilir.

TrueTime network bloğu bir yerel alan ağ içerisinde, seçilen bir ağ modeline göre bilgisayar düğümleri arasında paket iletimini ve ortam erişiminin simülasyonunu sağlar. Ethernet, CAN, tokenbus, FDMA(ing. Frequency Division Multiple Access), TDMA (ing. Time Division Multiple Access) gibi ortam erişim kontrol protokollerini destekler.

TrueTimekernel bloğu ise A/D ve D/A çeviriciler, bir ağ ara yüzü, dış kesme kanallarından oluşan kısımdır. Burada hesaplamalar, kontrol algoritmaları, giriş-çıkış görevleri, iletişim görevleri gerçekleşir.

Truetime, deneysel uygulamalarda kontrol görevini yerine getirirken farklı senaryolar altında esnek kullanıma imkan vermesi, MATLAB programıyla çalışabiliyor olması, gerçek zamanlı simülasyon sağlıyor olması nedenleriyle tercih sebebi olmuştur [38, 39].

Şekil 3.14.'te Truetime blok kütüphanesi görünmektedir.



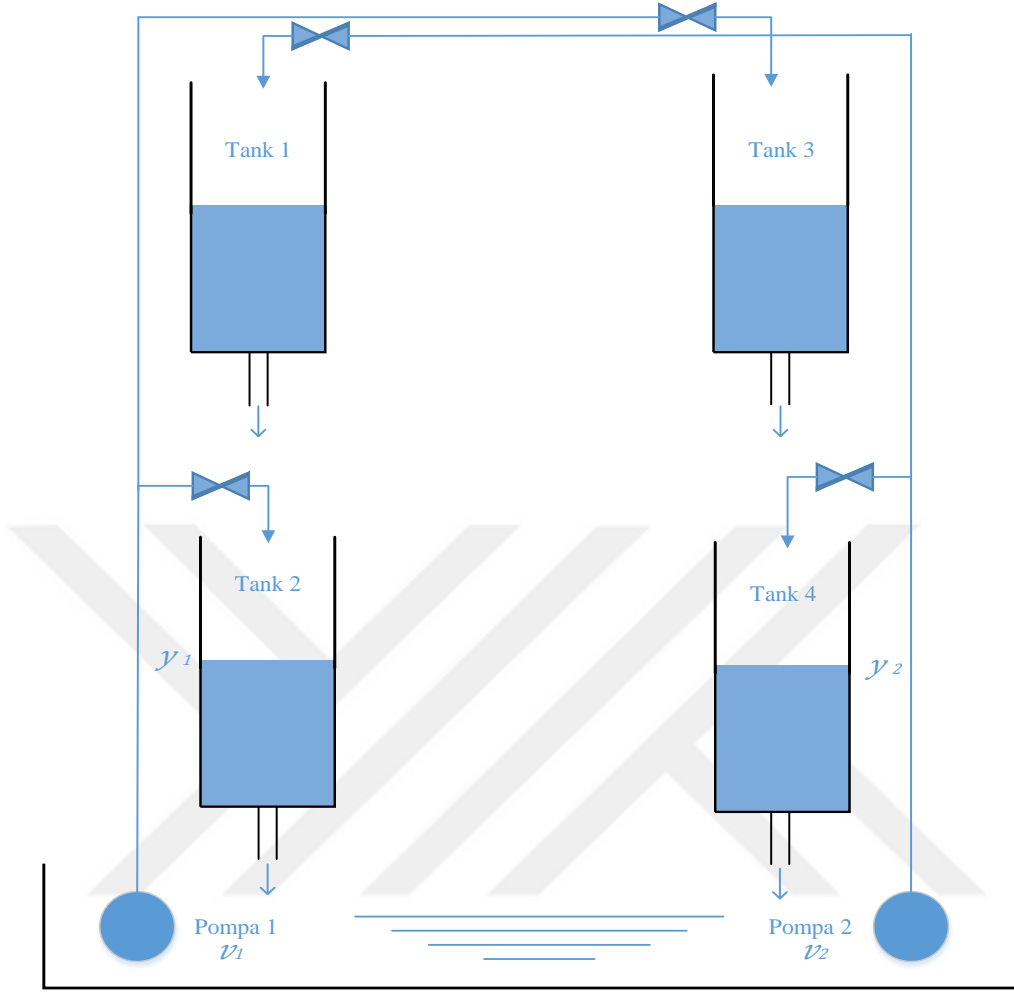
Şekil 3.14. Truetime blok kütüphanesi

3.3. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

3.3.1. Dörtlü Tank Sisteminin Matematiksel Modelinin Oluşturulması

Bu kısımda dörtlü tank sisteminin fiziksel modelinden matematiksel modelin oluşturulması anlatılmıştır [12] .

Şekil 3.15.'te gösterilen dörtlü tank sisteminde iki pompa bulunmaktadır ve bu pompalar yardımıyla alt tanklardaki sıvı seviyesi kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sistemde, pompa 1'e uygulanan voltaj değeri v_1 ve pompa 2'e uygulanan voltaj değeri v_2 giriş değişkenleri, tank 2'deki sıvı seviyesi y_1 ve tank 4'deki sıvı seviyesi y_2 ise çıkış değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Matematiksel model oluşturulurken; sıcaklığın 25 °C, basıncın 1 atm olduğu standart koşullarda gerçekleştiği kabul edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan sıvı sudur ve suyun yoğunluğunun 1 g/cm^3 olduğu ve sistemdeki sıvı miktarının her durumda korunduğu (buharlaşma ya da başka etkilerle yaşanabilecek küçük miktardaki kayıplar ihmal edilmiş) kabul edilmiştir. Sistem denge durumunda iken tanklardaki sıvı seviyeleri ve pompa gerilimleri sabit yani zamana bağlı olarak değişimi sıfır kabul edilmiştir. Pompa gerilimlerinin sıvı yüksekliğiyle doğru orantılı olarak çıkış üretildiği kabul edilmiştir. Sistem kütle korunumu ve Bernoulli yasaları gereğince;



Şekil 3.15. Dörtlü tank sistemi

$$\begin{aligned}\frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_1}v_2 \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_1}{A_2}\sqrt{2gh_1} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_2}v_1 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_3}v_1 \\ \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{a_3}{A_4}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_4}v_2\end{aligned}\quad (3.3)$$

(3.3)'de gösterilen bu değişkenler:

A_i i. tankın enine kesiti,
 a_i çıkış deliğinin enine kesiti,
 k_i pompa sabiti,
 h_i su seviyesini göstermektedir.

Pompa i'ye uygulanan gerilim v_i ve buna karşılık oluşan akış $k_i v_i$ 'dir. Parametreler $\gamma_1, \gamma_2 \in [0,1]$ valf pozisyonlarının ayarlanmasıyla belirlenir. Tank 1'deki akış $(1 - \gamma_2)k_2 v_2$, tank 2'deki akış $\gamma_1 k_1 v_1$, tank 3'deki akış $(1 - \gamma_1)k_1 v_1$ ve tank 4'deki akış $\gamma_2 k_2 v_2$ 'dir. g yerçekimi ivmesidir.

Durum değişkenleri $x_i := h_i - h_i^0$ tank seviyelerinin denge durumundaki seviye h_i^0 ile farkları olarak tanımlanmıştır. Giriş sinyali ise $u_i := v_i - v_i^0$ pompaya uygulanan voltaj ile çalışma noktasındaki voltaj değeri arasındaki v_i^0 farktır.

(3.3)'de verilen denklemlerin çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmasıyla sistemin durum-uzay modeli şu şekilde oluşur;

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{A_1}{A_2 T_1} & -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_3}{A_4 T_3} & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1 - \gamma_2)k_2}{A_1} \\ \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ \frac{(1 - \gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \end{bmatrix} u$$

$$y = Cx + Du = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x . \quad (3.4)$$

Burada zaman sabitleri:

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2 h_i^0}{g}} , \quad i = 1, \dots, 4$$

olarak tanımlanmıştır. Durum uzay denklemleri elde edilen sistemin A, B, C, D matrisleri kullanılarak sistemin transfer fonksiyonu elde edilebilir.

$$G = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'de A, B, C, D yerine yazılırsa (3.6)'daki transfer matrisi elde edilir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1+sT_2} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1+sT_4)(1+sT_3)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1+sT_4} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Bu transfer matrisinde $c_1 = T_2 k_1 / A_2$ ve $c_2 = T_4 k_2 / A_4$ dir.

3.3.2. Gerçek Sistem Modeli

Bu çalışmada kullanılan set şekil 3.16'da gösterilen Feedback Inc. firmasının 33-041 kodlu deney setidir [40]. Bu deney setine ait sistem parametreleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

$a_1=0.50265 \text{ cm}^2$	$A_3=138.9 \text{ cm}^2$
$a_2=0.50265 \text{ cm}^2$	$A_4=138.9 \text{ cm}^2$
$a_3=0.50265 \text{ cm}^2$	$n_1=24 \text{ cm}^3/\text{Vs}$
$a_4=0.50265 \text{ cm}^2$	$n_2=24 \text{ cm}^3/\text{Vs}$
$A_1=138.9 \text{ cm}^2$	$g=981 \text{ cm/s}^2$
$A_2=138.9 \text{ cm}^2$	

Çizelge 3.2. Sistem parametreleri



Şekil 3.16. Feedback Inc. firmasının 33-041 kodlu deney seti

Sistemdeki tank seviyeleri 0-28 cm arasında değişmektedir. Çalışma noktasının seçiminde sistemin düşük sıvı yüksekliğinde algılayıcıların doğrusal çalışmada zorlanması sebebiyle orta noktanın biraz üzerindeki 16 cm sıvı yüksekliği seçilmiştir.

3.3.3. Minimum Fazlı Durum Matematiksel Modeli

Minimum fazlı durum için $\gamma_1 + \gamma_2 > 1$ eşitsizliği dikkate alınarak $\gamma_1 = 0.70$ ve $\gamma_2 = 0.70$ olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.2.'te verilen sistem parametreleri kullanılıp, seçilen gama değerleri (3.4) ve (3.6)'da yerine konulursa sistemin A, B, C, D matrisleri ve transfer fonksiyonu G (s) aşağıdaki şekilde bulunur.

$$A = \begin{bmatrix} -0.09445 & 0 & 0 & 0 \\ 0.09445 & -0.02834 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.09445 & 0 \\ 0 & 0 & 0.09445 & -0.02834 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.04752 \\ 0.1109 & 0 \\ 0.04752 & 0 \\ 0 & 0.1109 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

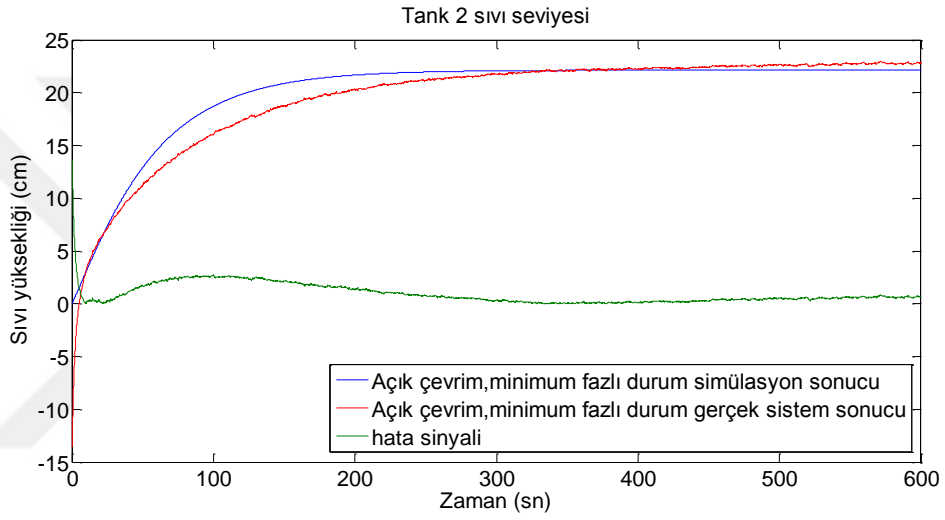
$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.121}{s+0.02004} & \frac{0.003462}{s^2+0.08683s+0.001338} \\ \frac{0.003462}{s^2+0.08683s+0.001338} & \frac{0.121}{s+0.02004} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Minimum fazlı olma durumunda sistemin sıvı yükseklikleri ve pompalardaki gerilim değerleri Çizelge 3.3.'te gösterildiği şekildedir.

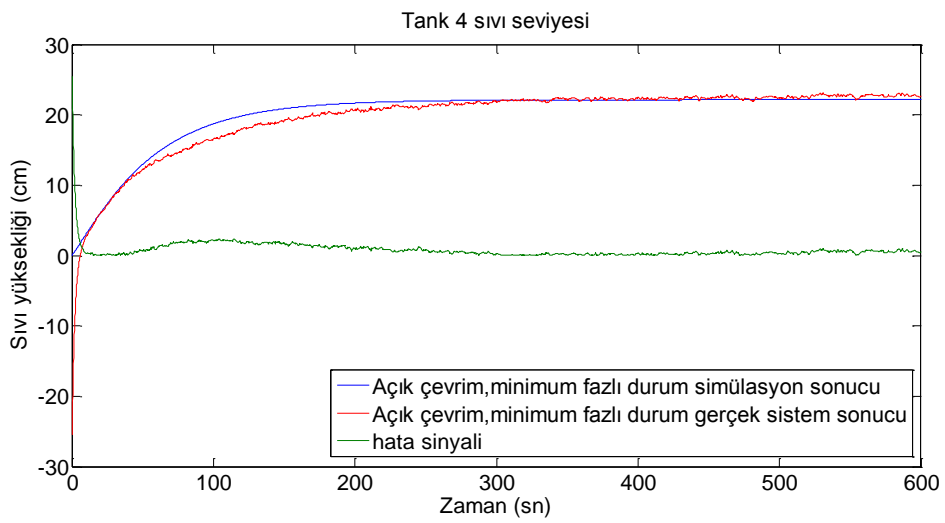
h_1^0	h_2^0	h_3^0	h_4^0	u_1^0	u_2^0
1.44 cm	16 cm	1.44 cm	16 cm	12.727 V	12.727 V

Çizelge 3.3. Minimum fazlı sistem için çalışma noktası değerleri

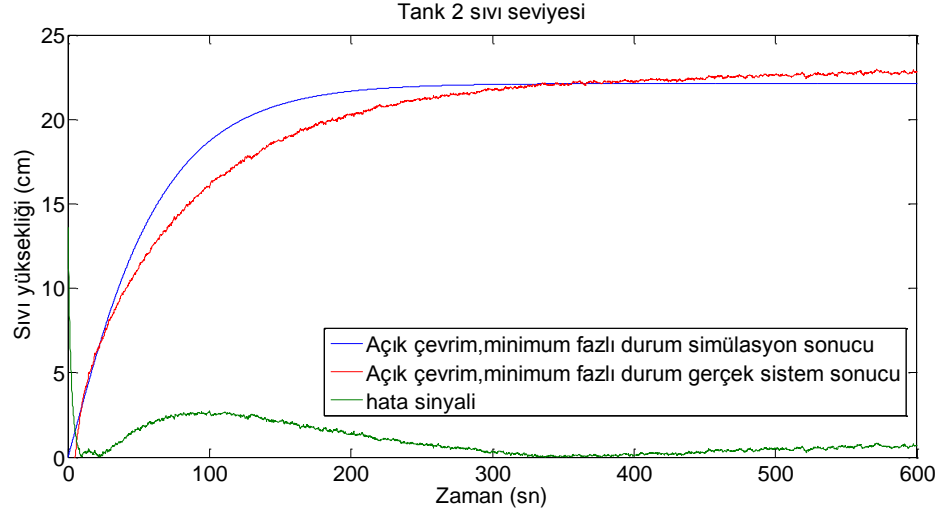
Sistemin matematiksel modeli ile gerçek sistemin ne kadar uyumluluk gösterdiği Şekil 3.17.'de verilmiştir. Şekil 3.17.'de minimum fazlı sistemin açık çevrim tanklardaki sıvı seviyeleri (tank2 ve tank4) ölçüm sonuçları ve bu ikisi arasındaki fark (hata sinyali) gösterilmiştir. Girişlere (pompa 1 ve pompa 2'ye) uygulanan gerilim değeri 2.8 Volttur. Bu girişe karşı sistemin basamak fonksiyonu cevabı incelenmiştir. Şeklin daha iyi yorumlanması amacıyla Şekil 3.17. (c) ve (d)'de gösterilen şekiller, Şekil 3.17. (a) ve (b)'de gösterilen şekillerin sıvı yüksekliği ekseninde ölçeklenmiş halidir. Hata sinyalinin zaman ilerledikçe sifıra yaklaşıyor olması gerçek sistem için oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir.



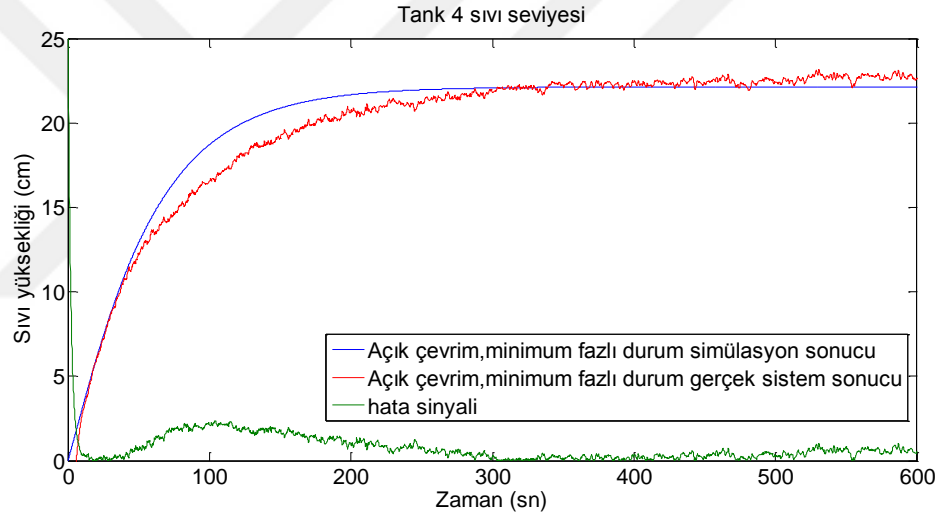
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.17. Model hatası

3.3.4. Minimum Fazlı Olmayan Durum Matematiksel Modeli

Minimum fazlı olmayan durum için $\gamma_1 + \gamma_2 < 1$ eşitsizliği dikkate alınarak $\gamma_1 = 0.30$ ve $\gamma_2 = 0.30$ olarak belirlenmiştir. Bu gama değerleri (3.4) ve (3.6)'da yerine konulup, Çizelge 3.2.'de verilen sistem parametreleri kullanılarak sistemin A, B, C, D matrisleri ve transfer fonksiyonu $G(s)$ aşağıdaki şekilde bulunur.

$$A = \begin{bmatrix} -0.04048 & 0 & 0 & 0 \\ 0.04048 & -0.02834 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.04048 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.02834 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.1109 \\ 0.04752 & 0 \\ 0.1109 & 0 \\ 0 & 0.04752 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.4752}{s+0.02834} & \frac{0.004488}{s^2+0.06882s+0.001147} \\ \frac{0.004488}{s^2+0.06882s+0.001147} & \frac{0.4752}{s+0.02834} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Minimum fazlı olmayan durumda sistemin sıvı yükseklikleri ve pompalardaki gerilim değerleri Çizelge 3.4.'te gösterildiği şekildedir.

h_1^0	h_2^0	h_3^0	h_4^0	u_1^0	u_2^0
3.92 cm	8 cm	3.92 cm	8 cm	2.8624 V	2.8624 V

Çizelge 3.4. Minimum fazlı olmayan sistem için çalışma noktası değerleri

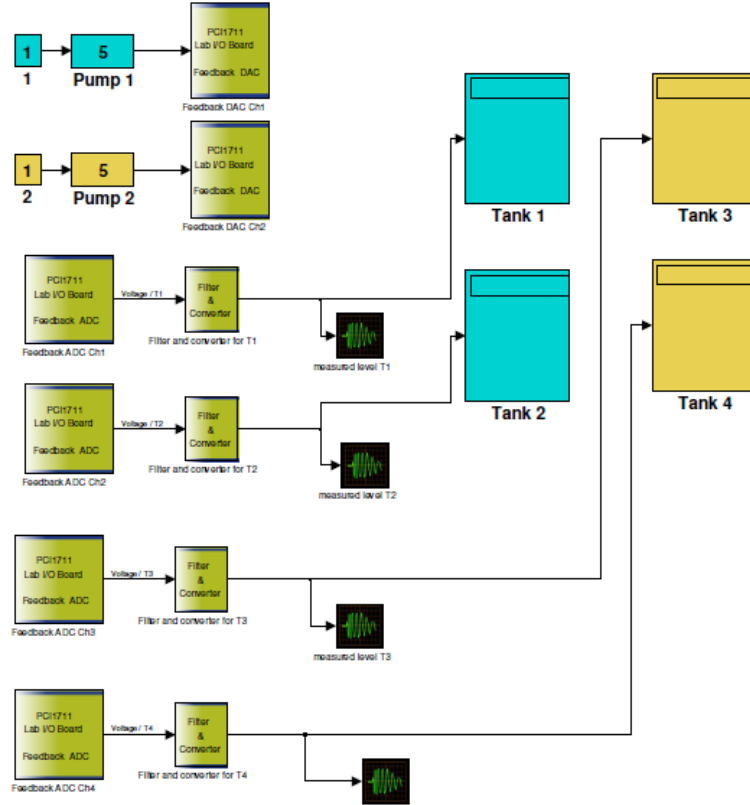
3.3.5. Gerçek Sistem Kalibrasyon ve Valf Pozisyonu Ayarı

Dörtlü tank sistemi ilk çalıştırıldığında kalibrasyon ayarları yapılmaktadır. Bu işlem için MATLAB ortamında Feedback Instruments 33-041 Coupled Tanks dosyasındaki örneklerinden gerçek zamanlı modeller klasörü seçilmiş ve içerisindeki CT_calibration seçilerek süreç başlatılmıştır. Dört tankın her birisi için ayrı ayrı kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu noktada yapılan işlem özetle ilk aşamada tankın boş olma durumunda algılayıcı voltajının değerinin belirlenmesi ve sonraki aşamada tam dolu olması durumunda algılayıcı voltaj değerinin belirlenmesi

şeklindedir. Bu değerler tank boş (0 cm) iken 1 V ve tankın dolu olması (25 cm) durumunda 3.5 V şeklindedir.

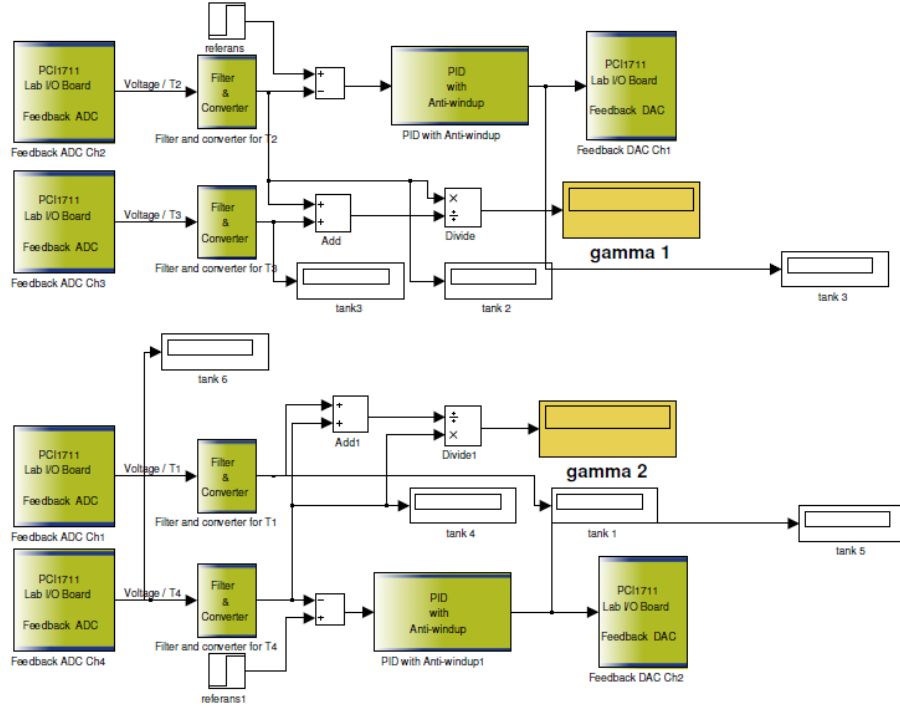
Süreç şu şekildedir; öncelikle hangi tankın kalibrasyonu yapılacağı seçilerek başlanır ve tank boşken ofset ayarı ile voltaj değeri 1V'a ayarlanır sonrasında ilgili tank 25 cm yüksekliğine kadar sıvı ile doldurulur ve kazanç (ing. gain) ayarı ile 3.5V'a ayarlanır. Son olarak tanktaki sıvı boşaltılarak işlem tamamlanır. Böylelikle tankın tam dolu olma ve boş olma durumu dışındaki durumlarda, ilgili sıvı yüksekliğine karşılık gelen voltaj değeri doğrusal bir bağıntıyla üretilecektir.

Şekil 3.18. ile gösterilen MATLAB/Simulink dosyası ile tanklardaki sıvı seviyeleri gözlenebilmektedir. Bu sayede kalibrasyon sonrası gerçekteki sıvı seviyesi ile ekrandaki okunan sıvı seviyesi arasındaki fark olup olmadığı kolayca tespit edilebilir. Bunun dışında herhangi bir andaki sıvı yüksekliğini de ekrandan kolayca okuyabilmemize imkân sağlar.



Şekil 3.18. Sıvı seviyelerinin gözlenmesi için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası

Valf pozisyonları minimum fazlı olma durumu ve minimum fazlı olmama durumu için ayrı ayrı belirlenir. Bu işlem için şekil 3.19.'da görülen MATLAB/Simulink dosyası hazırlanmıştır.



Şekil 3.19. Gama ayarının belirlenmesi için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası

Minimum fazlı olma durumu için gama değerleri 0.7 olarak seçilmiştir. Bu değerlerin sağlanması için $\gamma_1 = \frac{h_2}{h_2+h_3}$ ve $\gamma_2 = \frac{h_4}{h_1+h_4}$ eşitlikleri kullanılmıştır. Bu değerlere göre valf pozisyonları ayarlanmıştır. Sıvının tank 2'ye giden yerdeki valf (MV A) ve tank 3'e giden yerdeki valf (MV C) ile γ_1 ayarı yapılmaktadır. Seçilen gama değerinden de görüldüğü gibi tank 2'deki sıvı yüksekliği, tank 3'deki sıvı yüksekliğinin 2.33 katı olması gerekir. Bu sebeple tank 2'ye daha fazla sıvı gitmesi sağlanacak biçimde MV A açılırken MV C kısılır. Bu şekilde sistem çalıştırılarak sıvı seviyelerine bakılır. Sıvı seviyeleri gama değerini sağlayacak şekilde oluncaya kadar temel düşünce şeklini belirttiğimiz şekilde vanalar ayarlanır. Sıvının Tank 1'e giden yerdeki valf (MV F) ve tank 4'e giden yerdeki valf (MV D) ile γ_2 ayarı yapılmaktadır. γ_1 ayarı yapılırken uygulanan işlemler benzer şekilde

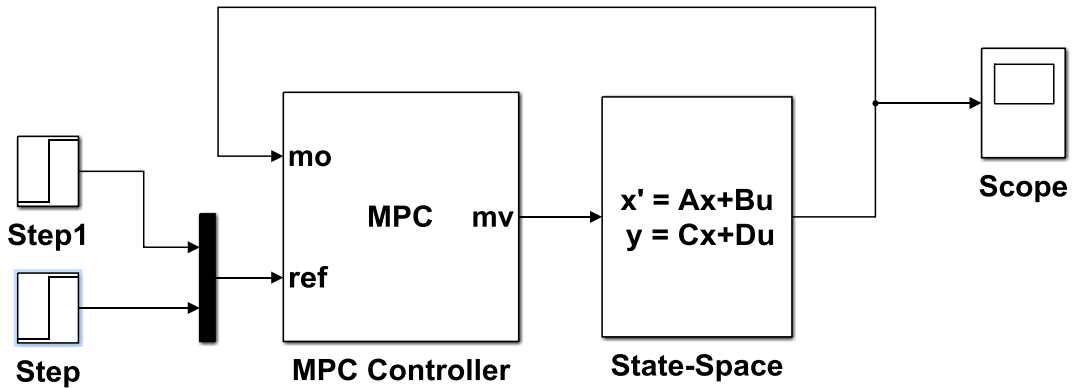
yapılır. Burada tank 4'e daha fazla sıvı gitmesi sağlanacak biçimde MV D açılırken MV F kısılır.

Minimum fazlı olmama durumu için gama değerleri 0.3 olarak seçilmiştir. Bu durumda ise γ_1 eşitliğinin sağlanması için tank 3'deki sıvı yüksekliği, tank 2'deki sıvı yüksekliğinin 2.33 katı olması gerekir. γ_2 eşitliğinin sağlanması için ise tank 4'deki sıvı yüksekliği, tank 1'deki sıvı yüksekliğinin 2.33 katı olması gerekir. Minimum fazlı olmama durumunda alttaki tanklara (tank 2 ve tank 4) az sıvı giderken üstteki tanklara (tank 1 ve tank 3) daha fazla sıvı gidecek şekilde valf pozisyonları elle ayarlanır. İstenilen gama değeri elde edilinceye kadar işleme devam edilir.

3.4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖR TASARIMI

Sistem MATLAB/Simulink ortamında Model Predictive Control Toolbox kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu kütüphanede tasarımda kullanılan kontrol aralıkları, tahmin ufku, kontrol ufku, girişler için sınırlamalar, sistemin yavaş (daha robust) ya da hızlı cevap vermesi durumları ayarlanabilmektedir. Simülasyon için Şekil 3.20.'de gösterildiği gibi bir Simulink dosyası oluşturulmuştur. Sistem modeli için durum uzay bloğu kullanılmıştır. Referans olarak basamak sinyali uygulanmıştır.

Sistemin minimum fazlı durumu ve minimum fazlı olmama durumuna göre sistemin A, B, C, D matrisleri değişmektedir.



Şekil 3.20. Sistem simülasyonu için oluşturulan MATLAB/Simulink dosyası

Minimum fazlı durumda Çizelge 3.5.'de gösterildiği gibi kontrol aralıkları 0.1, tahmin ufku 10, kontrol ufku 2 olarak seçilmiştir. Giriş sınırlamaları en düşük 0 ve en yüksek 5 volt olacak şekilde sistemin hızı ise 0.8 olarak seçilmiştir.

Minimum fazlı olmayan durumda Çizelge 3.6.'da gösterildiği gibi kontrol aralıkları 2, tahmin ufku 35, kontrol ufku 10 olarak seçilmiştir. Giriş sınırlamaları en düşük 0 ve en yüksek 5 volt olacak şekilde sistemin hızı ise 0.1 olarak seçilmiştir.

Kontrol aralıkları	Tahmin ufku	Kontrol ufku	Giriş sınırlamaları en düşük	Giriş sınırlamaları en yüksek	Sistemin hızı
0.1	10	2	0V	5V	0.8

Çizelge 3.5. Minimum fazlı durum MPC MATLAB parametreleri

Kontrol aralıkları	Tahmin ufku	Kontrol ufku	Giriş sınırlamaları en düşük	Giriş sınırlamaları en yüksek	Sistemin hızı
2	35	10	0V	5V	0.1

Çizelge 3.6. Minimum fazlı olmayan durum MPC MATLAB parametreleri

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

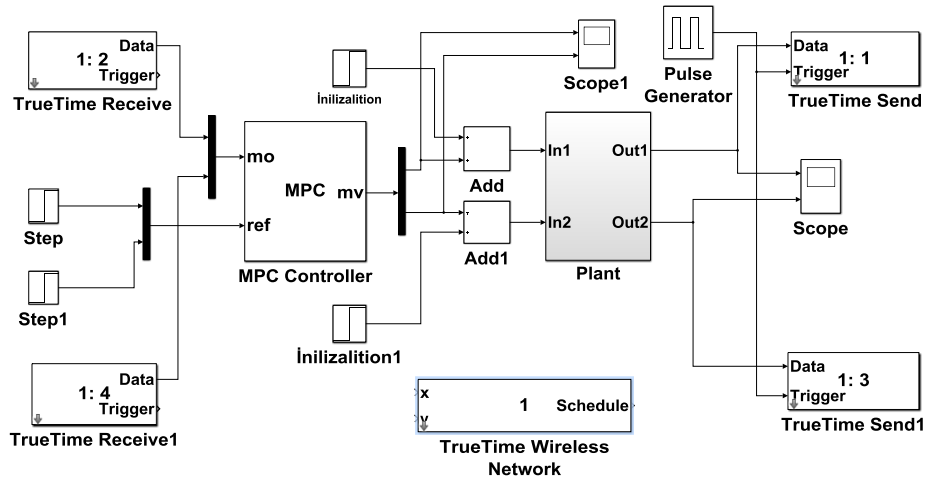
Bu bölümde ilk olarak farklı paket kayıp oranlarının sistem üzerinde etkisinin incelendiği simülasyon çalışmalarının sonuçları verilecektir. Paket kayıpları yapılan deneyler sırasında da gözlenmiş ama deneysel çalışmalarda bunlara yönelik herhangi bir yorum getirilmemiştir.

Minimum fazlı dörtlü tank sistemi için zaman gecikmesinin ağa eklenen tampon vasıtasıyla sabit hale getirildiği deneysel çalışma sonuçları yine bu bölümde verilmiştir. Zaman gecikmeleri için 0.5, 1 ve 2 saniye olmak üzere üç farklı tampon değeri belirlenmiş ve değerlendirmeler bunlar üzerinden yapılmıştır. Son olarak minimum fazlı olmayan sistem için aynı deneysel çalışmalar yapılmış ve çalışmalara ait bulgular değerlendirilmiştir.

4.1. TASARLANAN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÖRÜN AĞ BAĞLANTILI SİMULASYONU

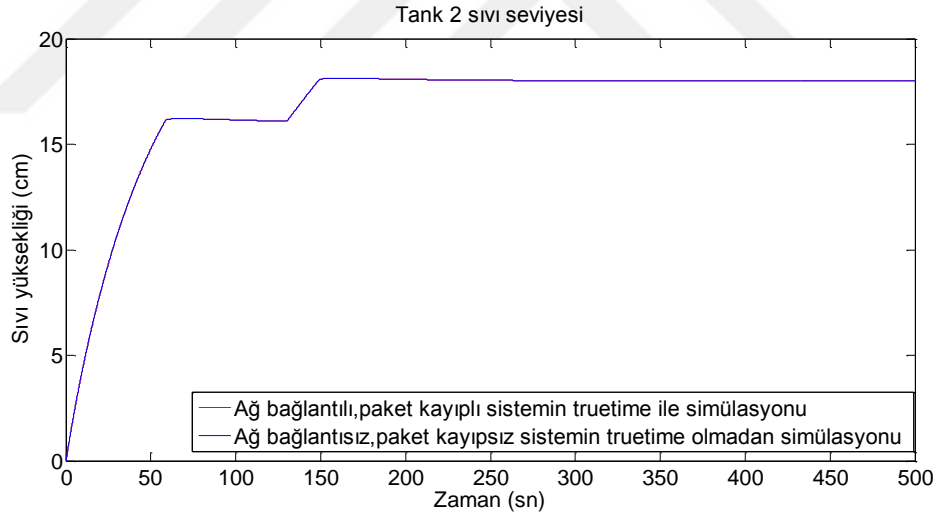
Bu bölümde dörtlü tank sisteminin ağ bağlantılı kontrolü için MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan model ve simülasyon sonuçları verilmiştir.

Ağ bağlantısı Şekil 4.1.'deki gibi TrueTime eklentisi kullanılarak sağlanmıştır. Tank seviye bilgileri alıcı/verici bloklarla MPC'ye iletilmektedir. Ağ parametreleri Truetime Wireless Network bloğu üzerinden tanımlanmıştır. Paket kayıp oranları minimum fazlı ve minimum fazlı olmayan durumlar için yüzde on (0.10) ve yüzde otuz (0.30) olarak seçilmiş ve MPC'nin paket kayıpları altında performans değerlendirmesi yapılmıştır.

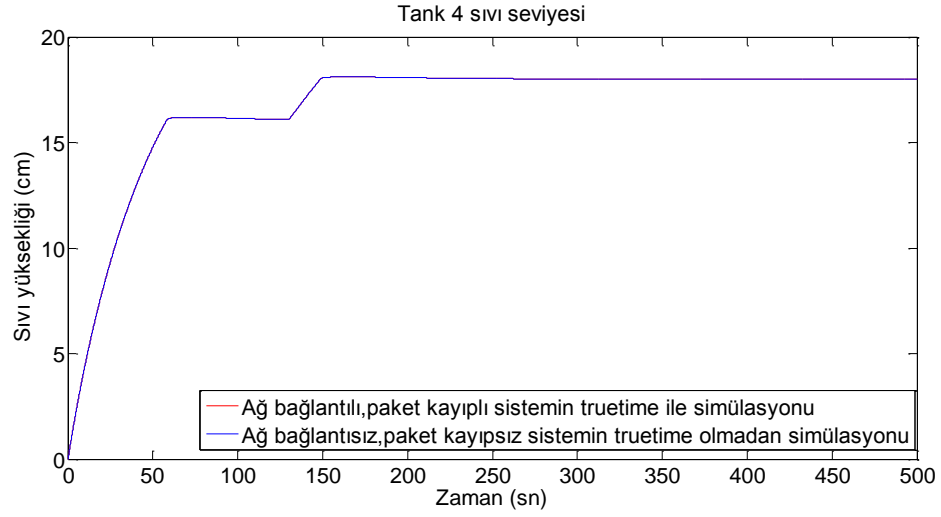


Şekil 4.1. TrueTime ile sistemin ağ bağlantısı için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası

Şekil 4.2.'de minimum fazlı durum için MPC'nin ağ bağlantısız ve %10 paket kayıplı ağ bağlantılı sistemlerdeki simülasyon sonuçları verilmiştir.



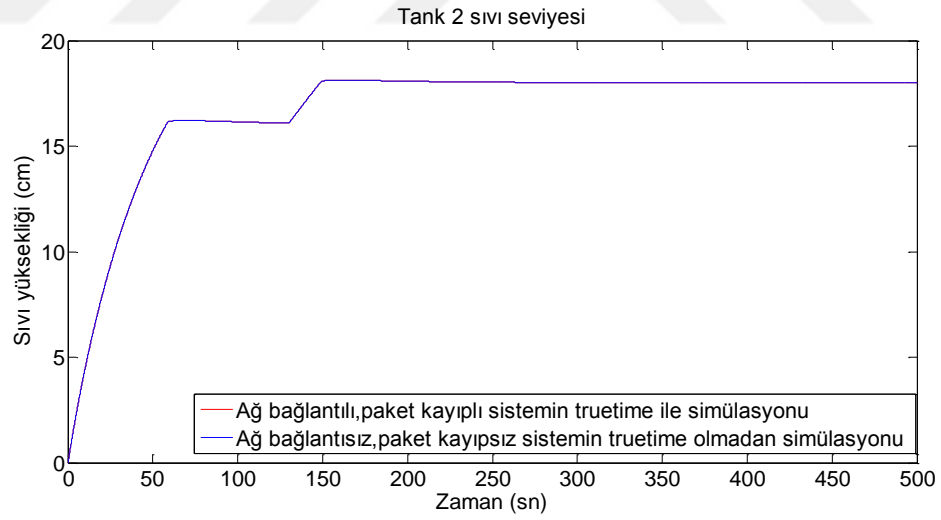
(a)



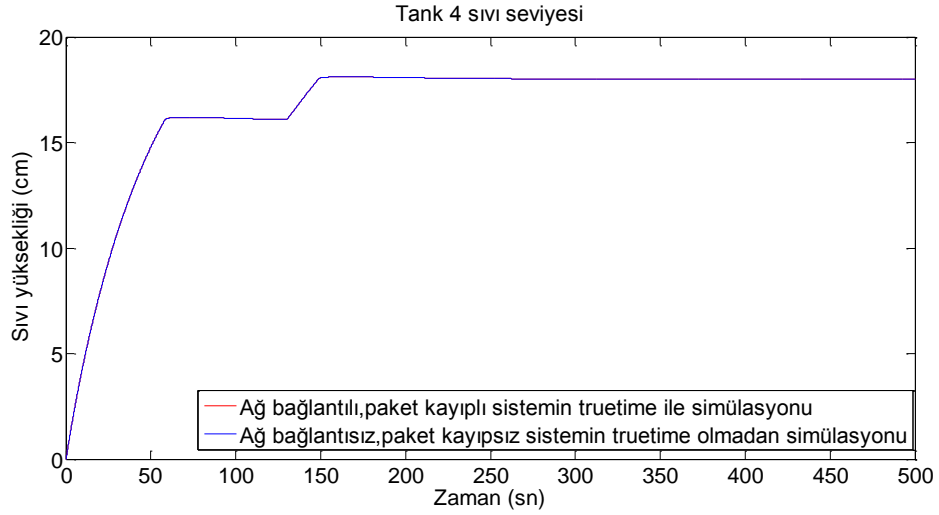
(b)

Şekil 4.2. Minimum fazlı sistemin %10 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu

Şekil 4.3.'de minimum fazlı sistem için ağ bağlantısız ve ağ bağlantısında paket kayıplarının %30'a yükseltildiği durumlardaki MPC kontrolöre ait basamak cevabı verilmiştir.



(a)

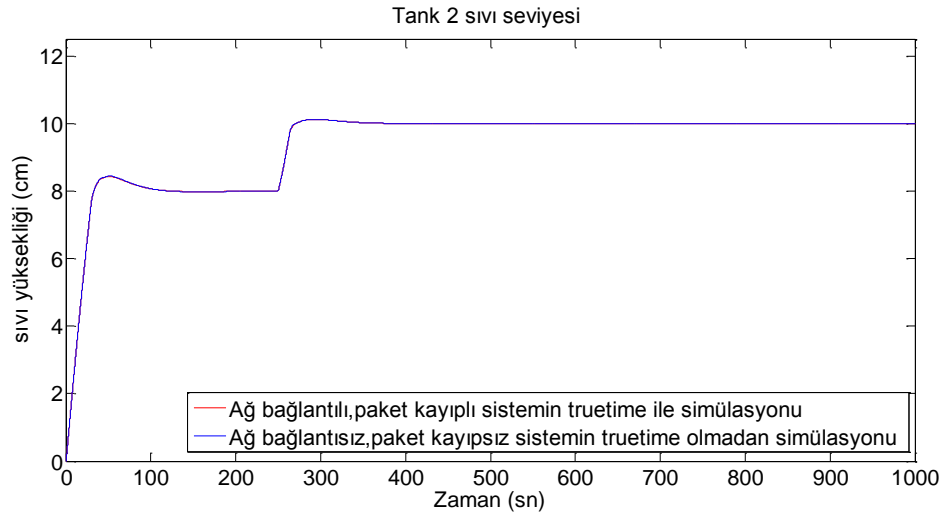


(b)

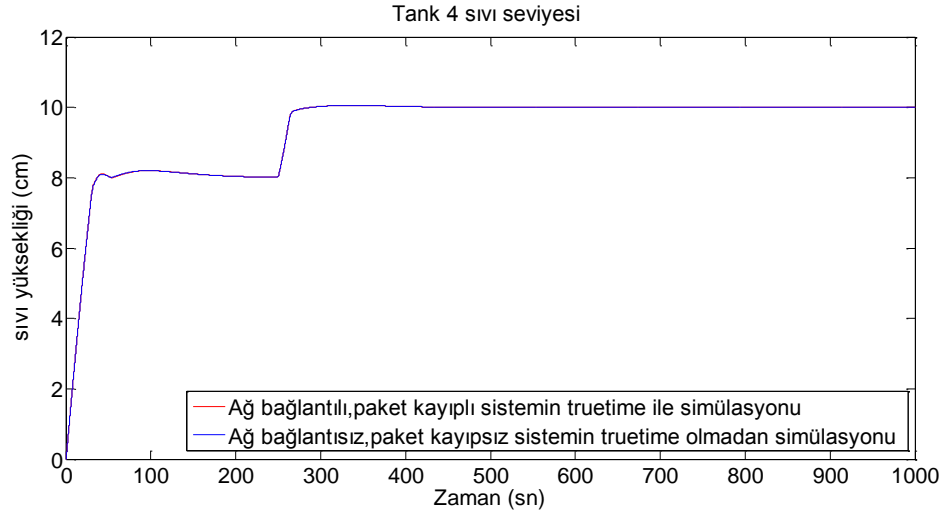
Şekil 4.3. Minimum fazlı sistemin %30 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu

Minimum fazlı durum için Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te gösterilen sonuçlar incelendiğinde paket kaybı olmayan durum ile paket kaybı yaşandığı durumlar arasında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu durumun dörtlü tank sisteminin yavaş dinamiklere sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Minimum fazlı olmayan sisteme ait %10 paket kaybıyla elde edilen sonuçlar Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



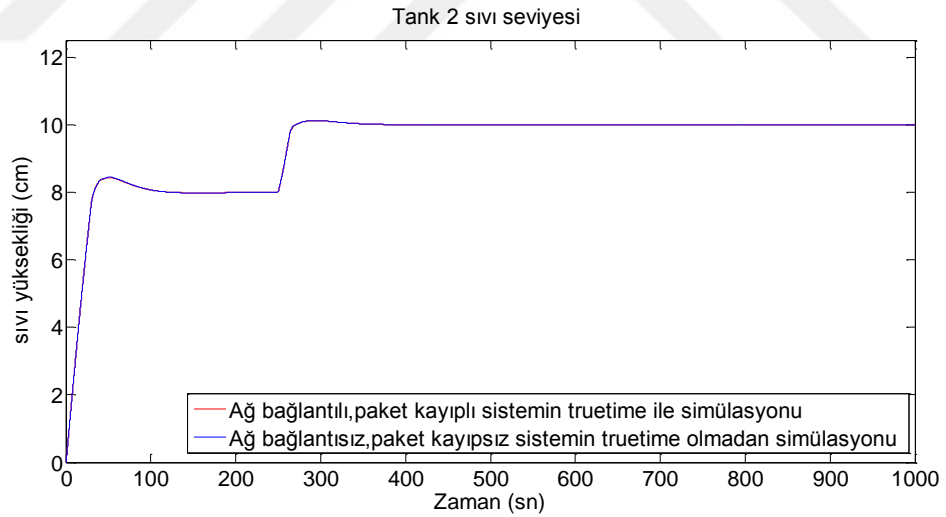
(a)



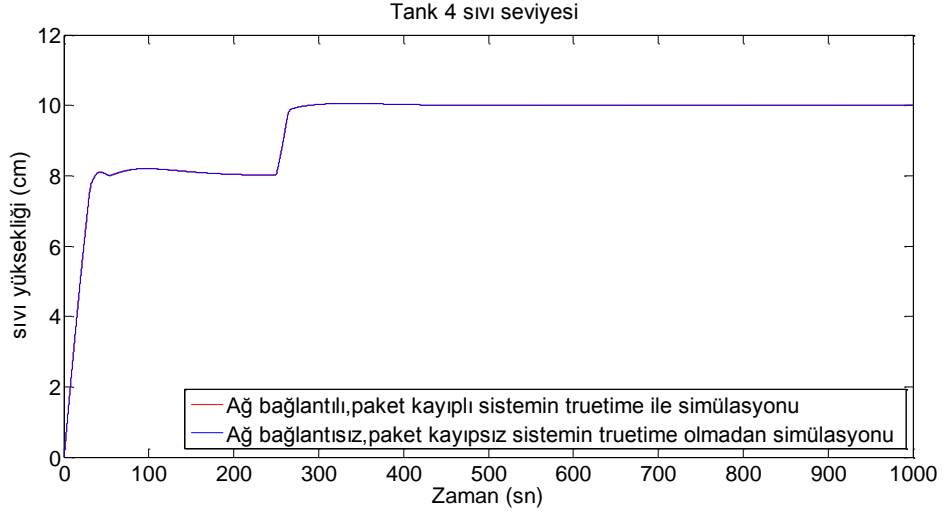
(b)

Şekil 4.4. Minimum fazlı olmayan sistemin %10 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu

Minimum fazlı olmayan sistem için son olarak % 30 paket kaybı yaşanan durum incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.



(a)



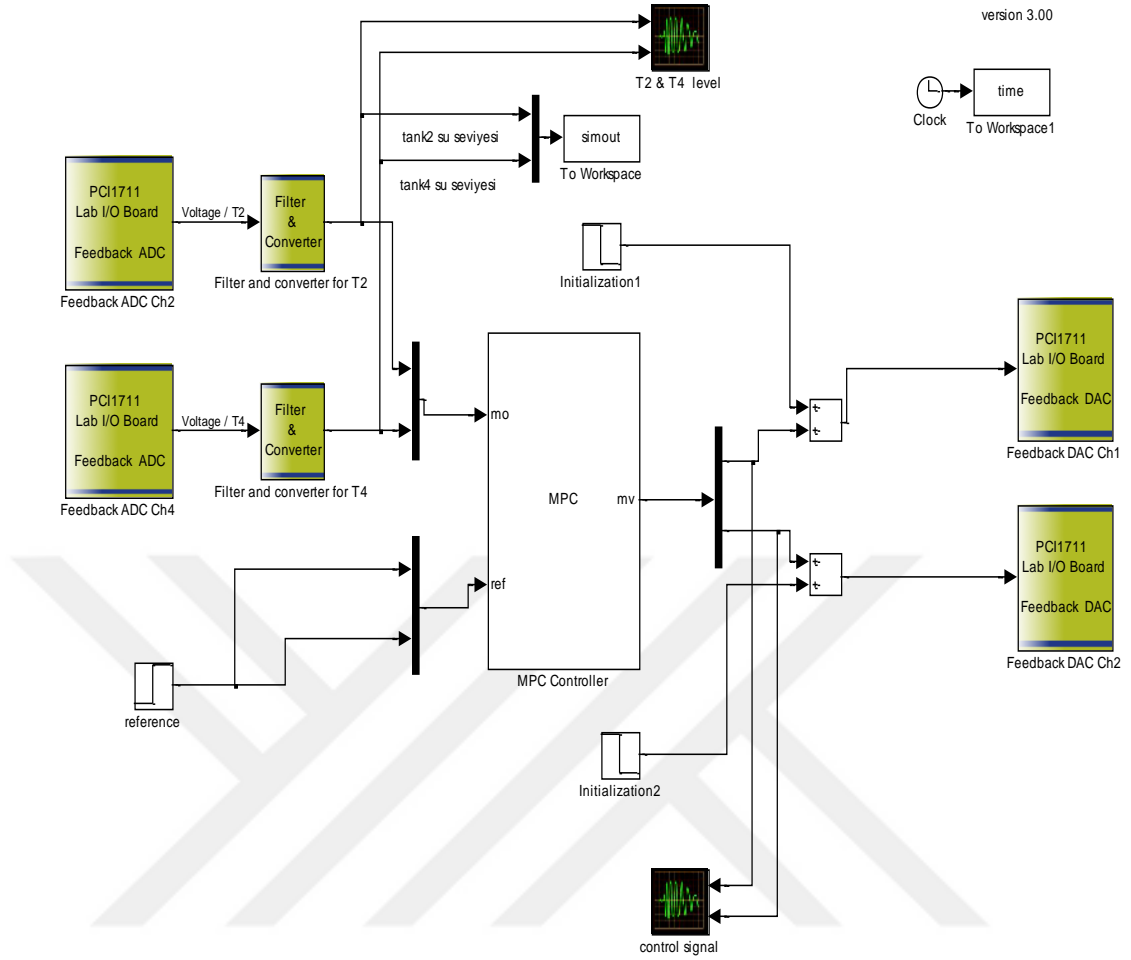
(b)

Şekil 4.5. Minimum fazlı olmayan sistemin % 30 paket kaybıyla truetime simülasyon sonucu

Minimum fazlı olmayan sistem için sonuçlar incelendiğinde minimum fazlı duruma benzer şekilde paket kayıplarının sistem performansında ciddi bir bozulma oluşturmadığı görülmektedir.

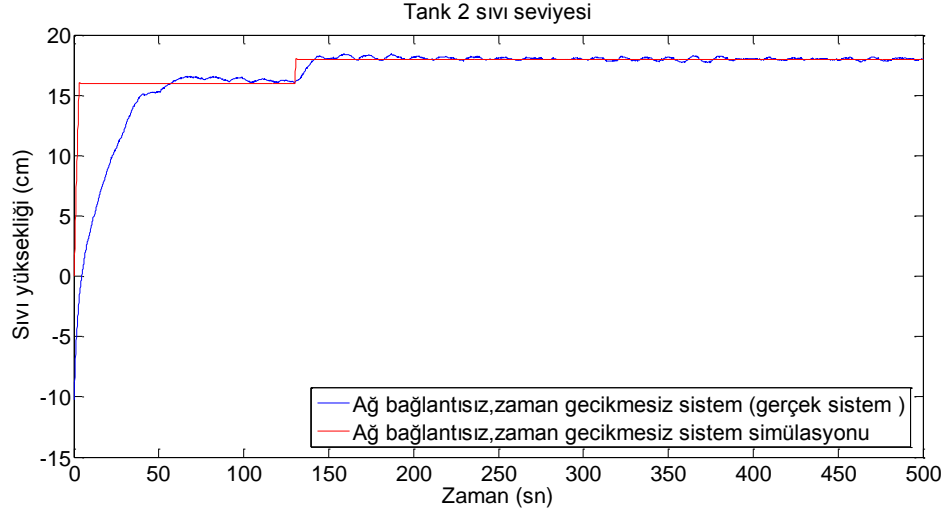
4.2. MİNİMUM FAZLI SİSTEMİN MPC İLE KONTROLÜ

Bu bölümde öncelikle ağ bağlantısız klasik sistemin kontrolü sağlanmıştır. Sonrasında zaman gecikmesinin 0.5 saniye, 1 saniye ve 2 saniye olduğu farklı durumlarda sistemin ağ bağlantısıyla kontrolü sağlanmıştır. Bu amaçla kullanılan MATLAB/Simulink dosyası Şekil 4.6.'da gösterilmiştir. Sensörlerden alınan bilginin PSUPA kartına oradan da bilgisayara kablolu bağlantı yoluyla ulaştığı durum 'gerçek sistem' olarak adlandırılmıştır.

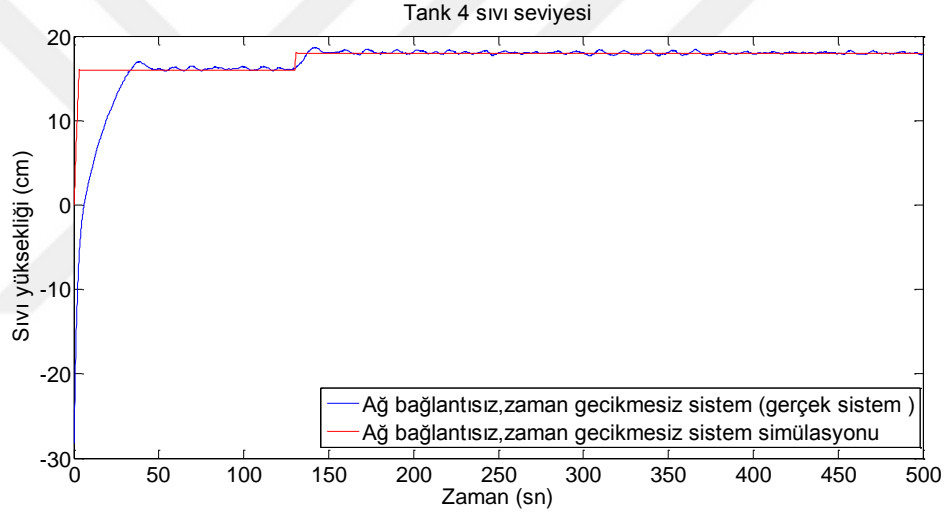


Şekil 4.6. Sistemin kontrolü için kullanılan MATLAB/Simulink dosyası

Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi ilk olarak sistem için doğrusal modelin çalışma noktası olan 16 cm sıvı seviyesi referans olarak seçilmiş ve o nokta etrafında çalışmaya oturduktan sonra 130. saniyede referans 18 cm olarak değiştirilmiş ve basamak fonksiyonu cevabına bakılmıştır. Burada zaman gecikmesi 0 saniye kabul edilmiştir.



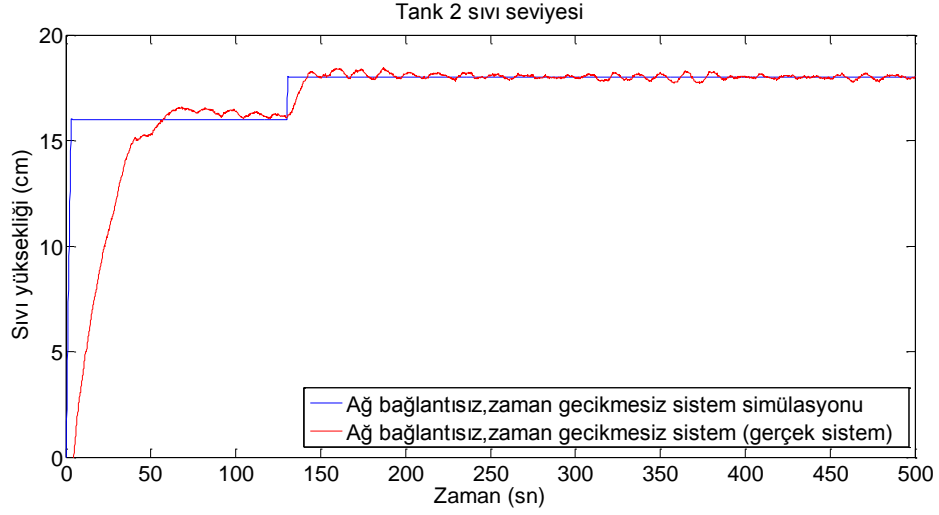
(a)



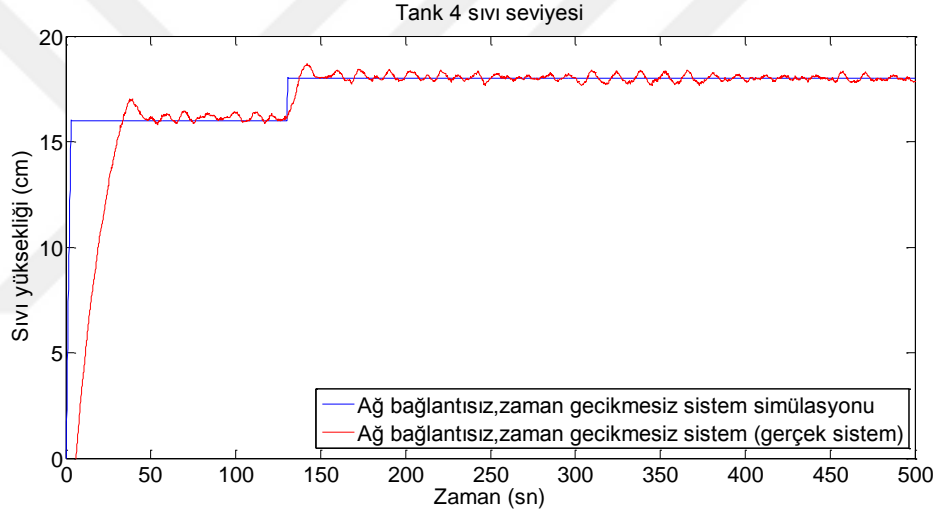
(b)

Şekil 4.7. Minimum fazlı durumun MPC ile denetimi

Şekil 4.8.'de verilen grafik, Şekil 4.7.'de verilen sonuçların görsel olarak daha iyi değerlendirilebilmesi için dikey eksenin (sıvı yüksekliği) 0-20 cm aralığında ölçeklenmiş halidir. Şekil 4.7.'de başlangıçta görülen negatif sıvı yükseklik değerleri tankın boş olması nedeniyle ölçüm filtrelerinden gelen katsayılarından dolayıdır.



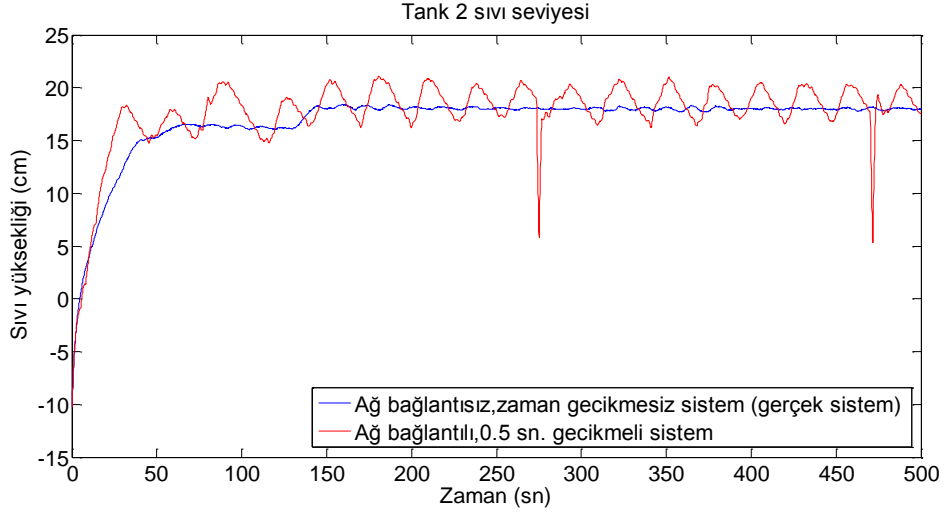
(a)



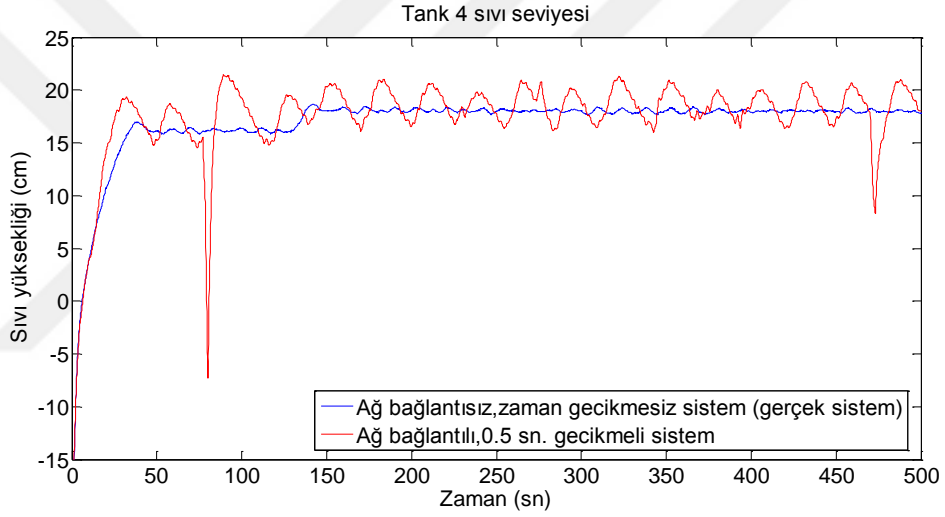
(b)

Şekil 4.8. Minimum fazlı durumun MPC ile denetimi ölçeklendirilmiş sonuçlar

Şekil 4.9.'da gerçek sistem yani zaman gecikmesinin 0 saniye olarak kabul edildiği ve de zaman gecikmesinin 0.5 saniye kabul edildiği iki ayrı durum için aynı MPC'nin cevapları gösterilmiştir. Şekil 4.9.'da görüldüğü üzere sisteme zaman gecikmesi eklendiği durumda zaman gecikmesiz durumdaki kontrolör yetersiz bir performans göstermiştir. Bu sebeple zaman gecikmesi durumu için farklı bir kontrolör tasarlanması gereklidir.



(a)

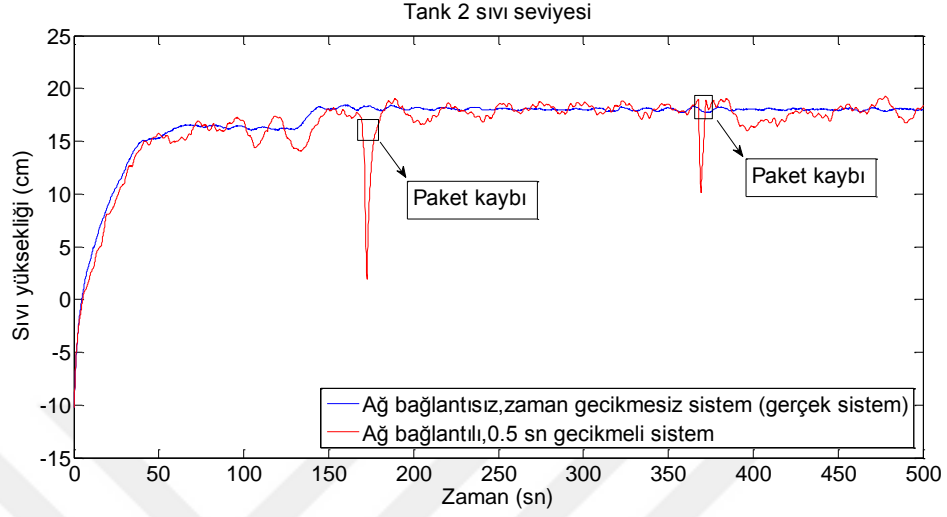


(b)

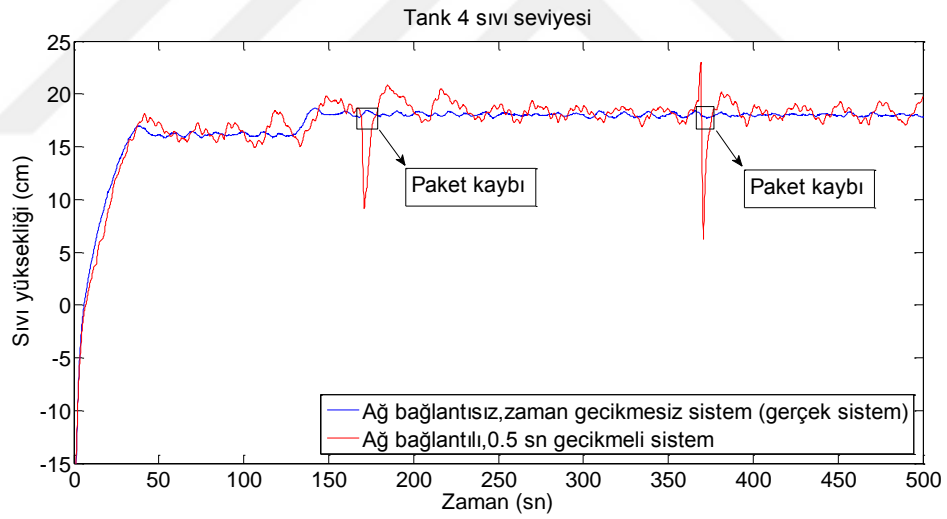
Şekil 4.9. Minimum fazlı durum gerçek sistem ile 0.5 saniye gecikmeli sistem cevabı

Zaman gecikmesinin 0.5 saniye kabul edildiği durum için gecikme, Pade yaklaşımıyla MATLAB ortamında oluşturularak, sistemin zaman gecikmeli transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyonu için farklı bir MPC tasarlanmıştır. Bu tasarlanan MPC sensör bilgilerinin Xbee modülleri aracılığıyla iletildiği ve PSUPA kartına ulaştığı sisteme uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Şekil 4.11. , Şekil 4.10.'da paket kayıpları olarak belirtilen kısımların restore edilmiş halidir. Paket kayıpları yazan kısımlarda sensör verileri çok hızlı bir şekilde yükselmekte veya düşmektedir. Ancak bu durum oluşurken tanklardaki sıvı

seviyelerinin hızlı değişimler göstermediği paket kaybından hemen önceki değer etrafında olduğu gözlenmiştir.

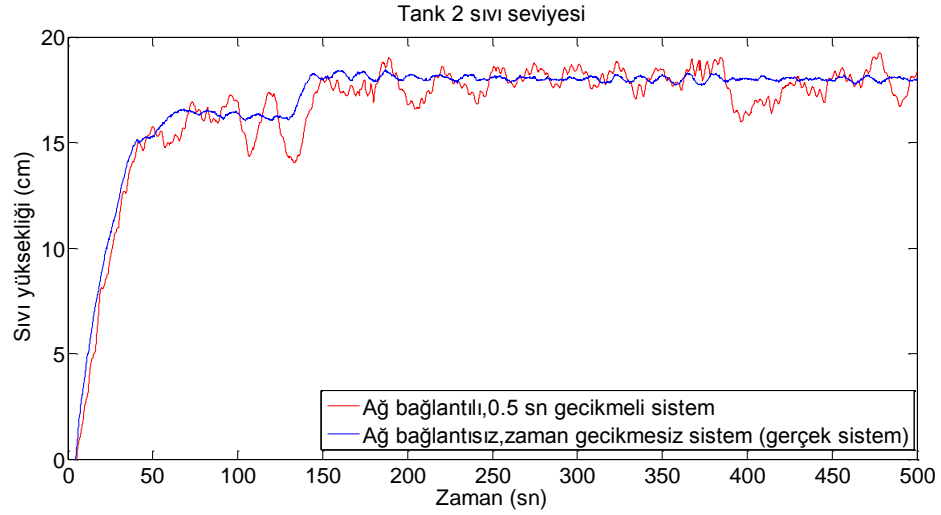


(a)

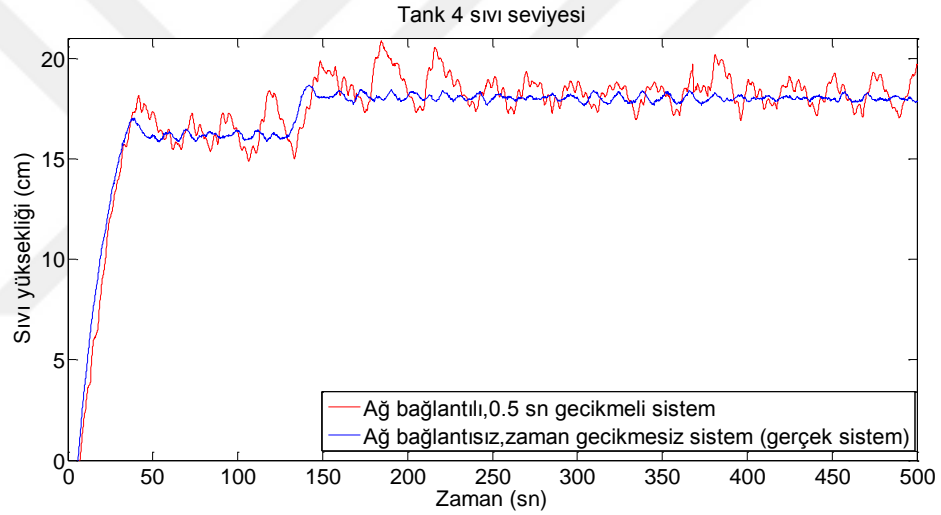


(b)

Şekil 4.10. Minimum fazlı durum 0.5 saniye gecikmeli paket kaybılı sistem



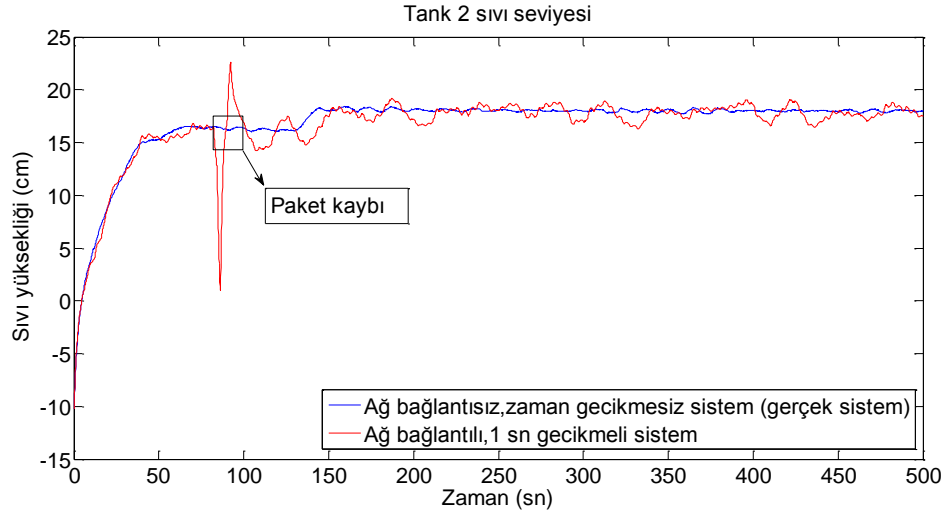
(a)



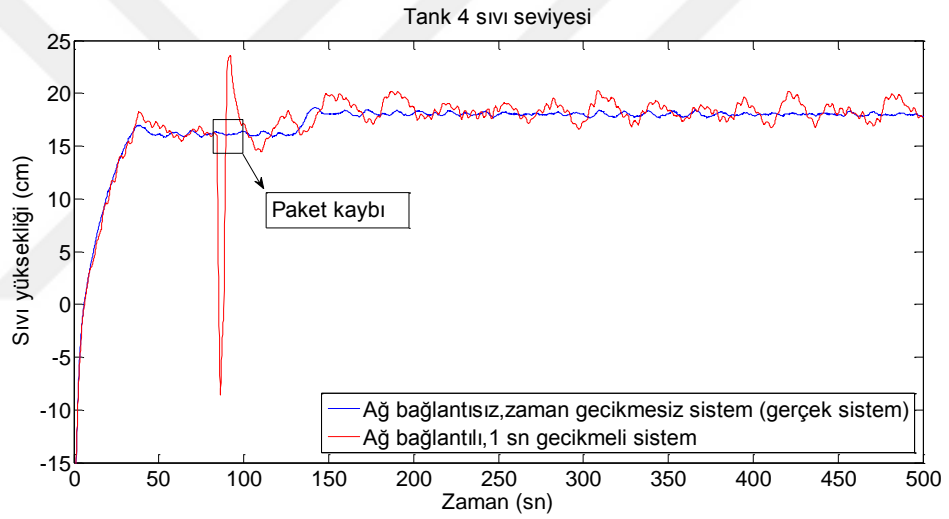
(b)

Şekil 4.11. Minimum fazlı durum 0.5 saniye gecikmeli sistem

Zaman gecikmesinin 0.5 saniye olduğu durum incelendikten sonra 1 saniye kabul edildiği durum incelenmiştir. MATLAB ortamında elde edilen gecikmeli sistemin transfer fonksiyonu kullanılarak bu sistem için farklı bir MPC tasarlanmıştır. Gerçek sistem sonuçları elde edildikten sonra ölçüm verilerinin Xbee'lerle aktarıldığı sistem incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.12.'de ve restore edilmiş haliyle de Şekil 4.13.'de gösterilmektedir.

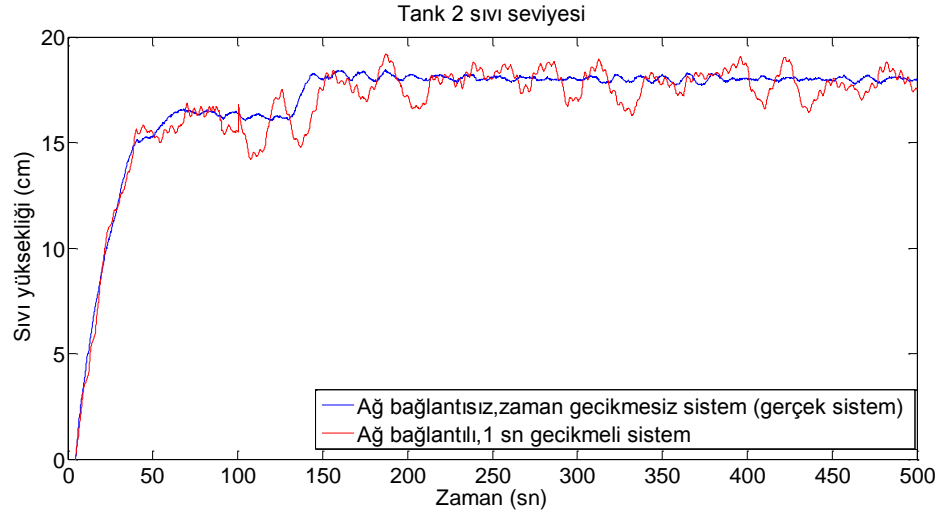


(a)

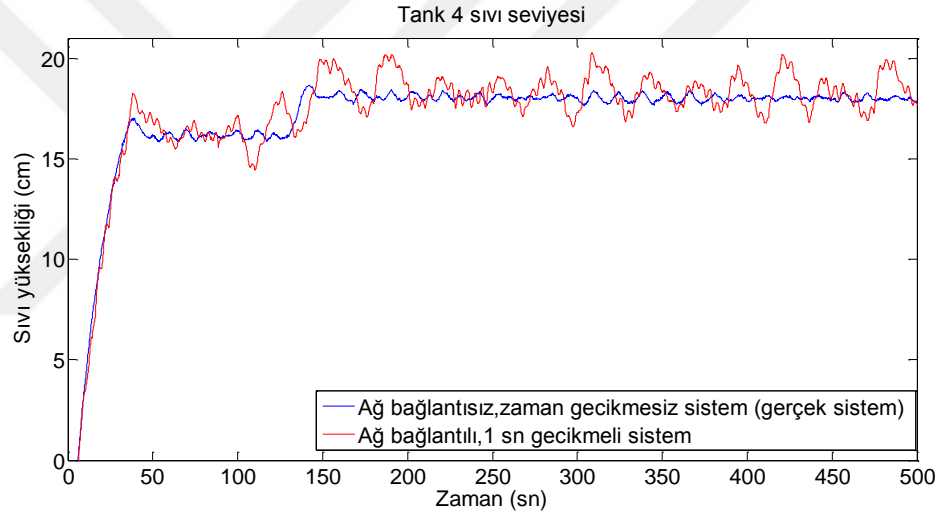


(b)

Şekil 4.12. Minimum fazlı durum 1 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem



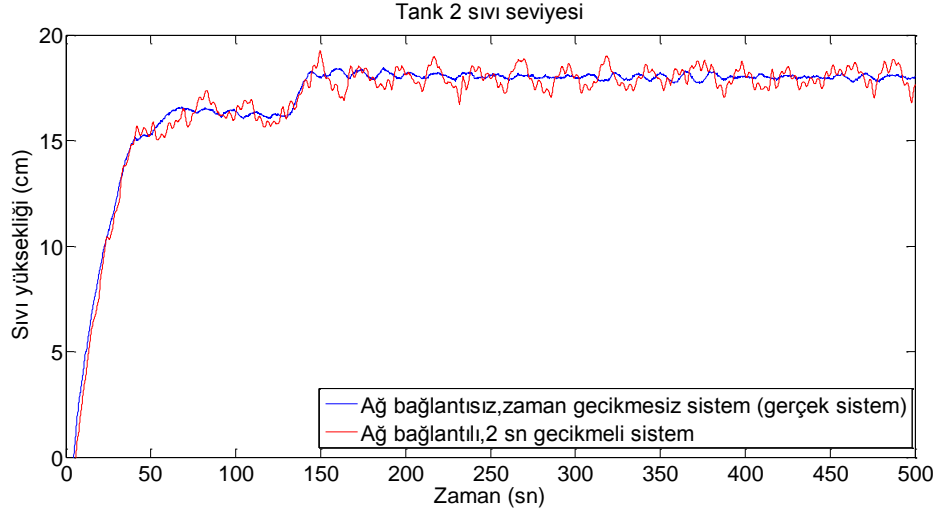
(a)



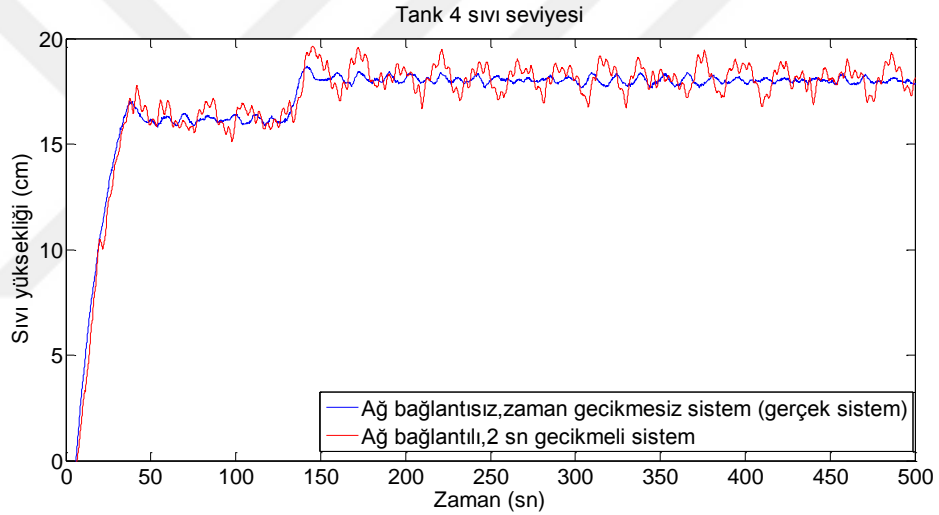
(b)

Şekil 4.13. Minimum fazlı durum 1 saniye gecikmeli sistem

Minimum fazlı durum için son senaryo zaman gecikmesinin 2 saniye kabul edildiği durumdur. Sonuçlar Şekil 4.14.'de gösterilmektedir. Şekil 4.14.'de görüldüğü üzere 2 saniye gecikmeli sistemde paket kaybı görülmemiştir.



(a)



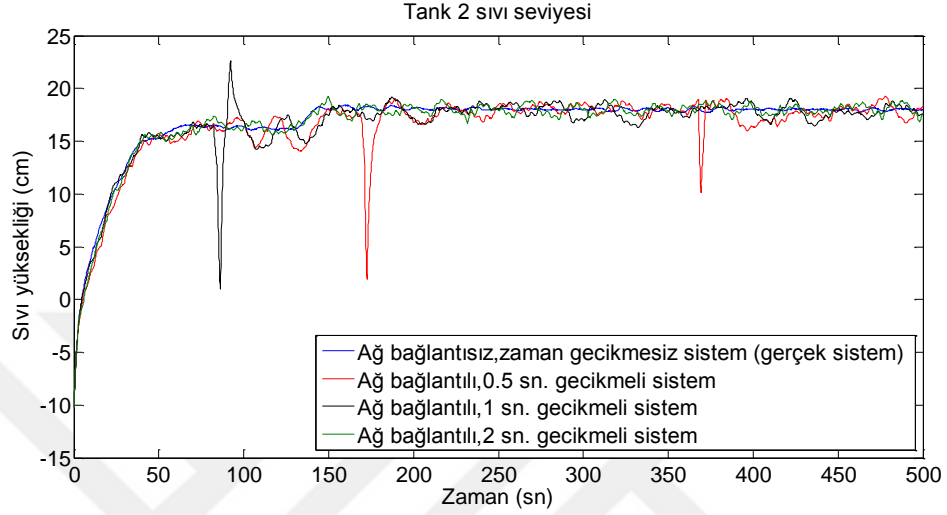
(b)

Şekil 4.14. Minimum fazlı durum 2 saniye gecikmeli sistem

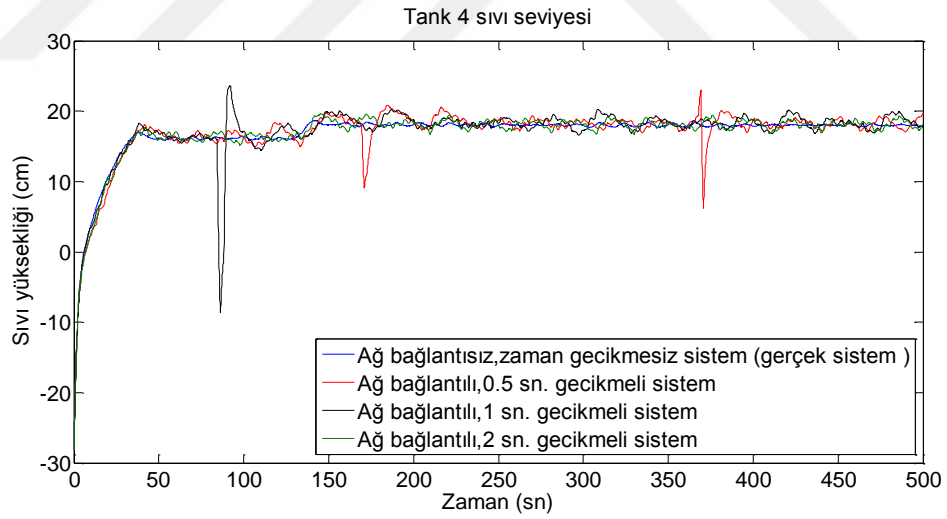
Zaman gecikmesinin etkisine bakıldığında 0.5 saniye gecikmeli sistemin, paket kayıplarının en çok yaşandığı ve maksimum taşma değerlerinin en yüksek olduğu sistem olduğu gözlemlenmiştir. Ağdaki sabit gecikme tampon değeri arttırıldıkça paket kayıpları azalmakta ve çıkış değerlerinin referans sinyali etrafındaki salınım genlikleri azalmaktadır.

Şekil 4.15.'te gerçek sistem ve üç farklı sabit zaman gecikmeli sistemlere ait sonuçlar tek bir grafikte verilmiştir. (c) ve (d) şekilleri sırasıyla (a) ve (b) şekillerinin sıvı yüksekliğinin 0-25 cm aralığında ölçeklenmiş durumlarıdır. Bu değerler, tankın

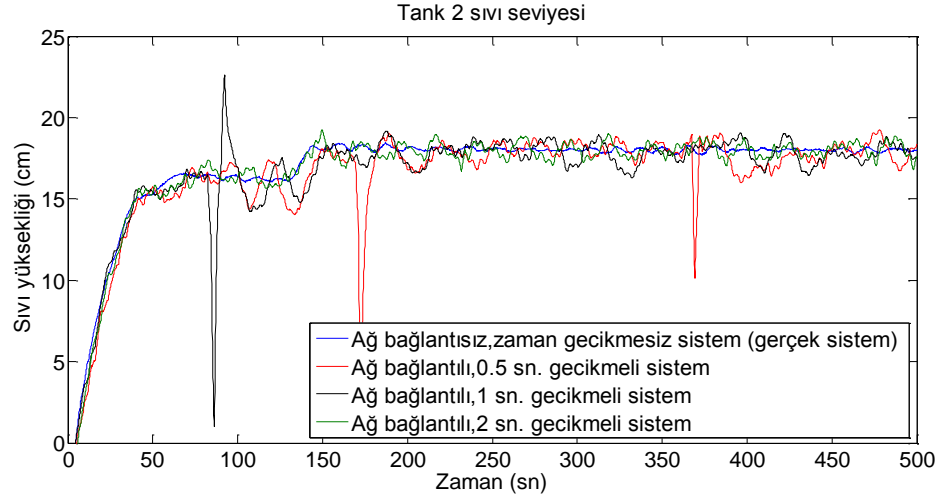
başlangıçta boş olma durumu (0 cm) olduğundan ve tam dolu olma durumuna yakın bir değer olması bakımından (25 cm) seçilmiştir. Herhangi bir taşma durumu yaşanmazken; maksimum 2 cm.lik genlikli bir salınımla sıvı yüksekliğinin 18 cm. seviyesinde tutulması sağlanmıştır.



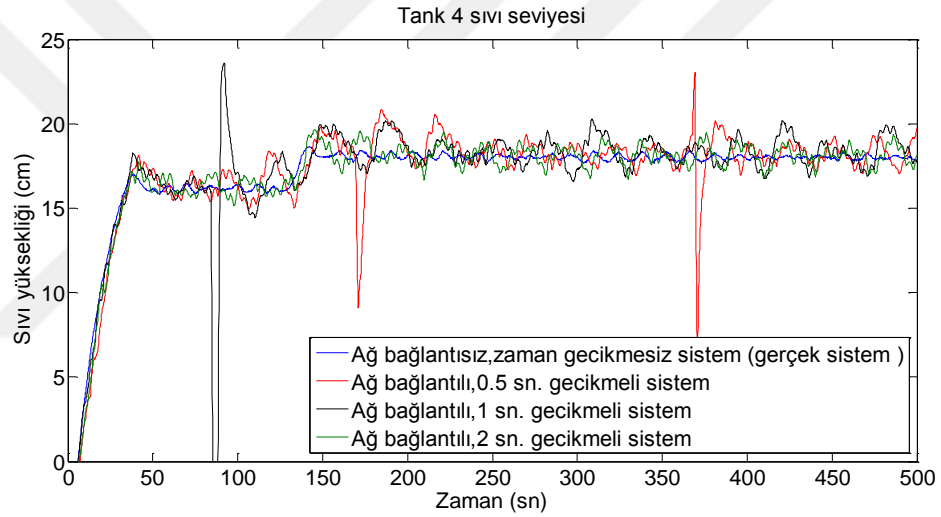
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.15. Minimum fazlı durum üç zaman gecikmesinin karşılaştırılması

Çizelge 4.1.'de minimum fazlı durumun basamak tepkisi parametreleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde ağ bağlantısız sistemin basamak cevabı parametrelerine en yakın değerlerin 2 sn gecikmeli sistemin olduğu görülmektedir.

Zaman Gecikmesi	Tank #	Yükselme Zamanı (t_r) (sn)		Oturma yüksekliği en düşük (h_{smin}) (cm)		Oturma yüksekliği en büyük (h_{smak}) (cm)		Tepe Zamanı (t_p) (sn)	
		GS	ZGS	GS	ZGS	GS	ZGS	GS	ZGS
0.5 sn	2	72.04	667.80	17.68	15.98	18.44	19.25	87.2	378.2
	4	39.33	342.87	17.60	16.92	18.67	20.84	42.1	84.6
1 sn	2	72.04	248.65	17.68	14.77	18.44	19.17	87.2	87.3
	4	39.33	10.01	17.60	16.05	18.67	20.28	42.1	208.7
2 sn	2	72.04	393.53	17.68	16.69	18.44	19.24	87.2	49.9
	4	39.33	395.37	17.60	16.65	18.67	19.65	42.1	45.7

Çizelge 4.1. Minimum fazlı durum basamak tepkisi parametreleri (GS: gerçek sistem, ZGS: zaman gecikmeli sistem)

Çizelge 4.2.'de minimum fazlı durumda ağ bağlantısız sistem ile zaman gecikmeli sistemlere ait basamak cevaplarının sayısal analizi yapılmıştır. Bu işlem için integral mutlak hata (ing. Integral Absolute Error) ölçütü kullanılmıştır. En düşük IAE değeri 2 saniye zaman gecikmeli sistem için elde edilmiştir.

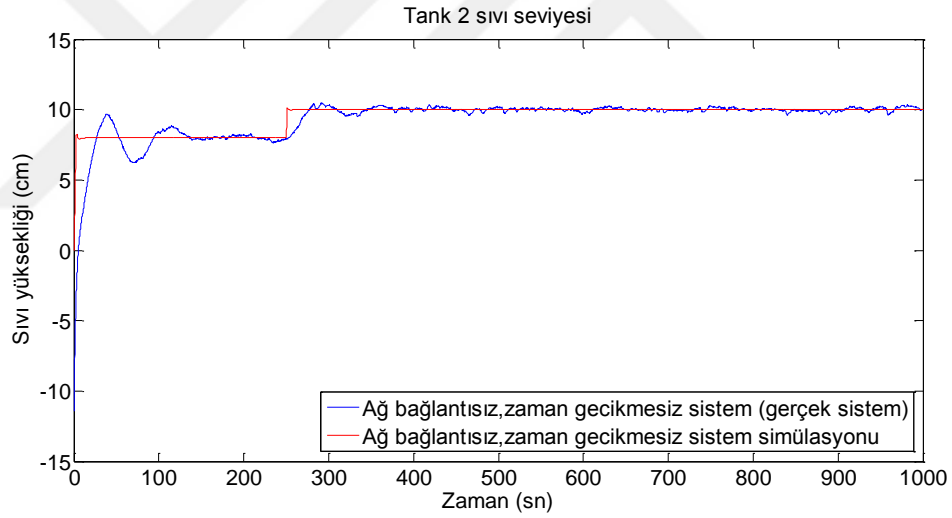
	IAE Değeri	
	Tank 2	Tank 4
0.5 saniye gecikme durumu	2462.33	2902.77
1 saniye gecikme durumu	2471.03	3097.18
2 saniye gecikme durumu	1568.60	2014.45

Çizelge 4.2. Minimum fazlı durum integral mutlak hata (IAE) değerleri

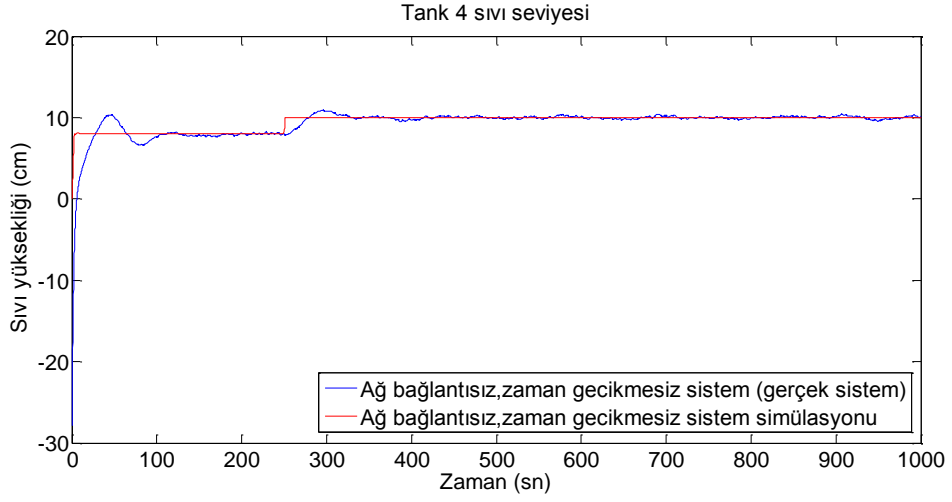
4.3. MİNİMUM FAZLI OLMAYAN SİSTEMİN MPC İLE KONTROLÜ

Minimum fazlı olmayan durum için de Şekil 4.6.'daki MATLAB/Simulink dosyası kullanılmıştır. Minimum fazlı durumda olduğu gibi öncelikle ağ bağlantısı olmaksızın gerçek sistemin kontrolü sağlanmış sonrasında zaman gecikmesinin 0.5 saniye, 1 saniye ve 2 saniye olduğu üç farklı durumda sistemin ağ bağlantısıyla kontrolü sağlanmıştır.

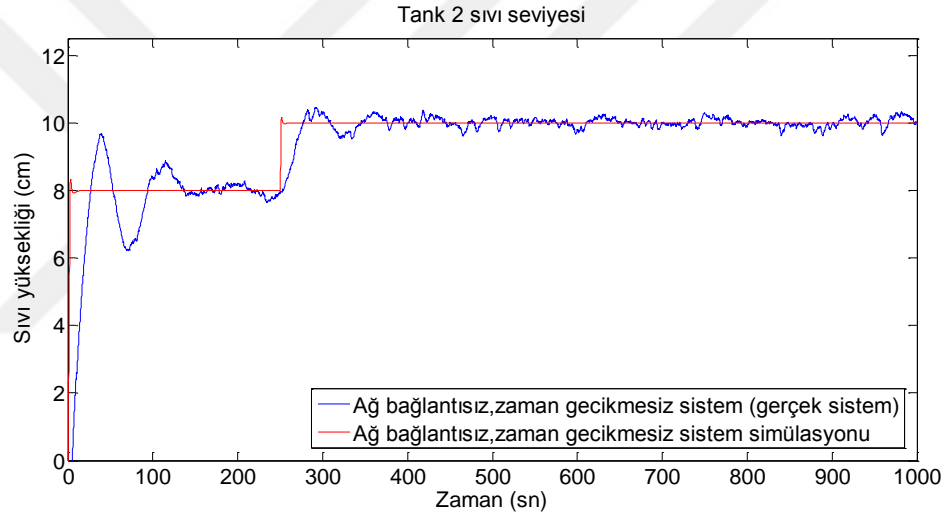
Öncelikle alt tanklardaki sıvı seviyelerinin doğrusal modelin çalışma noktası olan 8 cm yüksekliğine ulaşmaları sağlanmış daha sonra ise 250. saniyede referans sıvı yüksekliği 10 cm olarak değiştirilmiş ve basamak fonksiyonu cevabına bakılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.16.'da görülmektedir. Şekil 4.16. (c) ve (d) sırasıyla Şekil 4.16. (a) ve (b)'nin sıvı seviyesi ekseninin ölçeklenmiş halidir.



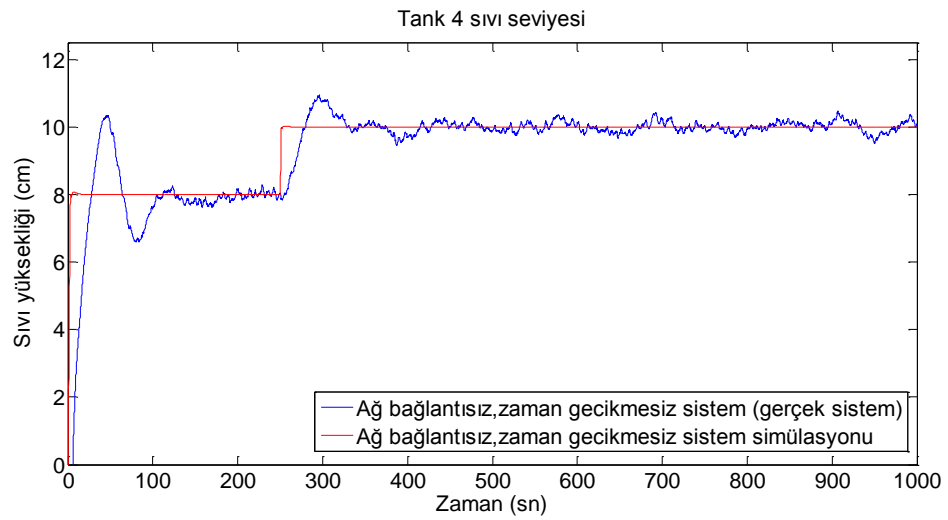
(a)



(b)



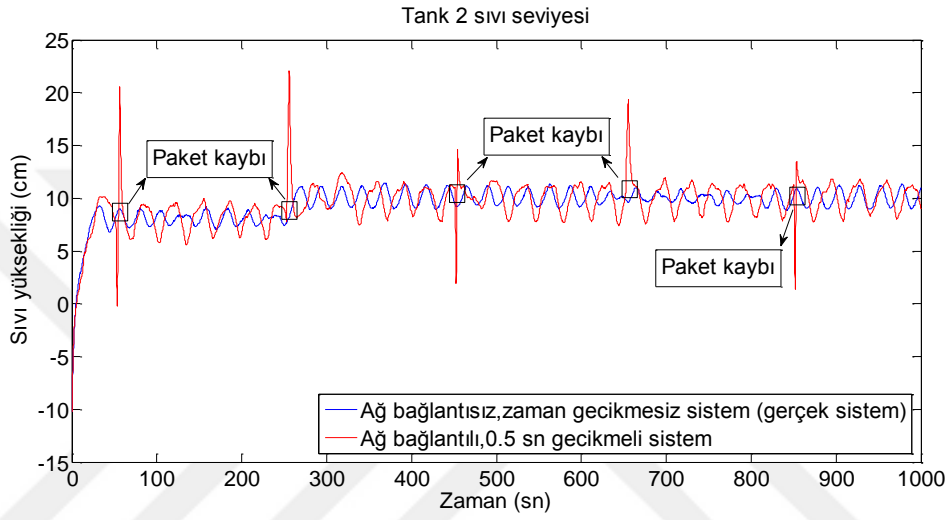
(c)



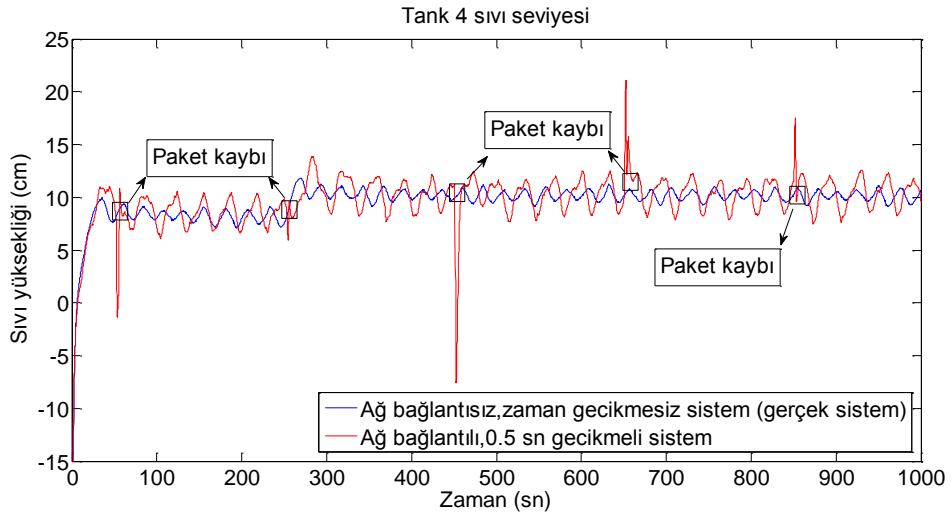
(d)

Şekil 4.16. Minimum fazlı olmayan durumun MPC ile denetimi

İncelenen ilk sistem, zaman gecikmesinin 0.5 saniye kabul edildiği durumdur. Bu sistem için ilk olarak gecikmeli sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiş ve bu model kullanılarak bir MPC tasarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.17. ve paket kayıpları giderilmiş haliyle Şekil 4.18.'de gösterilmektedir.

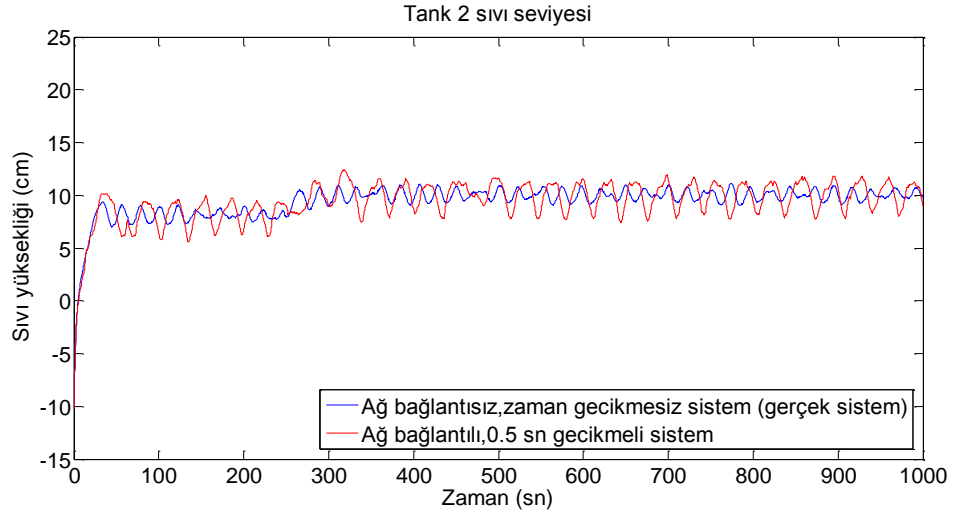


(a)

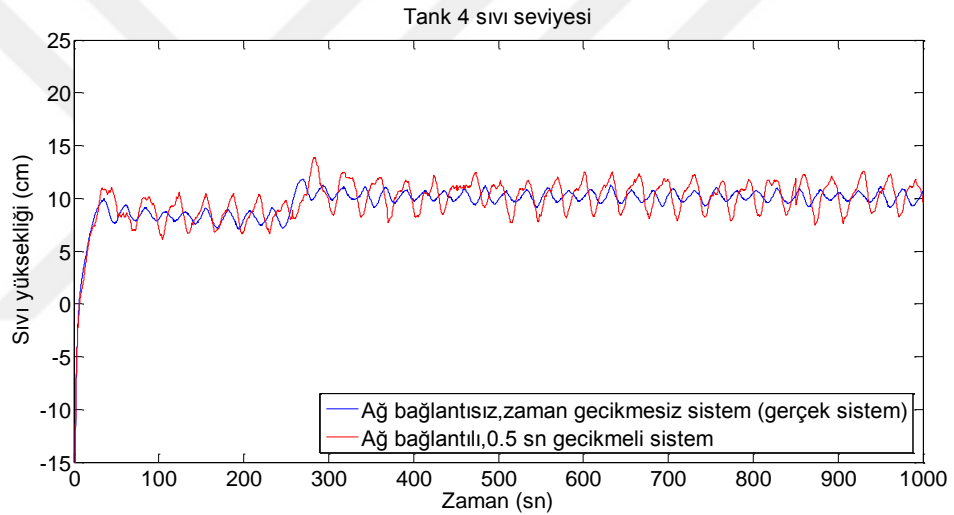


(b)

Şekil 4.17. Minimum fazlı olmayan 0.5 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem



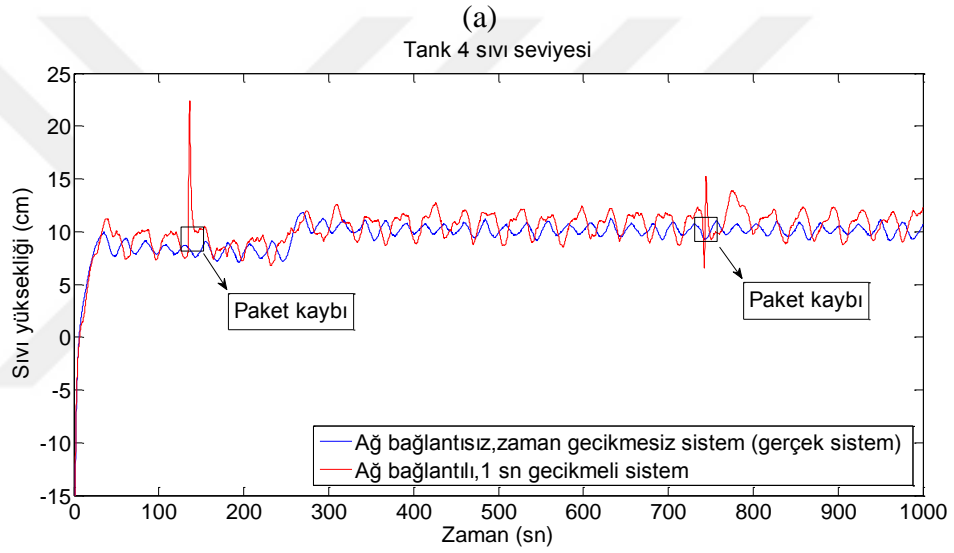
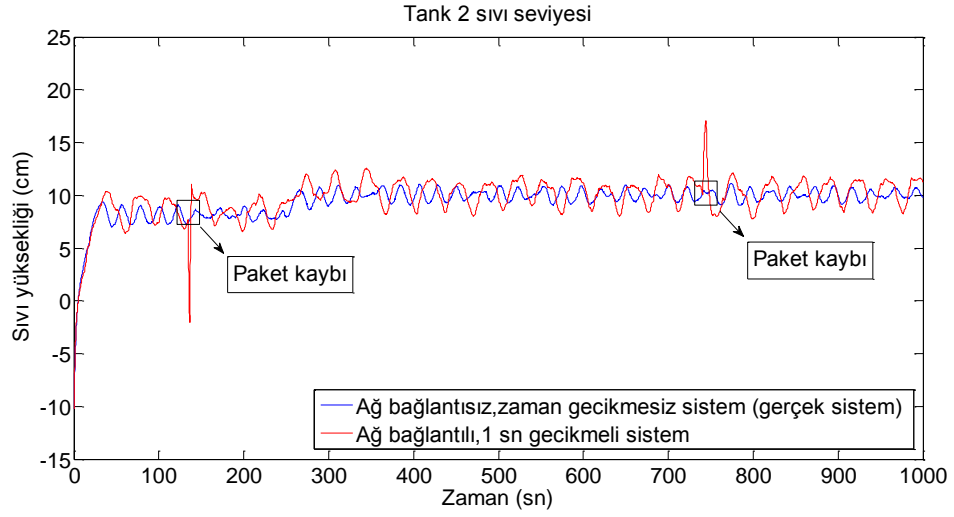
(a)



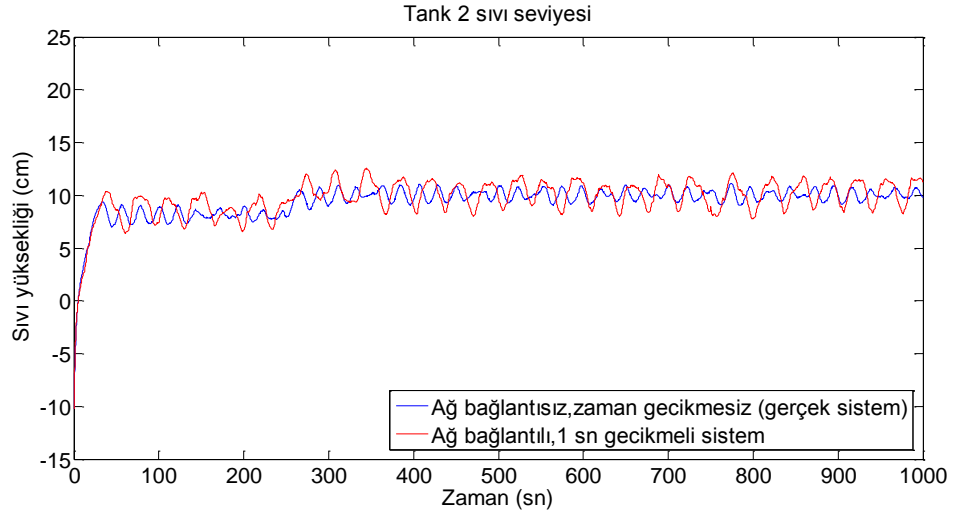
(b)

Şekil 4.18. Minimum fazlı olmayan 0.5 saniye gecikmeli sistem

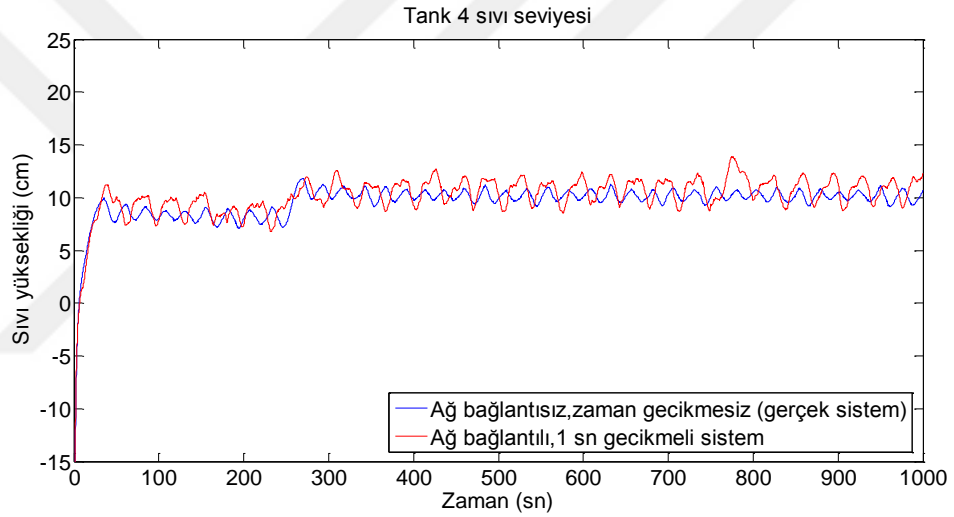
İkinci olarak zaman gecikmesinin 1 saniye kabul edildiği sistem incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.19.'da gösterilmektedir. Bu sistemde paket kayıpları, bir önceki model olan 0.5 saniye gecikmeli sisteme oranla daha az yaşanmıştır. Şekil 4.20.'de Şekil 4.19.'da paket kaybı olarak gösterilen kısımların restore edilmesiyle yapılmış sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.19. Minimum fazlı olmayan durum 1 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem



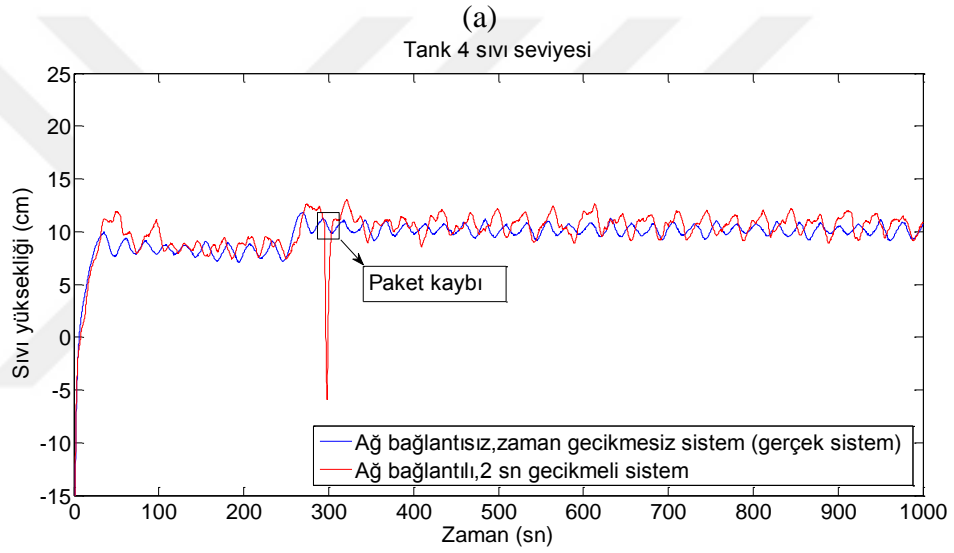
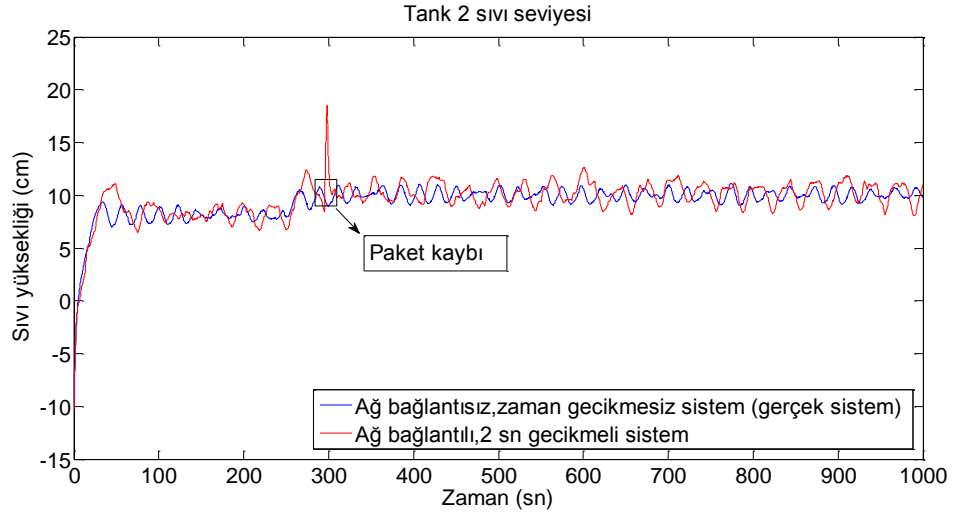
(a)



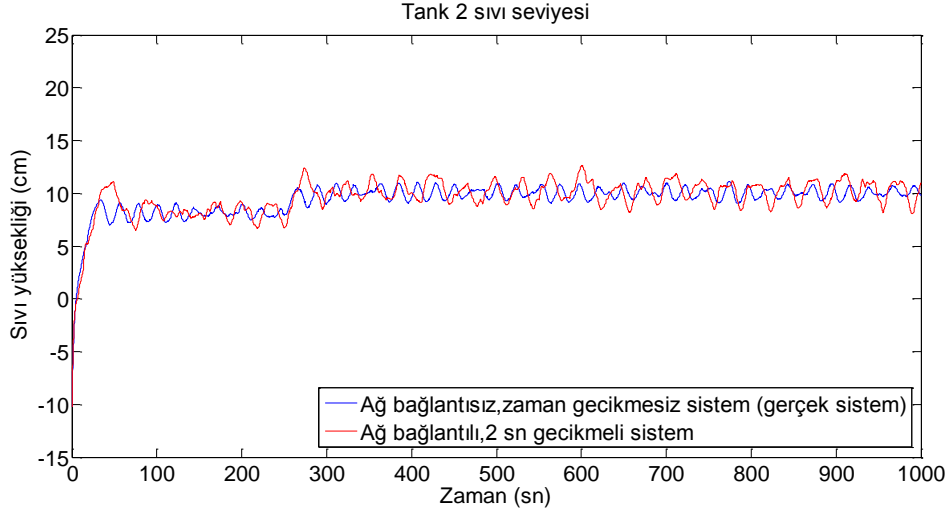
(b)

Şekil 4.20. Minimum fazlı olmayan durum 1 saniye gecikmeli sistem

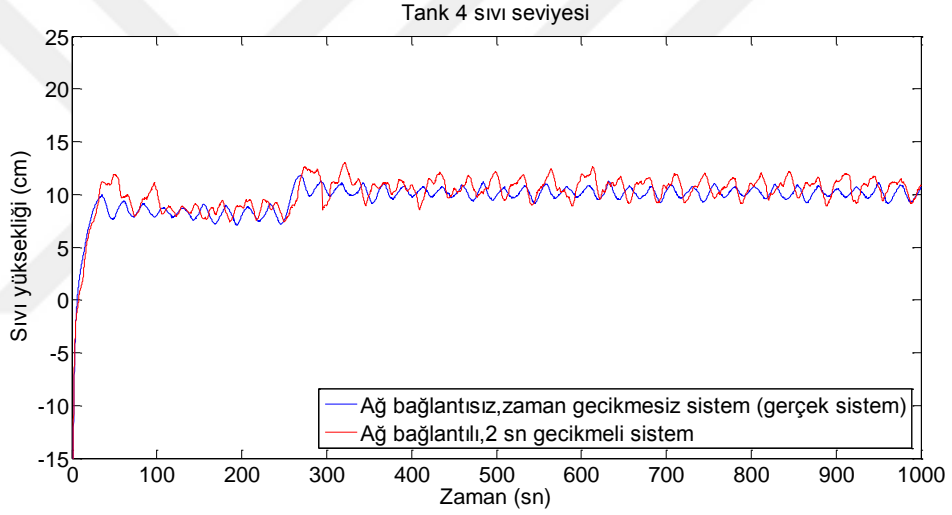
Zaman gecikmesinin 2 saniye kabul edildiği sisteme ait deneysel sonuçlar Şekil 4.21.'de gösterilmektedir. Paket kaybının çok azaldığı 2 saniye gecikmeli sistem için paket kayıplarının düzeltilmesiyle elde edilen sonuçlar Şekil 4.22.'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Minimum fazlı olmayan, 2 saniye gecikmeli paket kayıplı sistem



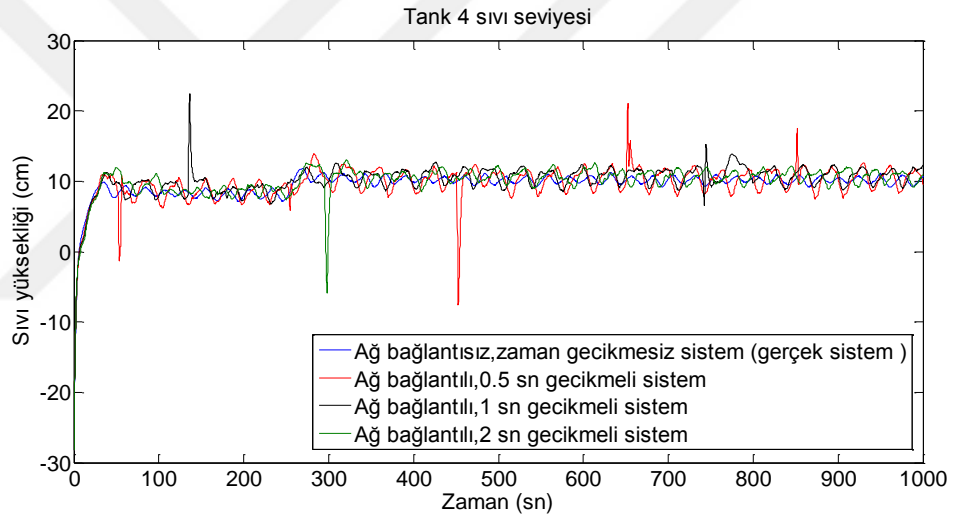
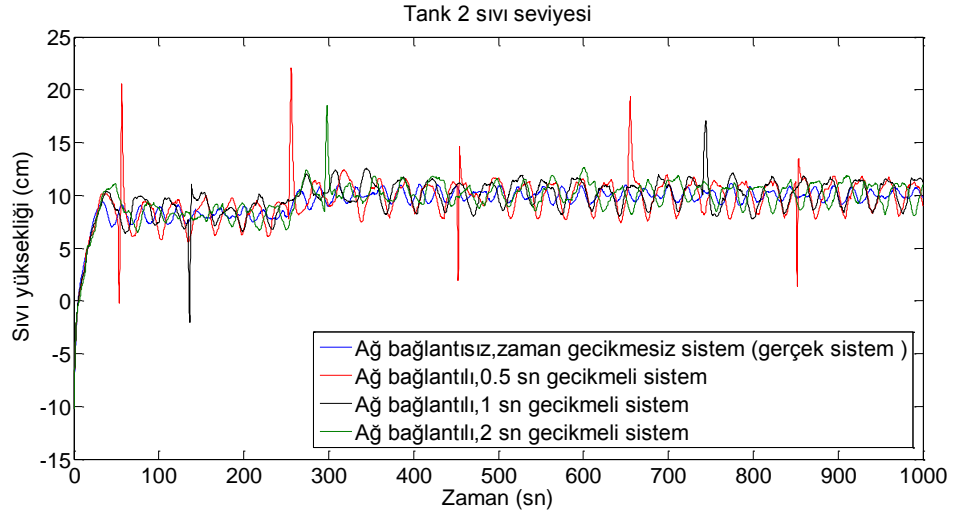
(a)

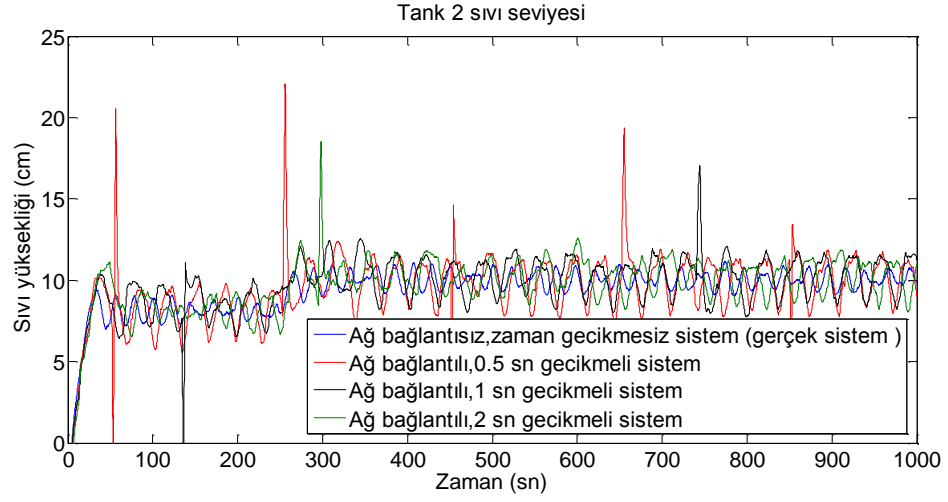


(b)

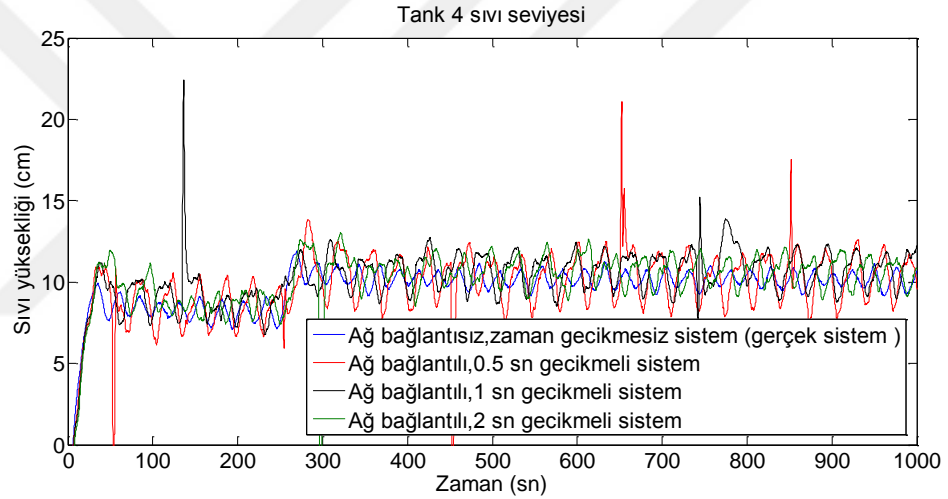
Şekil 4.22. Minimum fazlı olmayan, 2 saniye gecikmeli sistem

Şekil 4.23.'te minimum fazlı olmayan durum için gerçek sistem ve üç farklı zaman gecikmeli sistemlere ait basamak cevapları üst üste tek bir şekilde gösterilmiştir. Sonuçların daha net görülebilmesi için sıvı yüksekliği olan düşey eksen yeniden ölçeklendirilmiştir. Şekil 4.23. (c) ve (d) sırasıyla Şekil 4.23. (a) ve (b)'nin sıvı yükseklikleri 0-25 cm aralığında ölçeklenmiş durumudur.





(c)



(d)

Şekil 4.23. Minimum fazlı olmayan durum üç zaman gecikmesinin karşılaştırılması

Çizelge 4.3.'de minimum fazlı olmayan durumun basamak tepkisi parametreleri verilmiştir. Yükselme zamanı ve tepe zamanı değerleri incelendiğinde ağ bağlantısız sisteme performans olarak en yakın olan sistemin, 2 sn sabit gecikme tamponu ekli olan sistem olduğu görülmektedir.

Zaman Gecikmesi	Tank #	Yükselme Zamanı (t_r) (sn)		Oturma yüksekliği en düşük (h_{smin}) (cm)		Oturma yüksekliği en büyük (h_{smak}) (cm)		Tepe Zamanı (t_p) (sn)	
		GS	ZGS	GS	ZGS	GS	ZGS	GS	ZGS
0.5 sn	2	28.20	101.77	8.59	6.11	11.15	12.39	574.2	118.3
	4	584.56	120.51	9.14	6.62	11.88	13.84	69.9	83.1
1 sn	2	28.20	666.84	8.59	7.73	11.15	12.53	574.2	144.3
	4	584.56	713.45	9.14	8.52	11.88	13.88	69.9	575.4
2 sn	2	28.20	82.18	8.59	8.05	11.15	12.61	574.2	401.5
	4	584.56	635.02	9.14	8.52	11.88	13.05	69.9	121.5

Çizelge 4.3. Minimum fazlı olmayan durum basamak tepkisi parametreleri (GS: gerçek sistem, ZGS: zaman gecikmeli sistem)

Çizelge 4.4.'de minimum fazlı olmayan durumda zaman gecikmesiz sistem ile zaman gecikmeli sistemlere ait basamak cevaplarının IAE ölçütü ile değerlendirilmesi verilmiştir. Minimum fazlı durumda olduğu gibi minimum fazlı olmayan durumda da en düşük IAE değeri 2 saniye zaman gecikmeli sistem için bulunmuştur.

	IAE Değeri	
	Tank 2	Tank 4
0.5 saniye gecikme durumu	8628.40	9552.27
1 saniye gecikme durumu	8271.93	8963.74
2 saniye gecikme durumu	7254.47	7276.46

Çizelge 4.4. Minimum fazlı olmayan durum integral mutlak hata (IAE) analizi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında dörtlü tank sisteminin minimum fazlı ve minimum fazlı olmayan durumlarının MPC ve Xbee modülleriyle oluşturulan ağ üzerinden kontrolü incelenmiştir. Ağ bağlantılı kontrolde karşılaşılan zorluklardan bir tanesi olan değişken zaman gecikmesi altında sistemin performansı incelenmiştir. Oluşturulan düzenekte değişken zaman gecikmeleri tampon kullanılarak sabit zaman gecikmesine dönüştürülmüştür. Sabit zaman gecikmelerinin 0.5, 1 ve 2 saniye olarak kabul edildiği durumlar ele alınmıştır. Her bir zaman gecikmesi, Pade yaklaşımı ile dörtlü tank sistemi transfer fonksiyonuna eklenmiş ve böylelikle zaman gecikmeli transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Zaman gecikmeli sistem modelleri için MPC'ler tasarlanmış ve bu kontrolörlerin performansları ağ bağlantısının olmadığı durum ile karşılaştırılmıştır. Alınan deneysel sonuçlar incelendiğinde, zaman gecikmesinin 2 saniye kabul edildiği ağ bağlantılı durum ile ağ bağlantısının olmadığı kablolu duruma ait basamak tepkilerinin birbirine çok yakın çıktıkları gözlemlenmiştir. Böylece MPC'nin, ağ tabanlı kontrol sistemlerinde zaman gecikmesinin sistem transfer fonksiyonuna eklenmesi durumunda etkili sonuçlar verebildikleri söylenebilir.

Ağ bağlantısında paket kayıplarının etkisine benzetimsel olarak MATLAB ve Trutime eklentisi yardımı ile bakılmıştır. Paket kayıplarının % 10 ve % 30 olduğu durumlar incelenmiş ve her iki durumda da MPC'nin yeterli performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Paket kayıplarının deneysel olarak incelenmesi daha sonraki araştırmalara bırakılmıştır.

Minimum fazlı olmayan durumun kontrolü minimum fazlı duruma göre daha zordur. Minimum fazlı olmayan durumda referans etrafındaki salınımlar minimum fazlı duruma oranla daha fazla olmaktadır ve sistem daha uzun sürede referans noktasına oturmaktadır. Kontrolör tasarımında minimum fazlı olmayan sistem için tahmin ufkunun arttırılması ve kontrolör tepki hızının azaltılması sonuçları olumlu etkimiştir.

Kullanılan MPC'nin hızının azaltılması basamak cevabındaki taşmaları azaltmaktadır. Tahmin ufkunun arttırılması, sistemin gelecek değerlerinin daha az sapmayla tahmin edilmesi anlamına geldiğinden belli bir noktaya kadar performansa olumlu katkı sağlamıştır. Ancak tahmin ufkunun çok fazla arttırılması sistemin

öngörülen gelecek değerlerinin hesaplanması işlemi için geçen süreyi uzattığından performansı olumsuz etkilemiştir.

Zaman gecikmelerinin sabitleştirilmesi için eklenen tamponun değerinin azaltılması paket kayıplarına neden olmaktadır. Zaman gecikmesi için seçilen en küçük değerde en fazla paket kaybı olduğu gözlenmiştir. Paket kayıplarının minimum fazlı olmayan durumda daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Gelecekte bu konunun devamı ile ilgili farklı çalışmalar yapılabilecektir. Mesela bu tezde kullanılan noktadan noktaya (ing. point to point) ağ mimarisinden farklı bir mimari yapısı oluşturulabilir. Örneğin bir örgü ağ (ing. mesh network) mimarisiyle, ağa eklenecek yeni Xbee modülü sisteme rastgele bilgi göndererek bozucu etki oluşturulabilir. Yapılabilecek bir diğer çalışma örneği ise; zaman gecikmelerinin yanı sıra paket kayıplarının da belirlenen oranda yaşatıldığı durumda sistem incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Giraldo, J. ,A. , Quijano, N. , “Current Results and Research Trends in Networked Control Systems”, Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC), 1 – 6,(2011).
- [2] Cantoni, M. , Weyer,E.,Li,Y., Ooi,S.K., Mareels,I., Ryan,M., “Control of Large-Scale Irrigation Networks” , Proceedings of the IEEE, vol.95-1, 75 - 91 , (2007).
- [3] Gaid, M.E. M.B. , Cela, A. , Hamam, Y. , “Optimal integrated control and scheduling of networked control systems with communication constraints: application to a car suspension system,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 14, no. 4, pp. 776-787, (2006).
- [4] Sivaranjani, S. , Thukaram, D. ,“A Networked Control Systems Perspective for Wide-Area Monitoring Control of Smart Power Grids”, 2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies- Asia (ISGT Asia), 1 – 6, (2013).
- [5] Zhang, C. , Peng, C. , Zhang, J. , Zhang, H. , “Communication and Control of Wide-Area Power Systems: A Survey ”, Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, 6826-6831 ,(2015).
- [6] Sun, W. ,Yu, F.R. , Tang, T. ,Bu, B. ,“Energy-Efficient Communication-Based Train Control Systems With Packet Delay and Loss” IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, vol. 17-2, (2016).
- [7] Kalman, R.E., “Contributions to the theory of optimal control”, Bulletin de la Societe Mathematique de Mexicana, 5, 102–119, (1960).
- [8] Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., Papon, J. “Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes”, Automatica, 14, 413–428, (1978).
- [9] Cutler, C.R., Ramaker, B.L., “Dynamic matrix control - a computer control algorithm”, Proceedings of the Joint Automatic Control Conference, San Francisco, (1980).
- [10] Clarke, D. W., Mohtadi, C., Tuffs, P. S.,”Generalized predictive control— Part I. The basic algorithm”, Automatica, 23(2), 137–148, (1987).

- [11] Camacho, E. F. and Bordons, C., “Model Predictive Control 2nd ed”, Springer, London, (2004).
- [12] 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).
- [13] Prusty, S. B., Pati, U.C., Mahapatra, K. K. , “A Novel Fuzzy based Adaptive Control of the Four Tank System”, Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), Third International Conference on, 1-6 ,(2015).
- [14] Gatzke, E.P., Meadows, E.S., Wang, C., Doyle III F.J., “Model based control of a four-tank system ” , Computers and Chemical Engineering (24) , 1503-1509, (2000).
- [15] Vadigepalli, R., Gatzke, E. P., Doyle III F. J., “Robust Control of a Multivariable Experimental Four-Tank System” ,Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 40, No. 8, 1916-1927, (2001).
- [16] Alvarado, I., Limona, D., Muñoz de la Peñaa, D., Maestrea, J.M., Ridaoa, M.A., Scheub, H., Marquardt, W., Negenborn, R.R., De Schutter, B., Valenciad, F., Espinosa, J., “A comparative analysis of distributed MPC techniques applied to the HD-MPC four-tank benchmark”, Journal of Process Control 21, 800–815, (2011).
- [17] Abedi, M., Yaghoobi, M., Raesian, N., “Optimization of Model Predictive Controller Parameters Based on Imperialist Competitive Algorithm”, 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) , 1-5, (2013).
- [18] Dadhich, S., Birk, W., “Analysis and Control of an Extended Quadruple Tank Process”, European Control Conference (ECC), 838 - 843, (2014).
- [19] Lagos, B., Karelavic, P., Cipriano, A., “Performance Evaluation of a Distributed Hybrid MPC Strategy Applied to the Four-Tank System”, International Federation of Automatic Control, 573-578, (2015).
- [20] Goutan, H., Said, S.H., M’sahli, F., “Model-based Predictive and Back stepping controllers for a state coupled four-tank system with bounded control inputs: A comparative study” ,Journal of the Franklin Institute, 4864–4889 (2015).

- [21] Zhou, X., Li, C., Huang, T., Xiao, M., “Fast gradient-based distributed optimisation approach for model predictive control and application in four-tank benchmark”, IET Control Theory& Applications, Vol. 9, Iss. 10, 1579–1586, (2015).
- [22] Li, C., Yu, X., Huang, T., Chen, G., He, X., “A Generalized Hopfield Network for Nonsmooth Constrained Convex Optimization Lie Derivative Approach”, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 27, No. 2, (2016).
- [23] Askari, M., Moghavvemi, M., Almurib, H. A. F., Muttaqi, K. M., “Multivariable Offset-Free Model Predictive Control for Quadruple Tanks System”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, NO. 2, 1882-1890, (2016).
- [24] Li, X.J., Shao, X., Ling, K.V., Soong, B. H., “Application of Model Predictive Control in Wireless Sensor Networks”, Information, Communications and Signal Processing (ICICS), 1-5, (2011).
- [25] Wang, L., Li, N., Li, S., Li, K., “Neural Network based Model Predictive Control Performance Monitoring-Data-driven Approach”, Control Conference (ASCC), 1-6, (2013).
- [26] Marti, P., Fuertes, J.M., Fohler, G., Ramamritham, K., “Jitter Compensation for Real-Time Control Systems”, Real-Time Systems Symposium, 39 – 48, (2001).
- [27] Valencia, F., L’opez, J. D., M’arquez, A., Espinosa, J. J., “Moving horizon estimator for measurement delay compensation in model predictive control schemes”, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 6678 – 6683, (2011).
- [28] Quevedo, D.E., Nesic, D., “Input-to-State Stability of Packetized Predictive Control Over Unreliable Networks Affected by Packet-Dropouts”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 56, 370-375, (2011).
- [29] Wang, Q., Zou, Y., Niu, Y., “Event-triggered Model Predictive Control for Wireless Networked Control Systems with Packet Losses”, The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 1281-1286, (2015).

- [30] Bemporad, A., Cairano, S.D., Henriksson, E., Johansson, K.H., “Hybrid model predictive control based on wireless sensor feedback: An experimental study”, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 20,209–225, (2010).
- [31] Bianchi, D., Ferrara, A., DiBenedetto, M.D., “Networked Model Predictive Traffic Control with Time Varying Optimization Horizon the Grenoble South Ring Case Study”, *European Control Conference (ECC)*,4039-4044, (2013).
- [32] Hespanha, J., Naghshtabrizi, P. and Xu, Y., “A survey of recent results in networked control systems”, *Proc. IEEE* 95(1):138-162, (2007).
- [33] Hasan, M. S., Harding, C., Yu, H., Griffiths, A., “Modeling Delay and Packet Drop in Networked Control Systems Using Network Simulator NS2”, *International Journal of Automation and Computing* , 187-194 ,(2005).
- [34] Nilsson, J., “Real Time Control System with Delays”, *Department of Automatic Control Lund Institute of Technology , Doktora Tezi*,141 s., (1998).
- [35] Hu, S., Yan, W., “Stability robustness of networked control systems with respect to packet loss”, *Automatica* 43, 1243 – 1248, (2007).
- [36] Ahamed, R., “The Role Of Zigbee Technology In future Data Communication System” , *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, (2009).
- [37] Lee, J., Su, Y., Shen, C., “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, *the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, (2007).
- [38] Henriksson, D., Cervin, A., Arzen, K.-E., “TRUE TIME: Real-time Control System Simulation with MATLAB/Simulink”, *Proceedings of the Nordic MATLAB Conference*, (2003).
- [39] Cervin, A., Henriksson, D., Lincoln, B., Eker, J., Arzen, K.-E., “How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime”, *IEEE Control Systems* 23(3), 16 – 30, (2003)

- [40] Feedback Inc. 33-041 Seti, [http://www.feedback-instruments.com/pdf/brochures/33-041_Datasheet_Coupled Tanks System_MATLAB_10_2013.pdf](http://www.feedback-instruments.com/pdf/brochures/33-041_Datasheet_Coupled_Tanks_System_MATLAB_10_2013.pdf) (06.04.2016).



EKLER

Ek- 1. MATLAB kodu

%% Bu kısımda dörtlü tank sisteminin matlab ortamında modellenmesi
%% yapılmıştır

clc

clear all

% parametrelerin atanması

A(1)=138.9; %cm² 1. tankın kesit alanı

A(3)=138.9; %cm² 3. tankın kesit alanı

A(2)=138.9; %cm² 2. tankın kesit alanı

A(4)=138.9; %cm² 4. tankın kesit alanı

a(1)=0.50265; %cm²

a(3)=0.50265; %cm²

a(2)=0.50265; %cm²

a(4)=0.50265; %cm²

kc=1; %V/cm²

g=981; %cm/s² yer çekimi sabiti

%P-

h(1)=1.44;

h(2)=16;

h(3)=1.44;

h(4)=16;

v(1)=12.7276;

v(2)=12.7276;

n(1)=7;

n(2)=7;

gama(1)=0.7;

gama(2)=0.7;

for i=1:4;


```
T(i)=A(i)*sqrt(2*h(i)/g)/a(i);
end
%linear model için durum uzay denkleminin bulunması
Asys=[-1/T(1) 0 0 0;A(1)/(A(2)*T(1)) -1/T(2) 0 0;0 0 -1/T(3) 0;0 0 A(3)/(A(4)*T(3))
-1/T(4)];% Asys dörtlü tank sistemimizin A matrisi anlamında
Bsys=[0 ((1-gama(2))*n(2))/A(1);(gama(1)*n(1))/A(2) 0;((1-gama(1))*n(1))/A(3)
0;0 (gama(2)*n(2))/A(4)];% Bsys dörtlü tank sistemimizin B matrisi anlamında
Csys=[0 kc 0 0;0 0 0 kc ];% Csys dörtlü tank sistemimizin C matrisi anlamında
Dsys=[0 0;0 0];% Dsys dörtlü tank sistemimizin D matrisi anlamında
% sistemin çalışma noktalarının bulunması
p1=a(1)*sqrt(2*g); p2=(1-gama(2))*n(2); p3=a(2)*sqrt(2*g); p4=a(1)*sqrt(2*g);
p5=gama(1)*n(1);
p6=a(3)*sqrt(2*g); p7=(1-gama(1))*n(1); p8=a(4)*sqrt(2*g); p9=a(3)*sqrt(2*g);
p10=gama(2)* n(2);
Ac=[p4 p5*p6/p7; p10*p1/p2 p9];
Bc=[p3*sqrt(h20); p8*sqrt(h40)];
Cc=inv(Ac)*Bc;
h10=Cc(1)^2; h30=Cc(2)^2;
u20=p1*Cc(1)/p2; u10=p6*Cc(2)/p7;
op=[h10 h20 h30 h40 u10 u20];
disp('operating point is [h1 h2 h3 h4 u1 u2]=')
disp(op)
qtank=ss(A,B,C,D)
s=tf('s');
G=minreal(C*inv(s*eye(4)-A)*B+D)
tzero(qtank)
% sistemin transfer fonksiyonu G(s) in elde edilmesi
s=tf('s');
I=[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
G1=Csys*((s*I-Asys)^-1)*Bsys+Dsys
% zaman gecikmesinin oluşturulması ve sisteme eklenmesi
[num,den]=pade(1,2);
```

```
delay=tf(num,den);  
Gdelay=minreal(G*delay);
```



Ek- 2. Verici arduino üzerindeki program kodu

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

```
SoftwareSerialmySerial(0, 1); // RX, TX
```

```
voidsetup ( )
```

```
{
```

```
Serial.begin(9600); // Opensserial port, sets data rate to 9600 bit/s.
```

```
}
```

```
voidloop ( )
```

```
{
```

```
intsensorValue = analogRead(A0); //A0 pininden Tank2 verisinin okunması
```

```
floatvoltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0); //Analog verinin dijitale dönüştürülmesi
```

```
int sensorValue1 = analogRead(A1); //A1 pininden Tank4 verisinin okunması
```

```
float voltage1=sensorValue1 * (5.0 / 1023.0); //Analog verinin dijitale dönüştürülmesi 0.005 hassasiyet
```

```
Serial.print(voltage); //
```

```
Serial.println(voltage1); //verinin 1 alt satıra yazılması
```

```
delay(2000); // gecikme eklenmesi
```

```
}
```

Ek- 3. Alıcı arduino üzerindeki program kodu

```
charinputBuffer[32]; // Forincomingserialdata

voidsetup ( )
{
  Serial.begin(9600); // Opensserial port, sets data rate to 9600 bit/s.
}

voidloop ( )
{
  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); // gecikme eklenmesi  
}
```



ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Emre ÖZER

Doğum Tarihi:19/07/1988

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Osmaniye Anadolu Lisesi	2002-2006
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2007-2012
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Mersin Üniversitesi	2012-

(Varsa) Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2014-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1.