

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN
GERÇEKLENMESİ MODELLENMESİ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Hüseyin KOR**

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

MART 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN
GERÇEKLENMESİ MODELLENMESİ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Hüseyin KOR
504061138**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mart 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKSİN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan EROL (İTÜ)**

MART 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin yapımında emeği geçen; tez danışman hocam sayın Prof Dr. İbrahim EKSİN'e; değerli görüş ve tecrübelerini eksik etmeyen sayın Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya; tez boyunca bana zaman ayıran Arař. Gör. Y. Müh Tufan KUMBASAR'a; meslektaşım, değerli dostum Müh. İbrahim ÜSTÜN'e; tüm desteklerinden ve hoşgörüsünden ötürü sayın müdürüm Müh. Hilal SANCAKTAR' a maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK-Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 'na her zaman yanımda olan, bu çalışmaların bitmesi için motive eden, umutsuzluğa kapıldığımda cesaret veren nişanlım Hülya AYDIN 'a; beni bu günlere getiren ve hakkını ödeyemeyeceğim anneme, ablama ve merhum babama; sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

MART 2010

HASAN HÜSEYİN KOR

Kontrol Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımı.....	3
2. FİZİKSEL MODEL.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Çok Değişkenli Sıfır.....	8
2.2.1 Sıfır Noktası.....	8
2.2.2 Sıfırın Yönü.....	10
2.3 Lineer Olmayan Modelin Özellikleri	11
2.4 Sistem Tanıma.....	12
2.4.1 Giriş.....	12
2.4.2 Örneklem zamanı seçimi	13
2.4.3 Sistem tanıma uygulaması	13
3. AYRIŞTIRICI (DECOUPLER)TASARIMI.....	21
3.1 Giriş.....	21
3.2 Tasarım Yöntemleri.....	22
3.2.1 Yöntem I	24
3.2.2 Yöntem II: Yaklaşık ayrıştırıcı tasarım yöntemi.....	24
3.2.3 Yöntem III : Statik Ayrıştırıcı.....	25
3.3 Dörtlü Tank Sistemi İçin Ayrıştırıcı Tasarımı	27
4. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİ İÇİN KONTROLÖR TASARIM YÖNTEMLERİ 29	29
4.1 Decentralized Kontrolörlerin Tasarımı	29
4.2 Tasarım Algoritmasının Özeti.....	29
4.3 Decentralized Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı.....	30
4.3.1 Fuzzification (Bulanıklaştırma)	30
4.3.2 Decision Logic stage (Karar Verme)	30
4.3.3 Defuzzification (Netleştirme)	31
4.4 Dörtlü Tank Sistemi İçin Kontrolör Tasarımı	31
4.5 Tartışmalar	32
5. TEORİK MODEL SİMULASYON VE KONTROL	33
5.1 Giriş.....	33
5.2 Dörtlü Tank Sistemi Gerçek Zamanlı Kontrolü.....	42
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	67

KISALTMALAR

TGTC : Tek Giriş Tek Çıkış
PID : Proportional Integral Derivative
ÇGÇÇ : Çok Giriş Çok Çıkış
İGİÇ : İki Giriş İki Çıkış
RGA : Relative Gain Array
TGÇÇ : Tek Giriş Çok Çıkış
PRBS : Pseudo Random Binary Sequences
PI : Proportional Integral

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Kütle Dengesi / Süreklilik Denklemi Genel Formu.....	5
Çizelge 6.1 : Dörtlü Tank Sistemi Oturma Zamanları.	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İGİÇ Sistemlerin Genel Yapısı.....	2
Şekil 1.2 : Dörtlü Tank Sisteminin Genel Blok Diagramı.....	3
Şekil 2.1 : Dörtlü tank sistemi şematik diyagramı.....	6
Şekil 2.2 : Dörtlü Tank Sistemi	6
Şekil 2.3 : γ_1 ve γ_2 Değerlerine Göre Sistemin Durumu.....	9
Şekil 2.4 : Sistemin Giriş Çıkış Arasındaki Blok Diagramı.....	12
Şekil 2.5 : Sistem Tanıma Blok Diyagramı.....	14
Şekil 2.6 : Sisteme Uygulanan Girişler.....	14
Şekil 2.7 : System Identification Toolbox Genel Görülüm.....	15
Şekil 2.8 : U_1 ile Tank 1 Arasında Elde Edilen Sistem Transfer Fonksiyon Çıktısı .	16
Şekil 2.9 : U_2 ile Tank 2 Arasında Elde Edilen Sistem Transfer Fonksiyon Çıktısı .	16
Şekil 2.10 : U_1 ile Tank 1 Arasında Elde Edilen Sistem Tanıma Çıkışları.....	18
Şekil 2.11 : U_2 ile Tank 2 Arasında Elde Edilen Sistem Tanıma Çıkışları.....	18
Şekil 2.12 : Gerçek Fiziksel Model Tank 1 Cevabı (Referans:8 cm).....	19
Şekil 2.13 : Teorik Fiziksel Model Tank 1 Cevabı (Referans:8 cm).....	19
Şekil 2.14 : Gerçek Fiziksel Model Tank 2 Cevabı (Referans:9 cm).....	20
Şekil 2.15 : Teorik Fiziksel Model Tank 2 Cevabı (Referans:9 cm).....	20
Şekil 3.1 : Kapalı Çevrimin Blok Diyagramı.....	22
Şekil 5.1 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Blok Diyagramı.....	33
Şekil 5.2 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 1 Seviyesi.....	34
Şekil 5.3 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 2 Seviyesi.....	35
Şekil 5.4 : Ayırıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Blok Diyagramı.....	36
Şekil 5.5 : Ayırıştırıcı Blok Diyagramı.....	36
Şekil 5.6 : Ayırıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 1 Seviyesi.....	37
Şekil 5.7 : Ayırıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 2 Seviyesi.....	38
Şekil 5.8 : Ayırıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Blok Diagramı.....	39
Şekil 5.9 : Ayırıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Tank 1 Seviyesi.....	40
Şekil 5.10 : Ayırıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Tank 1 Seviyesi.....	41
Şekil 5.11 : Sarmasız PID Kontrolör ile Gerçeklenen Sistemin Blok Diyagramı	42
Şekil 5.12 : Sarmasız PID Kontrolör İç Blok Yapısı	43
Şekil 5.13 : Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.....	43
Şekil 5.14 : Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 PID Kontrol İşareti.....	44
Şekil 5.15 : Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği	45
Şekil 5.16 : Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 PID Kontrol İşareti.....	46
Şekil 5.17 : Ayırıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.....	47

Şekil 5.18 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 PID Kontrol İşareti.	48
Şekil 5.19 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.	49
Şekil 5.20 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 PID Kontrol İşareti.	50
Şekil 5.21 : Bulanık PID Kontrolör ile Gerçeklenen Sistemin Blok Diyagramı	51
Şekil 5.22 : Bulanık PID Kontrolör İç Blok Yapısı.....	51
Şekil 5.23 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.	52
Şekil 5.24 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Bulanık PID Kontrol İşareti.	53
Şekil 5.25 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.....	54
Şekil 5.26 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Bulanık PID Kontrol İşareti	55
Şekil 5.27 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank1 Sıvı Seviye Grafiği.....	56
Şekil 5.28 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank1 Bulanık PID Kontrol İşareti.	57
Şekil 5.29 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank2 Sıvı Seviye Grafiği.....	58
Şekil 5.30 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank2 Bulanık PID Kontrol İşareti.	59
Şekil 6.1 : Etkileşimli İki Tank Sistemi Şematik Gösterimi.....	63
Şekil 6.2 : Etkileşimsiz İki Tank Sistemi Şematik Gösterimi.....	63
Şekil 6.3 : İkinci Dereceden TGTÇ Sistem Şematik Gösterimi	64
Şekil 6.4 : İkinci Dereceden Etkileşimli TGTÇ Sistem Şematik Gösterimi.....	64

DÖRTLÜ TANK SİSTEMİNİN GERÇEKLENMESİ MODELLENMESİ KONTROLÜ

ÖZET

Bu tez çalışmasının ana amacı, çok değişkenli ve geçişmeli sistem olan “Dörtlü Tank Sistemi” nin gerçekleştirilmesi, modellenmesi ve kontrolüdür. Dörtlü Tank Sistemi endüstride sıkça karşılabilecek geçişmeli ve iki giriş- iki çıkışlı bir prosesdir. Sistemde, su pompalarının regülatörlerine verilen kontrol sinyalleriyle alttaki iki tankın seviyesi kontrol edilmektedir.

Bu amaç doğrultusunda sistemin öncelikle hem matematiksel hem de deneysel yöntemlerle modeli çıkarılmıştır. Bu modelin eldesinden sonra sistem TITO bir sistem olduğu için ve bu sistem iki adet SISO kontrolör ile kontrol edilmek istendiği için sisteme bir Ayrıştırıcı tasarlanmıştır.

Sistem iki adet SISO sisteme dönüştürüldükten sonra kontrolörler hem teorik hem de gerçek model üzerine uygulanmıştır. Kontrolörler, sarmasız PID ve bulanık mantık kontrolör olarak tasarlanmıştır ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Tezin son kısmında sonuçlar ve ileriki çalışmalar için fikirler verilmiştir.

THE QUADRUPLE TANK PROCESS MODELING AND CONTROLLER DESIGN

SUMMARY

The main focus of this thesis work is to model and control multivariable laboratory system that consists of four interconnected water tanks. The quadruple-tank process is a typical coupled control process with two inputs and two outputs. This type of dynamic flow control process can be easily found in many industrial areas. The objective of the process is to adjust the two bottom tank water levels by controlling two pumps.

First of all the mathematical model of the system is delivered. After delivering the model, decoupler is designed in order to control a TITO system with two SISO controller.

In the thesis decoupler and controller designed and implemented to both real model and mathematical delivered model. Anti-Wind Up PID controller and Fuzzy logic controller are used to control the system and those controllers compared in the thesis.

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde kontrol edilecek sistemlerin çoğu; birden fazla ölçme sinyali ve kontrol sinyalinden oluşmaktadır. Bu sistemler genellikle oldukça karmaşık etkileşimleri de içerisinde barındırmaktadır.

Prosesler klasik olarak tek girişli – tek çıkışlı (TGTC) PID kontrollörler ile kontrol edilmektedir. Bu kontrollörler sistemlere, endüstride oldukça iyi bilinen kaskat kontrol, feed-forward kontrol, oransal kontrol, split-range kontrol gibi kontrol algoritmalarıyla uygulanmaktadır. Bu algoritmalar sistemleri TGTC varsayarak uygulanan yaklaşımlardır. Bu uygulamada sistemlerin kontrol işaretlerinin sistem üzerindeki etkisinin ayrıştırılması gereklidir.

Çok girişli – çok çıkışlı (ÇGÇÇ) sistemlerin TGTC kontrollör ile kontrol edilmek istenmesi, teorik ile uygulama arasında bir uyumsuzluk meydana getirmiştir. Zamanla yapılan çalışmalarla bu uyumsuzluk her iki taraftan yapılan geliştirmelerle bir nebze olsun giderilmiştir.

Birden fazla süreç değişkeninin birbirini etkilemesi, süreçteki farklı kontrol öbeklerinin birbirinin bozucusu gibi davranması anlamına gelmektedir. Günümüzde bu sorunu aşmanın en hızlı yolu en önemli kontrol öbeğinin kabul edilebilir performans kriterine göre ayarlanmasıdır. Tabii ki bu sonuç optimal sonuçtan oldukça uzakta olan bir çözüm yoludur çünkü her ne kadar en önemli kontrol öbeği iyi sonuçlar verse dahi diğer öbekler istenilenin çok uzağında cevaplar verebilmektedir.

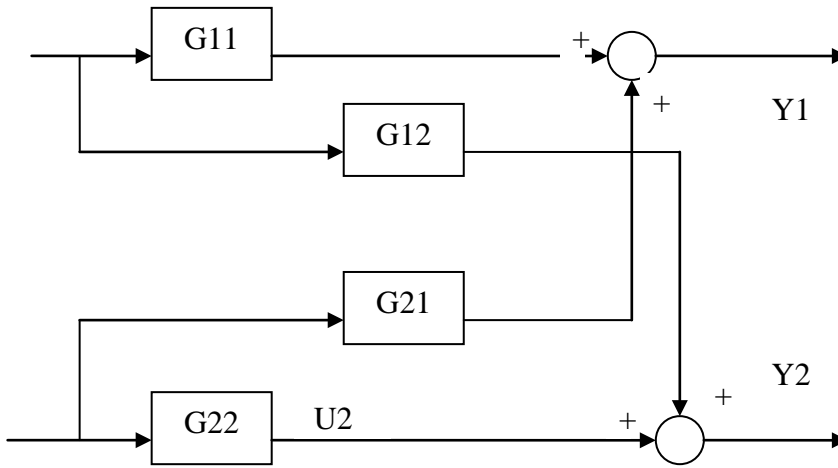
Birbirlerini etkileyen en güzel ÇGÇÇ örneği varilin içindeki sıcaklık ve basıncın aynı anda ayarlanması için tasarlanan kontrol sistemidir. Burada fiziksel olarak sıcaklık ve basınç birbirleriyle direkt olarak etkilidir ve tasarlanacak kontrollörler, değişkenler birbirlerinden bağımsız gibi tasarlanırlarsa kontrollörler birbirlerini bozucu olarak etkilerler ve sistem cevapları beklenilenden kötü çıkar. Literatürde bu tipte ÇGÇÇ sistemler, etkileşimler göz önüne alınarak tasarlanan ÇGÇÇ kontrollörler ile yada ayrıştırıcı (decoupler) tasarlayarak iki adet TGTC kontrollör ile kontrol edilmektedir.

(Örneğin [1], [2]). Bazı yazı ve çalışmalar ise daha direkt kontrol algoritmaları üzerine yapılmıştır. [3], [4].

Bu çalışmada ele alınan sistem, ÇGÇÇ sistem tarafından kapsanan iki girişli – iki çıkışlı (İGİÇ) bir sistemdir. İGİÇ sistem seçimindeki amaç, bir çok kontrol sistemindeki etkileşimler iki ayrı giriş arasında olmaktadır ve bu tipte sistemler İGİÇ kontrollörler ve daha başka yöntemler ile kontrol edilebilmektedir. [5] İGİÇ sistemden daha fazla giriş çıkışı olan sistemlerin direkt kontrol yapıları oldukça karmaşık ve bir çok problemi de beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmaya konu olan sistem dörtlü tank sistemidir. Dörtlü tank sistemi özellikle kimya endüstrisinde kullanılan bir İGİÇ sistemdir. Tezin amacı sistemi olabildiğince lineer çalıştırıp, konu sisteme uygun performans kriterleri için ayrıştırıcı ve kontrollör tasarlamaktır.

İGİÇ sistemin genel akış diyagramı Şekil 1.1 de gösterildiği gibidir. Şekil 1.1 de G11 ve G22 ana transfer fonksiyonları ve G12 ile G21 etkileşim transfer fonksiyonları olarak verilebilir. Görüldüğü üzere sistemin cevaplardaki beklenen performans kriterlerinin toleransları azaldıkça etkileşimler daha büyük önem arz etmeye başlayacaktır.



Şekil 1.1 : İGİÇ Sistemlerin Genel Yapısı.

Endüstrideki sistemlerin kontrolü için öncelikle sistemin modeline ihtiyaç vardır. Sistemin modeli sisteme ait fiziksel denklemlerle çıkarılabilir. Sistemin modelinin çıkarmanın bir başka yolu ise gerçek sistemi uygun koşullarla çalıştırıp veri toplanması ve toplanan bu verileri uygun sistem tanıma methodlarında kullanılarak sistemin modelinin eldesidir. [6]

Sistem parametreleri belirlendikten sonra ikinci önemli kısım hangi kontrol işaretinin hangi çıkışa etkideğini bulmaktır. Bunun için de RGA (Relative Gain Array) analizi yapılmalıdır. [7] Sistemde iki pompaya giriş sinyali verilerek alttaki iki tankın seviyesi kontrol edilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Problemin Tanımı

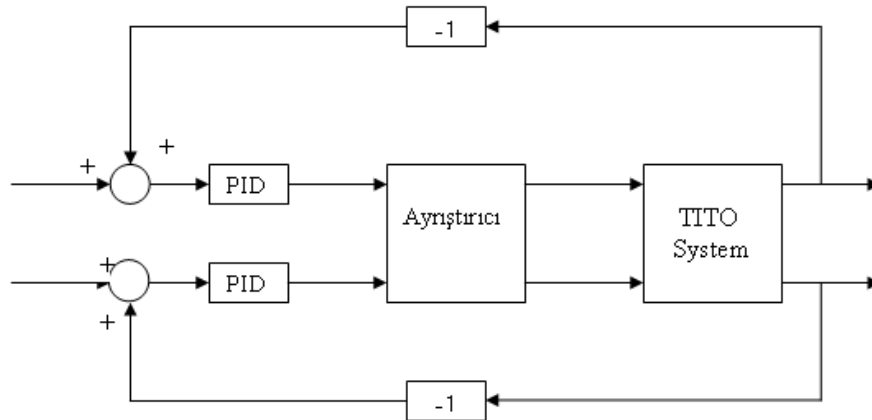
Literatürde dörtlü tank sistemine benzer başka bazı sistemlerden de bahsedilmektedir. Bunlara örnek olarak helikopter model [8][9] ETH Zürich'te geliştirilen manyetik yatak prosesi [10] verilebilir. Problemin tam olarak tanımlanması için bazı tanımların iyi yapılması gerekmektedir. Tanımlar yeri geldikçe verilecektir.

Endüstriyel proste İGİÇ sistemler genel olarak lineer karesel kararlı singüler olmayan sistemlere yakındırlar. Bu tip sistemlerin tanımı Tanım 1 deki gibi verilebilir [5].

Tanım 1 : Lineer Karasel Kararlı Singüler Olmayan Sistemler (Linear square stable non-singular systems).

Bu tip sistemler eşit giriş ve çıkış sayısı olan sistemlerdir. Bu sistemler lineerdir ve karesel kararlı singüler olmayan transfer fonksiyonları mevcuttur.

Bu çalışmada sistemin modeli çıkarıldıktan ve hangi girişin, hangi çıkışı etkilediği belirlendikten sonra Şekil 1.2 deki gibi sistem elde edilir. İki adet kontrollör (şekilde genel olarak PID olarak belirtilmiştir.) referans ve geri besleme sinyallerini münferit olarak alır. Bu sinyaller işlendikten sonra ayrıştırıcı kullanılmış sisteme gönderilir. Burada görüldüğü gibi sadece sistemin modeli ve kontrollör değil aynı zamanda ayrıştırıcının tasarımı da oldukça önemlidir.



Şekil 1.2 : Dörtlü Tank Sisteminin Genel Blok Diagramı.

2. FİZİKSEL MODEL

2.1 :Giriş

Bu bölümde, dörtlü tank sistemi için fiziksel verilerden yararlanılarak matematiksel model oluşturulacaktır.

Dinamik analiz ve kontrol sistemlerinin tasarımı için ilk olarak sürecin modeli çıkarılmalıdır. Dörtlü tank sistemi modeli, kütle ve enerjinin korunumu prensibi ile formüle edilmiştir [6].

Çizelge 2.1. : Kütle Dengesi / Süreklilik Denklemi Genel Formu.

Kütle Toplamı Oranı	=	Kütle Giriş Oranı	+	Kütle Üretim Oranı	-	Kütle Çıkış Oranı	-	Kütle Tüketim Oranı
---------------------------	---	-------------------------	---	--------------------------	---	-------------------------	---	---------------------------

Şekil 2.1 de sistemin şematik bir diyagramı Şekil 2.2 de ise sistemin fotoğrafı görülmektedir. Amaç aşağıdaki iki tankın seviyesini iki adet pompa ile kontrol etmektir. v_1 ve v_2 pompa giriş gerilimleri (süreç girdileri) ve çıkışlar ise y_1 ve y_2 tanklardaki sıvı seviyeleridir (süreç çıktıları). Kütle dengesi ve Bernoulli yasası verilmiştir [12].

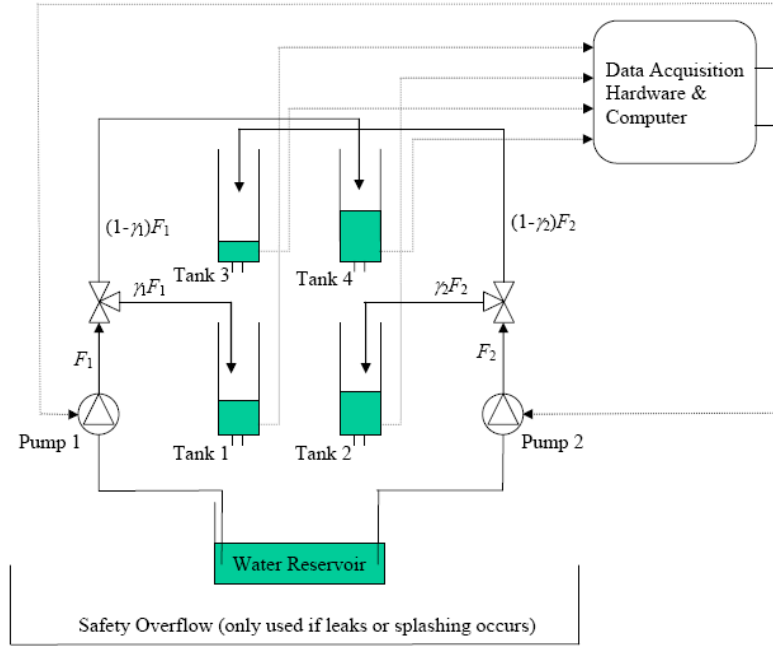
$$\begin{aligned}\frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1}v_1 \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2}v_2 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3}v_2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

Burada;

A_i Tankın kesiti i ;

a_i Çıkış deliği kesiti;

h_i su seviyesi



Şekil 2.1: Dörtlü Tank Sistemi Şematik Diyagramı.



Şekil 2.2: Dörtlü Tank Sistemi.

Tank 1 ve 2'nin su seviyeleri, iki pompa ile kontrol edilmiştir. Lineer model için valf pozisyonları, çok değişkenli sıfır noktasının yerini belirler. Değişken Sıfır noktası sol veya sağ yarı s-düzleminde olabilir.

Pompa i 'ye uygulanan gerilim v_i ve ilgili akış ise $k_i v_i$ dir. Parametreler $\gamma_1, \gamma_2 \in (0,1)$ bir deneyden önce valflerin ayarlanmasından bulunur. Tank 1'e olan akış $\gamma_1 k_1 v_1$ ve Tank 4'e olan akış $(1-\gamma_1)k_1 v_1$ (Tank 2 ve Tank 3 içinde aynıdır). Yer çekimi ivmesi g olarak gösterilmiştir. Ölçülmüş seviye sinyalleri $k_c h_1$ ve $k_c h_2$ 'dir.

Değişkenler $x_i := h_i - h_i^0$ ve $u_i := v_i - v_i^0$ 'dir.

Bu bilgiler ışığında oluşturulmuş durum uzayı modeli ise aşağıdaki gibidir.

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

$$y = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (2)$$

burada zaman sabitleri:

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

İlgili transfer matrisi:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1 + sT_1} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1 + sT_3)(1 + sT_1)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1 + sT_4)(1 + sT_2)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1 + sT_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yukarıdaki transfer fonksiyon matrisine $c_1 = T_1 k_1 k_c / A_1$, $c_2 = T_2 k_2 k_c / A_2$, γ_1 ve γ_2 değişkenlerinin girdiği açıkça görülmektedir.

Aşağıda deney düzeneği değerleri verilmiştir:

$$A_1, A_2, A_3, A_4 [cm^2] = 167.416$$

$$a_1, a_2 [cm^2] = 0.6636$$

$$a_3, a_4 [cm^2] = 0.3318$$

$$k_c [V/cm] = 0.20$$

$$g [cm/s^2] = 981$$

$$k_1 [ml/V.sn] = 6.84$$

$$k_2 [ml/V.sn] = 6.84$$

$$\gamma_1, \gamma_2 = 0.70$$

$$h_1^0, h_2^0, h_3^0, h_4^0 [cm] = 10$$

Model ve dörtlü tankın kontrol sistemi aynı uygulama noktasında hem teorik olarak tasarlanmıştır hem de sistem tanıma metotları uygulanılarak fiziksel model elde edilmiştir. P_- , sistemin minimum faz karakteristiklerini gösterdiği durumdur.

P_- uygulama noktası şu zaman sabitlerine sahiptir:

$$\begin{aligned} P_- \\ (T_1, T_2) & (36, 36) \\ (T_3, T_4) & (72, 72) \end{aligned}$$

Fiziksel modelleme sonucunda aşağıdaki transfer fonksiyon matrisi elde edilir:

$$G_-(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.205716}{1+36s} & \frac{0.08816}{(1+72s)(1+36s)} \\ \frac{0.08816}{(1+72s)(1+36s)} & \frac{0.205716}{1+36s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 Çok Değişkenli Sıfır

G transfer matrisinin sıfır noktaları ve onların yönleri bu bölümde açıklanmıştır.

2.2.1 Sıfır Noktası

Transfer fonksiyon matrisinin (4) deki sıfırları, transfer fonksiyonun determinantını sıfır yapan noktalardır.

$$\det G(s) = \frac{c_1 c_2 \gamma_1 \gamma_2}{\prod_{i=1}^4 (1+sT_i)} \times \left[(1+sT_3)(1+sT_4) - \frac{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \right] \quad (6)$$

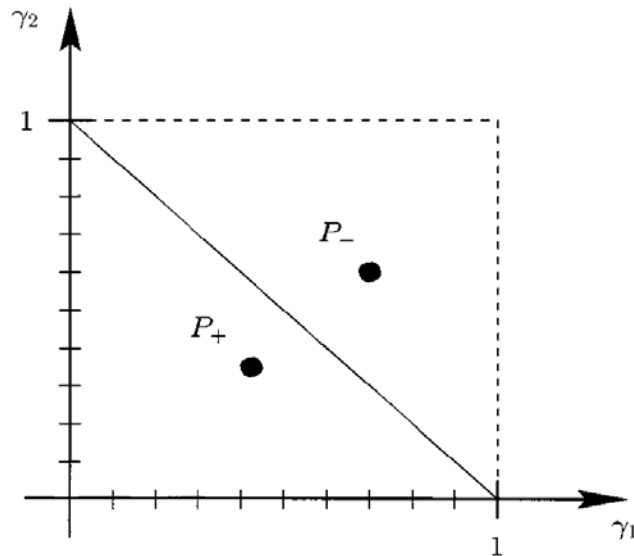
Böylece transfer fonksiyon matrisi G için $\gamma_1, \gamma_2 \in (0,1)$ için iki sonlu sifira sahiptir. Bir tanesi her zaman sol yarı düzlemedir, fakat diğeri sol veya sağ yarı düzeleminde yer alabilir.

$\eta \in (0, \infty)$ parametresi;

$\eta := (1-\gamma_1)(1-\gamma_2)/\gamma_1\gamma_2$ dir.

Eğer η küçük ise, iki sıfır $-1/T_3$ ve $-1/T_4$ e sırasıyla yaklaşır. Dahası, $\eta \rightarrow \infty$ olduğunda , bir sıfır $-\infty$ a yakındır ve öteki sıfır da $+\infty$ yakındır. Eğer $\eta = 1$ olursa ,bir sıfır orijinde yer alır. Bu durum $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ in karşılığıdır. Bu durumda sistem $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ için non-minimum fazlı ve $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ için minimum fazlıdır.

Yukarıdada ifade edildiği gibi , P_- için $\gamma_1 + \gamma_2 = 1.30 > 1$ ve P_+ için $\gamma_1 + \gamma_2 = 0.77 < 1$ dir. Şekil 2.3 P_- ve P_+ iki uygulama noktasın yerini gösterir. Grafiğin üzerindeki uygulama noktası için sistem minimum fazlıdır ve grafiğin aşağısındaki uygulama noktası için sistem non-minimum fazlıdır. Sağ veya sol yarı düzlem içindeki çok değişkenli sıfır doğrusal fiziki anlama sahiptir. q_i pompa i yi belirtsin ve $q_1 = q_2$ Kabul edelim. Sonra yukarıdaki tanklara olan toplam akış $[2 - (\gamma_1 + \gamma_2)]q_1$ ve alttaki tanklara olan toplam akış $(\gamma_1 + \gamma_2)q_1$ dir [12].



Şekil 2.3 : γ_1 ve γ_2 Değerlerine Göre Sistemin Durumu.

Alttaki tanklara olan akış , üstteki tanklara olan akıştan daha büyükse, $\gamma_1 + \gamma_2 > 1$ olursa, sistem minimum fazlıdır. Eğer Sistem non-minimum fazda ise, alttaki tanklara olan akış, üstteki tanklara olan akıştan daha küçüktür. Eğer akış direk olarak alttaki tanklara gider ise, öngörülse olarak u_1 ile y_1 i, u_2 ile y_2 i kontrol etmek daha kolaydır.

Sol tanklara(Tank 1 ve 3) giden toplam akış eğer sağ tanklara (Tank 2 ve 4) giden akışa eşit olur ise kontrol problemi daha da zorlaşır çünkü bu durum $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ 'e karşılık gelir bu da orijinde çok değişkenli sıfır anlamına gelir. Burada modelin sıfır noktası ve dörtlü tank sistemi kontrolünün fiziksel sezgisi arasında böylece doğrudan bir bağlantı vardır.

2.2.2. Sıfırın Yönü

Skalar sistemler ve çok değişkenli sistemler arasında önemli bir fark vardır. Buda çoklu değişkenli sıfırın yeri değil onun yönüdür. Bir sıfırın yönünü (çıkış) $\psi \in R^2$ vektörünü $\psi^T G(z) = 0$ birim boylu olarak tanımlanır. Eğer ψ birim vektöre paralel ise, sıfır sade bir çıkış ile ilişkilendirilir. Durum bu değilse eğer, sağ yarı düzlem sıfırının etkisi belki iki çıkış arasında paylaşılır. [17]

(4)'deki transfer matrisi için , $z > 0$ için sıfır yönü;

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1 + zT_1} & \frac{(1 - \gamma_2)c_1}{(1 + zT_3)(1 + zT_1)} \\ \frac{(1 - \gamma_1)c_2}{(1 + zT_4)(1 + zT_2)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1 + zT_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

Bu denklemden sonra gelen $\psi_1, \psi_2 \neq 0$, sıfır asla bir çıkış ile ilişkilendirilmez. Eğer

(7) γ_2 için çözerse ve sadeleştirilirse, aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$\frac{\psi_1}{\psi_2} = -\frac{1 - \gamma_1}{\gamma_1} \cdot \frac{c_2(1 + zT_1)}{c_1(1 + zT_4)(1 + zT_2)} \quad (8)$$

Bu denklemden, γ_1 küçük ise, z genellikle ilk giriş ile ilişkilendirilir. Bundan dolayı, verilmiş sıfır konumu için, γ_1 ve γ_2 relatif boyutu, sağ yarı düzlem sıfırının hangi çıkış ile ilişkili olduğunu belirler.

2.3 Lineer Olmayan Modelin Özellikleri

Aşağıda dörtlü tank sisteminin lineer olmayan model (1) karakteristikleri ve durağan uygulama noktalarının özellikleri çıkarılmıştır.

Sabit uygulama noktaları için (h^0, v^0) , (1) deki diferansiyel denklemlerden aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{aligned}\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3^0} &= \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} v_2^0 \\ \frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4^0} &= \frac{(1-\gamma_2)k_1}{A_4} v_1^0\end{aligned}\tag{9}$$

buradan,

$$\begin{aligned}\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} &= \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1^0 + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_1} v_2^0 \\ \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2^0} &= \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_2} v_1^0 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2^0\end{aligned}\tag{10}$$

Yukarıdaki denklemler, aşağıdaki matrisi (11) elde ettikleri sürece, sabit giriş değerleri (v_1^0, v_2^0) için, sabit sürekli hal sıvı seviyeleri (h_1^0, h_2^0) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 k_1 & (1-\gamma_2)k_2 \\ (1-\gamma_1)k_1 & \gamma_2 k_2 \end{bmatrix}\tag{11}$$

Bu matris (11) $\gamma_1 + \gamma_2 \neq 1$ koşulu sağlandığı sürece nonsingulardır. Bu singülerlik durumu doğaldır çünkü sürekli halde Tank 1 e giden akış $\gamma_1 q_1 + (1-\gamma_2)q_2$ dir ve tank 2 ye giden akış ise $\gamma_2 q_2 + (1-\gamma_1)q_1$ dir.

Eğer $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ ise bu akışlar $(\gamma_1(q_1 + q_2))$ ve $(1-\gamma_1)(q_1 + q_2)$ birbirine eşittirler. Tank 1 ve tank 2 ye giden akışlar birbirlerine bağlıdır dolayısıyla seviyeleri de birbirlerine bağlıdır, $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ durumu G transfer fonksiyon matrisinin (4) orijinde sıfır olması durumuna eş değerdir. [12]

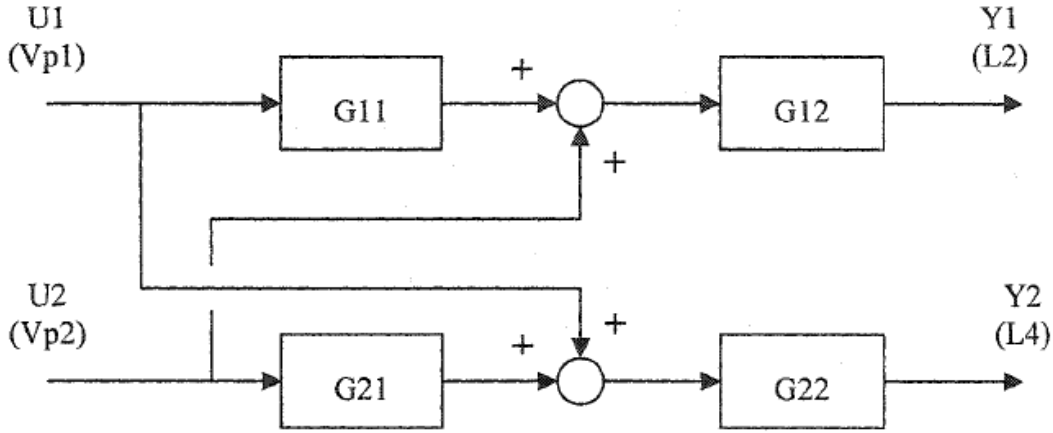
2.4 Sistem Tanıma

2.4.1 Giriş

Sistem tanımanın amacı proses giriş çıkış sinyallerini kullanarak matematiksel model elde etmektir. Sistem tanımda sistemin tüm özellikleri ve farklılıkları göz önüne alınır. Burada açık çevrim tanıma metodu kullanılmıştır ve amaç gerçek sistemin kontrol edilebilmesi için uygun modelin bulunmasıdır.

Bu tezde kara kutu modeli kullanılmıştır ve MATLAB'ın System Identification Toolbox ile test edilmiştir. TGÇÇ tanıma deneylerinde Pseudo Random Binary Sequences (PRBS) giriş sinyali olarak uygulanmıştır. Bu sinyalin kuvveti veri toplanabilecek düzeyde seçilmiştir.

Dörtlü tank sisteminde transfer fonksiyon matrisi $G(s)$ 2x2 matristir. Şekil 2.4 sürecin blok diagramını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.4 : Sistemin Giriş Çıkış Arasındaki Blok Diagramı.

Şekil 2.4 te gösterilen sistemin transfer fonksiyon modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Y_1 = G_{11}G_{12}U_1 + G_{12}U_2$$

$$Y_2 = G_{22}U_1 + G_{21}G_{22}U_2 \quad (12)$$

$$Y = \begin{bmatrix} G_{11}G_{12} & G_{12} \\ G_{22} & G_{21}G_{22} \end{bmatrix} U$$

Sisteme ait dört modeli bulmak için giriş çıkış eşleştirmelerinden faydalanılarak TGÇÇ tanıma yöntemi uygulanmıştır. Bunun için öncelikle U_1 sinyali PBRS olarak tanımlanmış ve U_2 sinyali sabit tutulmuştur. Y_1 ve Y_2 cevapları incelenerek $G_{11}G_{12}$ ve G_{12} transfer fonksiyonları elde edilmiştir. İkinci aşamada U_2 sinyali PBRS olarak tanımlanmış ve U_1 sinyali sabit tutulmuştur. Y_1 ve Y_2 cevapları incelenerek G_{22} ve $G_{21}G_{22}$ transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu iki deneyle dört modelde elde edilebilir. Bu dört modelin geçici hal yanıtları kontrolör tasarımıda kullanılacaktır. Toplanan veriler iki kısımda değerlendirilir. İlki yukarıda açıklandığı gibi sistem modeli çıkarımında ikincisi ise bu modelin geçerliliğinin sınanmasında kullanılır.

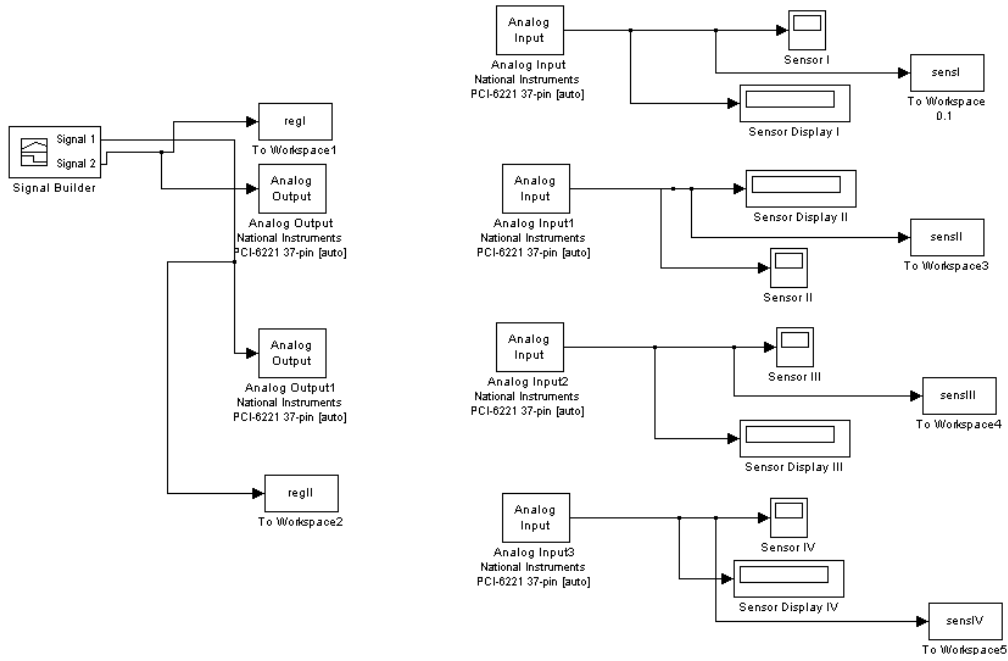
2.4.2 Örneklemeye zamanı seçimi

Sürekli bir sistemin ayrık zamanı elde edilirken birçok veri kaybolur. Bu yüzden örneklemeye zamanı seçimi çok kritik bir öneme sahiptir. Shannon' nın örneklemeye teoremine göre örneklemeye sistemin verebileceği en hızlı dinamiğinden en az beş kat hızlı olmalıdır.

Dörtlü tank sisteminde daha çok veri toplayıp daha geçerli bir model elde edebilmek için örneklemeye zamanı 0.1 saniye seçilmiştir. PRBS sinyalleri 5-10 volt arasında ve sistemin cevap vereceği şekilde sisteme uygulanmıştır. Bu değer sistemi yaklaşık olarak 15 -25 cm arasında tutmaktadır.

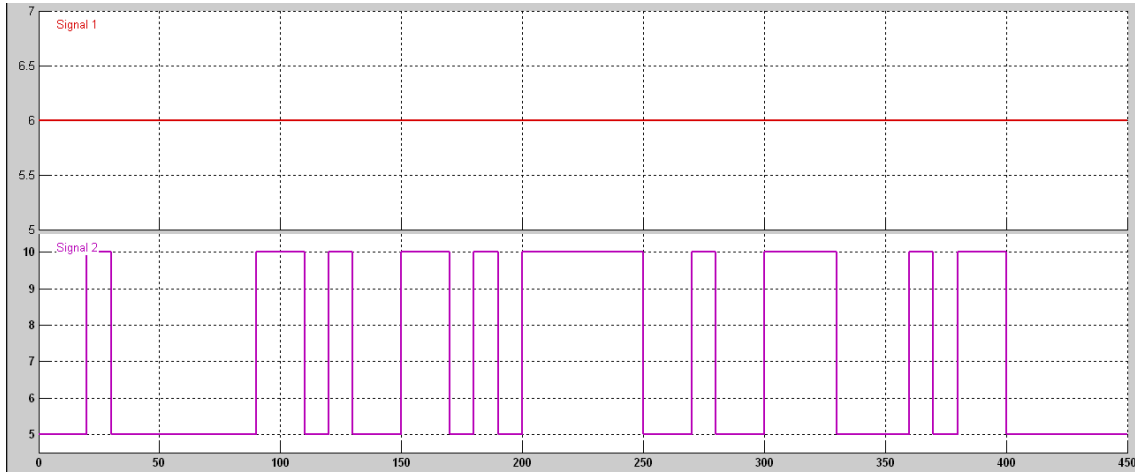
2.4.3 Sistem tanıma uygulaması

Sistem tanımda sistem verileri , National Instruments PCI 6221 kartı ile toplanmıştır. MATLAB / SIMULINK e tanıtılan karttan alınan veriler örneklemeye zamanlarında workspace'e kaydedilmiştir. Aşağıdaki şekilde sistem tanımda kullanılan blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.5 : Sistem Tanıma Blok Diyagramı.

Şekil 2.6 da görüldüğü gibi giriş sinyalleri Signal Builder fonksiyonu ile sisteme uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde uygulanan sinyaller gösterilmiştir. Sinyal 1 sabit 6V olarak ve Sinyal 2 ise 5V-10V arasında değişen PRBS şeklinde uygulanmıştır.

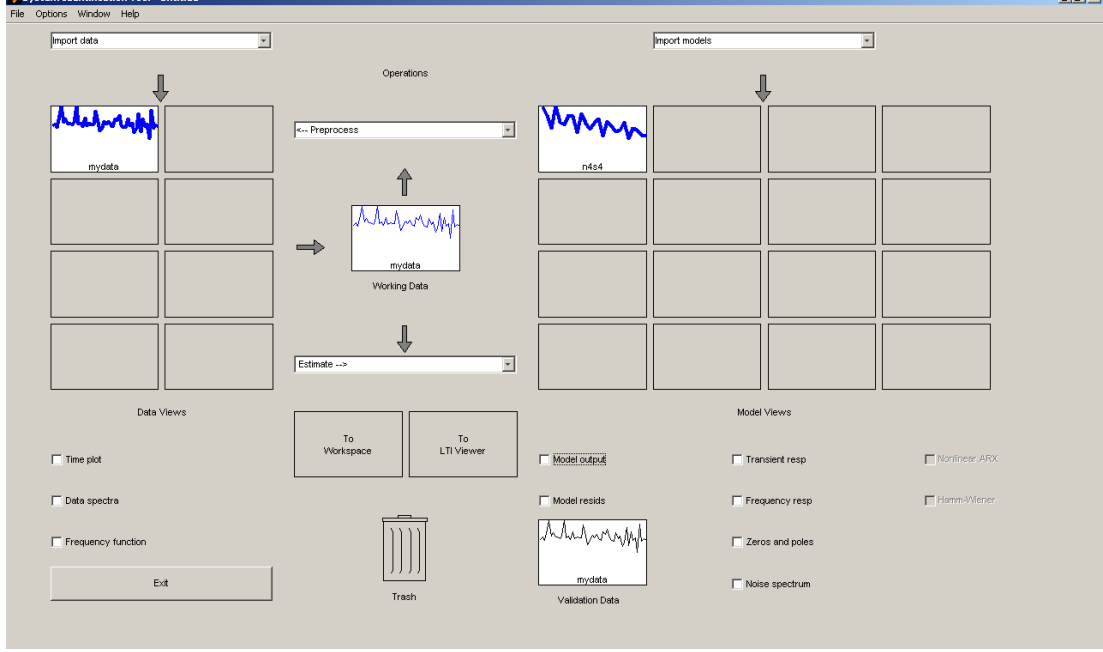


Şekil 2.6 : Sisteme Uygulanan Girişler.

İkinci aşama olarak ise Sinyal 1 ile Sinyal 2 nin sisteme girişleri yer değiştirilmiştir.

Bu sayede TGÇÇ tanıma yöntemi için veriler toplanmıştır.

Elde edilen bu veriler MATLAB System Identification Toolbox a Import Data sekmesinden girişi yapılmıştır. Bu veriler aynı zamanda modelin geçerliliğini sağlayan Validation Data kısmında da kullanılmaktadır.

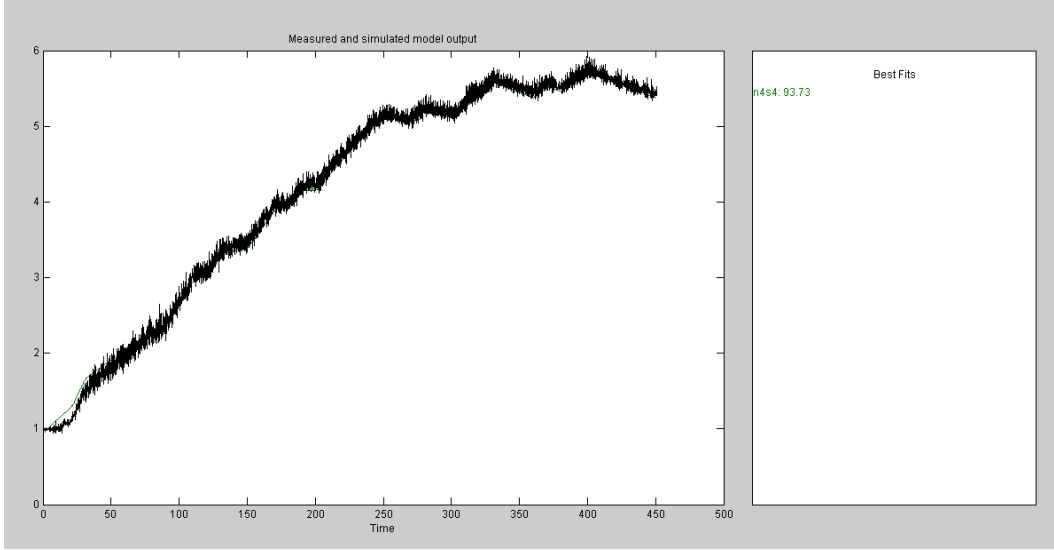


Şekil 2.7 : System Identification Toolbox Genel Görülüm.

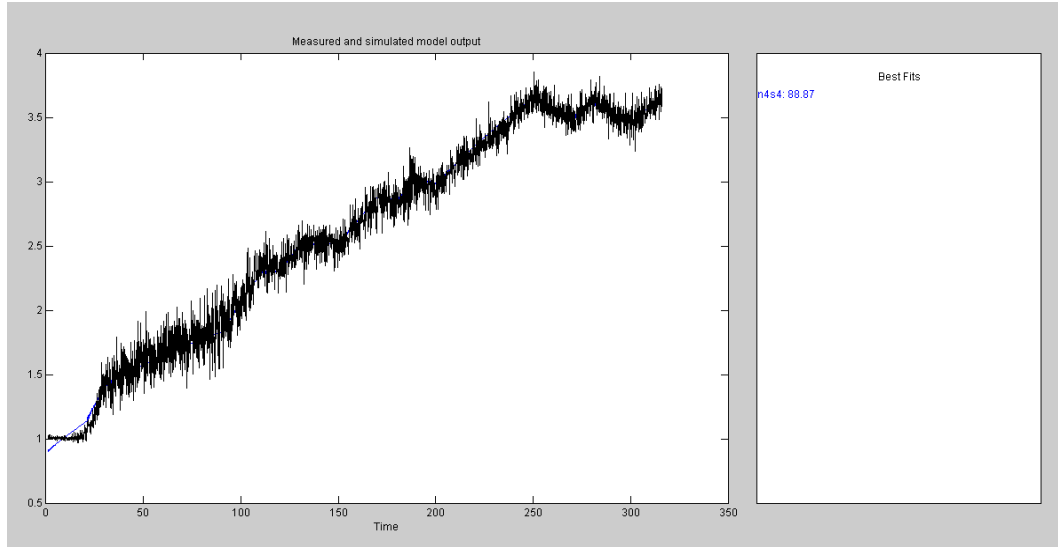
Toolbox a veriler girildikten sonra Estimate Sekmesinden Linear Parametric Models seçilir. Açılan pencereden State Space modellemesi seçilir. Modelleme algoritması olarak N4SID kullanılır. Burada dikkat edilmesi gereken husus sadece durum uzayı model almak zorunluluğumuzun olmamasıdır. Durum uzayı modelinin yanı sıra sistemin ARX, ARMAX gibi modelleme yöntemleriyle elde edilmiş modellerini de MATLAB da oluşturulabilir. Bizim için önemli olan nokta hangi sistemin gerçek modele en yakın olduğudur.

Sistem tanıma yapıldığında sistem modeli bulunur ve Model Output işaretlendiğinde modelin yüzdesel olarak uygunluğu görülür. Bunun yanında diğer kutucuklar yardımıyla modelimiz daha derinlemesine incelenebilir. Şekil 2.8 de U_2 işareti sabit iken U_1 ile tank 1 arasındaki modeli ifade etmektedir. Şekil 2.9 da ise U_1 işareti sabit iken U_2 ile tank 2 arasındaki modeli ifade etmektedir.

Şekil 2.7 den de açıkça görülebildiği gibi sistem yaklaşık %94 gibi bir oranda modellenmiştir. Burada sistemde bulunan ve ilk 5 cm'lik ölçülemeyen ölü kısımdn dolayı bu oran %6 gibi düşük bir oran dahi olsa sapmıştır. Sistem bu ölü bölge olmasaydı sistem tanıma performansı daha iyi olabilirdi.



Şekil 2.8 : U_1 ile Tank 1 Arasında Elde Edilen Sistem Transfer Fonksiyon Çıktısı.



Şekil 2.9 : U_2 ile Tank 2 Arasında Elde Edilen Sistem Transfer Fonksiyon Çıktısı.

Sistem modelinin matematiksel modelini görebilmek için model Workspace'e atılır ve burada sistemin durum uzayı matrisleri görülebilir. Elde edilen durum uzayı matrisleri SIMULINK bloğu olarak yazılabilir. Bu blok artık sistemin hem tüm etkileşimlerini hem de matematiksel olarak modellenemeyen fiziksel kısıtlar nedeniyle matematiksel olarak modellenemeyen süreç dinamiklerini de barındıran sistem modeli olarak görülebilir.

U_2 işareti sabit iken U_1 ile tank 1 arasındaki modelin matrisleri MATLAB da tanımlanır ve “[NUM,DEN]=SS2TF(A,B,C,D,1)” komutuyla belirtilen sistemin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$TF = \frac{0.0101s^3 - 0.0075s^2 - 0.0120s + 0.0116}{s^4 + 0.15s^3 - 0.7353 - 0.5056 + 0.0923} \quad (13)$$

Benzer şekilde U_1 işareti sabit iken U_2 ile tank 2 arasındaki modeli aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$TF_1 = \frac{-0.0076s^3 + 0.0111s^2 + 0.0114s - 0.0126}{s^4 + 0.4049s^3 - 0.4722s^2 - 0.9410s + 0.0107} \quad (14)$$

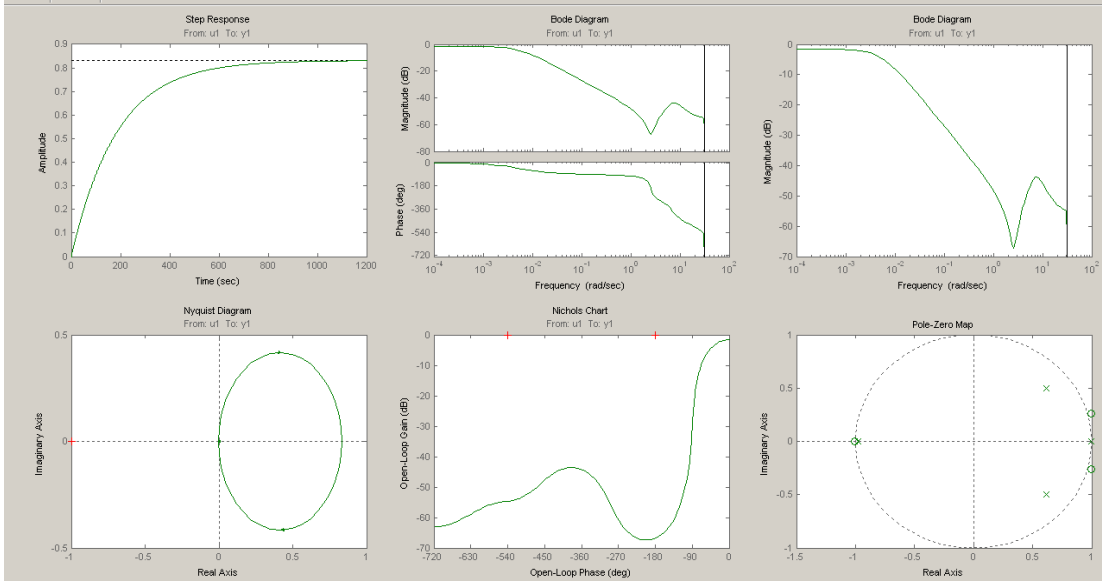
Elde edilen modelin aşağıdaki özelliklerine dikkat edilmelidir.

- Model tek giriş ve tek çıkış verilerine göre oluşturulmuştur.
- Tüm sistemin modeli için transfer fonksiyon matrisindeki tüm ara modeller elde edilmelidir.

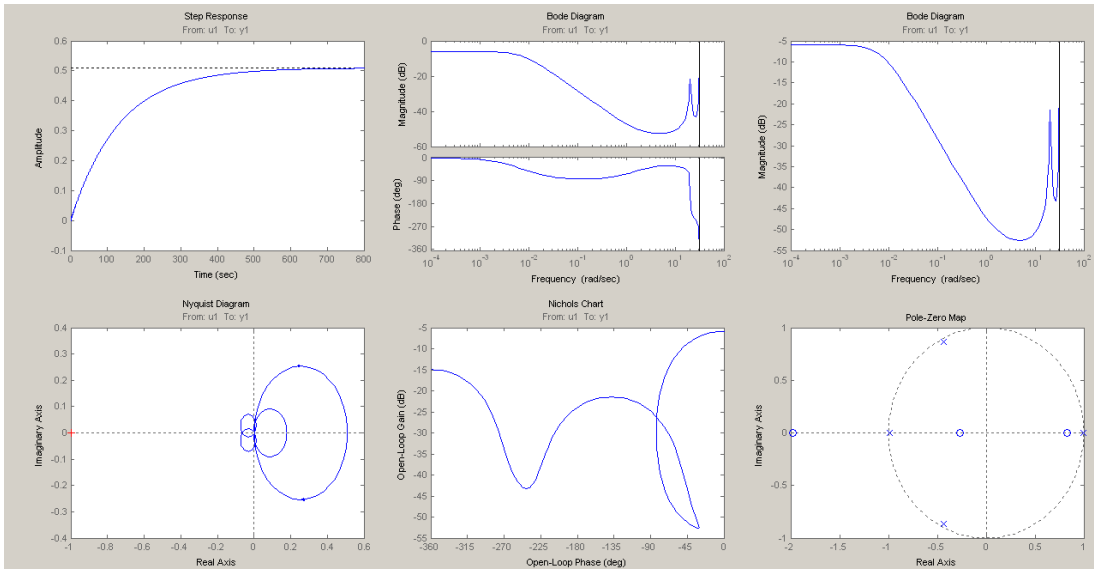
Elde edilen modellerde yukarıda yazılan fiziksel kısıtlar nedeniyle matematiksel olarak modellenemeyen süreç dinamikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sistemdeki sensörlerin doğrusal olmayan yapısı
- Sistemdeki tankların ölü bölgesi olarak kabul edilen ve ölçülemeyen ilk 5 cm'lik kısımları
- Sistemdeki sensörlerin ölçme hataları
- Vanaların, sürücü devrelerine aynı gerilim uygulanmasına rağmen, farklı oranlarda bölmesi.
- Sistemdeki pompaların doğrusal olmayan yapısı
- Sistemdeki pompaları süren regülatörlerin doğrusal olmayan yapısı
- Sistemdeki pompaların su pompalamasını sağlayan kompresörün doğrusal olmayan yapısı. (Örnek olarak sistem ilk etapta 6 bar basınçla sürülürken, kompresörün tekrar devreye girme alt limiti olan 4 Bar a kadar iner bu nedenle sistem farklı basınç değerlerinde sürülmektedir)
- Sistemdeki akışkanın dinamiğinin fiziksel kısıtları

Yukarıdaki kısıtları da içine alan sistem modellendiğinde sistem LTI Viewer üzerine sürüklenip bırakılır. Burada sistemin hem ayrık zamanlı kutup-sıfır gibi çizimleri hem frekans domeni çizimleri hem de kontrolör tasarımında kritik öneme sahip geçici ve sürekli hal yanıtları çizdirilebilir. Şekil 2.10 U_1 ile Tank 1 arasında elde edilen sistem tanıma çıkışları, Şekil 2.11 U_2 ile Tank 2 arasında elde edilen sistem tanıma çıkışlarıdır.

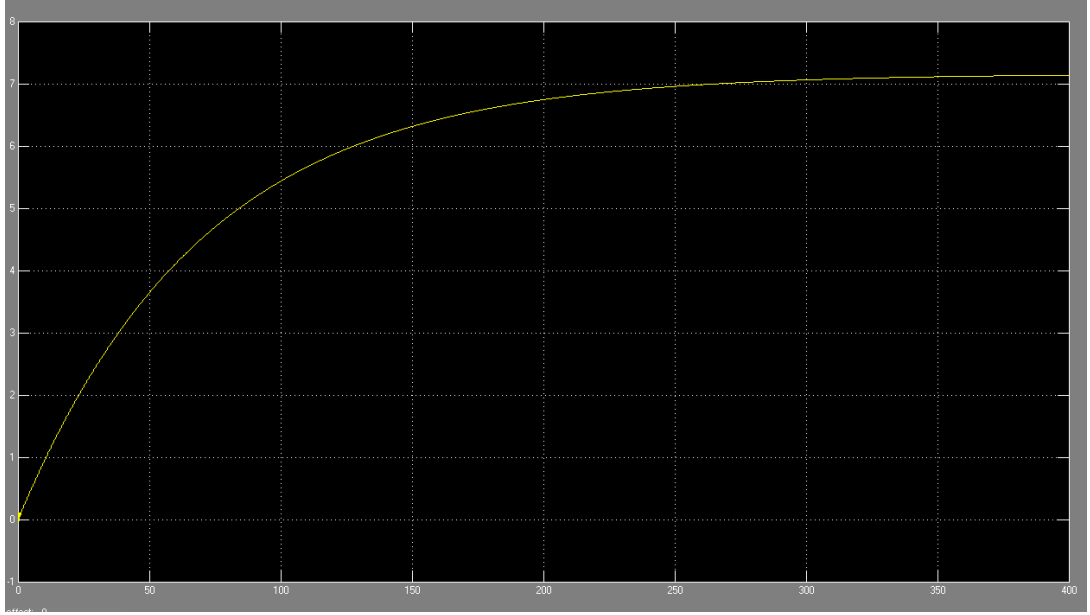


Şekil 2.10 : U_1 ile Tank 1 Arasında Elde Edilen Sistem Tanıma Çıkışları.

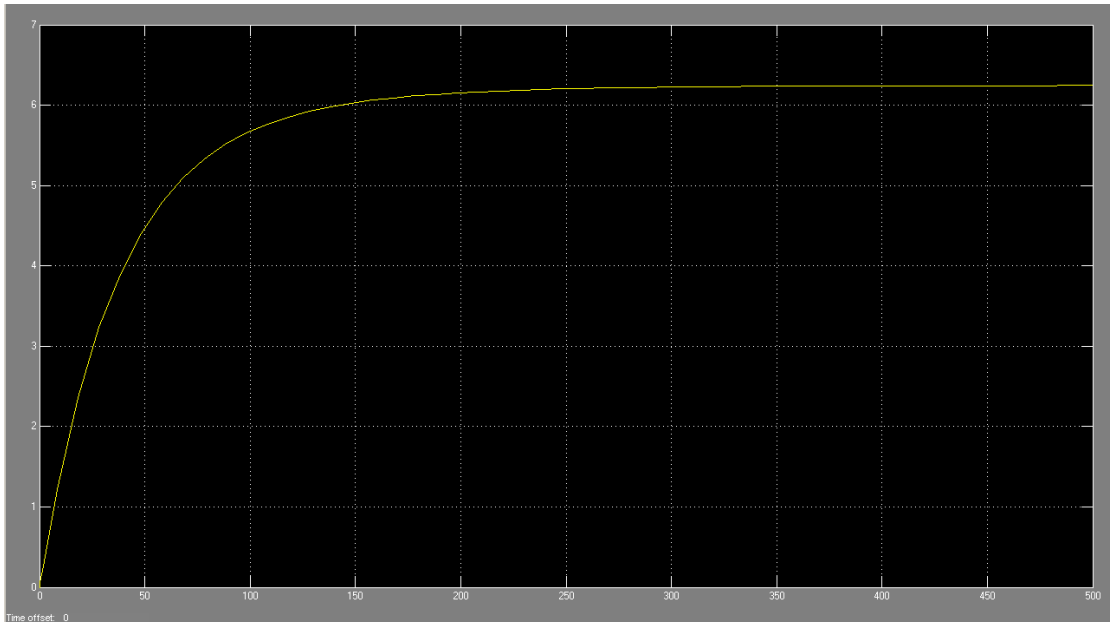


Şekil 2.11 : U_2 ile Tank 2 Arasında Elde Edilen Sistem Tanıma Çıkışları.

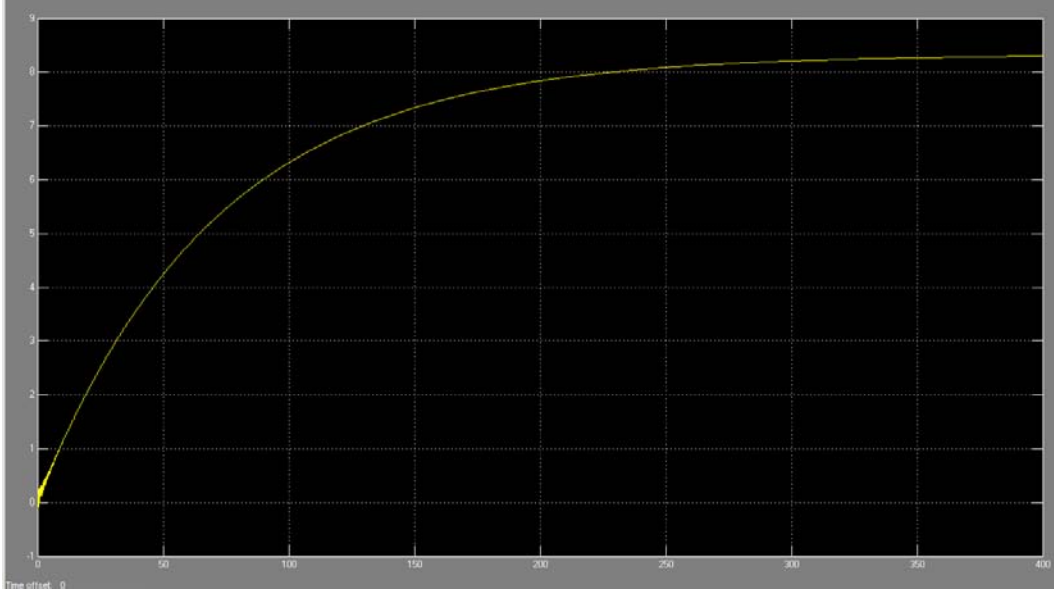
Sistem tanımadan elde edilen fiziksel model ile matematiksel olarak elde edilen modeli karşılaştırmak için iki modelin tanklarının farklı girişler verilmiş ve cevaplar aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



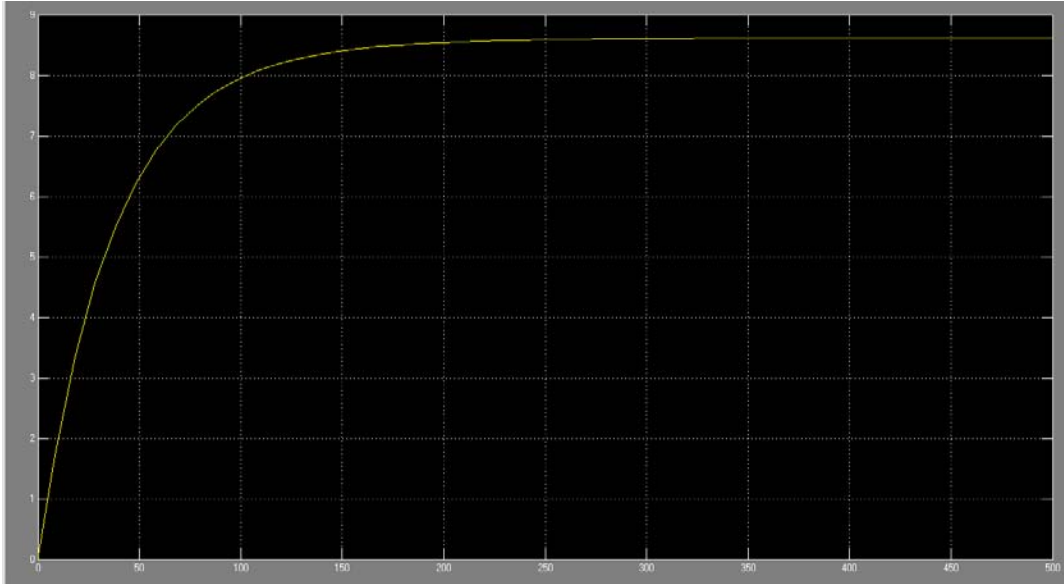
Şekil 2.12 : Gerçek Fiziksel Model Tank 1 Cevabı (Referans:8 cm).



Şekil 2.13 : Teorik Fiziksel Model Tank 1 Cevabı (Referans:8 cm).



Şekil 2.14 : Gerçek Fiziksel Model Tank 2 Cevabı (Referans:9 cm)



Şekil 2.15 : Teorik Fiziksel Model Tank 2 Cevabı (Referans:9 cm)

3. AYRIŞTIRICI (DECOUPLER) TASARIMI

3.1 Giriş

Ayrıştırıcı ÇGÇÇ sistemlerde süreç etkilerini kompanze ederek performanslarını arttırmak için kullanılırlar, fakat süreç değişikliklerine oldukça duyarlı olmaları sebebi ile bulunması oldukça zor olabilecek oldukça detaylı süreç modellemelerine ihtiyaç duyarlar. Ayrıştırıcının bu dezavantajları endüstride başarılı uygulamalarda kullanılmasına mani olmaktadır. Bunun yanında statik ayrıştırıcı, bulunması kolay ve sahada ayarlanabilmesi mümkün olan, sürecin sürekli hal kazançlarından tasarlanabilirler. Buna rağmen statik ayrıştırıcı bazı süreçlerin yüksek frekanslarında öbek etkileşimleri sırasında tahmin edilemeyecek etkileri ortaya çıkarabilir.

Kimyasal süreçler genelde ÇGÇÇ sistemlerdir. Model bazlı çok değişkenli kontrolörler başarıyla uygulansa da, basit işletme prosedürünün süreç şartları ve modelinin değişmesine karşı yetersiz kalması ile performans bozulmaları meydana gelebilir. Süreç değişikliklerine karşı zayıf kontrol performansı meydana geldiğinde, karışık kontrol yapısı operatörün sahada müdahale edip ayarlamasını engeller. Bunun yanında çoklu tek-giriş/tek-çıkış (TGTC) kontrolörlerin kullanıldığı ÇGÇÇ sistemler pek çok endüstride basit yapıları ve kolay ayarlanabilmeleri nedeni ile kullanılmaktadır[14].

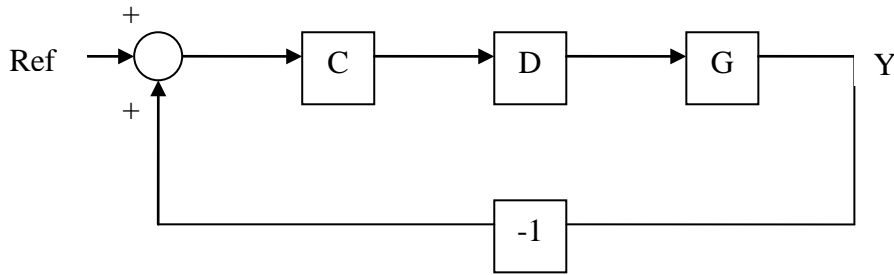
Oransal, integral ve türev için kazanç matrislerinin tamamı dolu olmasına rağmen, detaylı süreç modellere ihtiyaç duymakta, ve sahadaki ayarı kolay değildir[14] Süreç etkileşimleri ÇGÇÇ sistemlerin performanslarını düşürmektedir. ÇGÇÇ sistemlerin kapalı çevrim performanslarını arttırmak için ayrıştırıcı kullanılabilir. Kontrol edilen değişkenlerin ayrıştırılan sonuçları ve süreç etkilerini dinamik ayrıştırıcı kompanze edebilir.[15],[16].

Dinamik ayrıştırıcı ayrıntılı süreç modelleri gerektirir [14]. Ayrıntılı süreç modellerinin gereksinimini önlemek için, statik ayrıştırıcılar sürecin sürekli-durum kazançlarının tersinden oluşturulabilir. Åström. [1] statik ayrıştırıcıların çok çok hızlı kontrol gerekmeyen süreçlerde etkili olduğunu gösterdi. Her ne kadar statik ayrıştırıcı tasarımları basit ve sahada ayarlanabilir olsa da, her zaman daha iyi kapalı çevrim

performansı vermemektedir. Statik ayrıştırıcı bazı süreçler için yüksek frekans cevabında istenmeyen etkilere neden olabilir. Frekans bağımlı göreceli kazanç dizileri statik ayrıştırıcının tavsiye edilen integral modlarında uygulanıp uygulanmadığını tespit etmek için kullanılır. Bu ise statik ayrıştırıcının önemli ölçüde kontrol performanslarını, kararlılık dayanıklılığının ÇGÇÇ sistemlerinkine benzer olmasına rağmen geliştirdiğini gösterir. Statik ayrıştırıcıyı uygulamak için, sürekli durum kazançları gereklidir ve onları bulmak için bazı yöntemler incelenmiştir. Süreç girişlerinin genelde fiziksel limitleri vardır[14]. Bazı girişler kendi kontrolleri yeteneklerini, kendi limitlerine ulaştıklarında kaybederler. Döngü hatası toleransı kontrol sistemlerini bu ve benzer durumlarda kararlı tutar. Kapalı çevrim performansı gibi döngü hatası toleransı için de, bir antireset windup düzeni için kullanılabilir [14].

3.2. Tasarım Yöntemleri

Lineer karesel kararlı non-singular sistem için ayrıştırıcıların tasarım metodu bu bölümde anlatılacaktır. Kapalı çevrim sistemin yapısı Şekil 3.1 de tanımlanmıştır. Tanım 1'deki gibi sistemin Lineer karesel kararlı non-singular sistem olduğu varsayılmıştır. Lineer olmayan sistemler mutlaka lineer hale getirilmelidir. D, ayrıştırıcının lineer karesel kararlı non-singular transfer fonksiyonu matrisidir. C, TGTC PID kontrolör transfer fonksiyonu ile birlikte köşegen transfer fonksiyon matrisidir. [5]



Şekil 3.1 : Kapalı Çevrimin Blok Diyagramı.

Ayrıştırıcı D aşağıdaki gereklilikleri sağlamalıdır:

- GD çarpımı diyagonal olmalıdır.
- Yüksek geçiren bir karakterde olmamalıdır.
- Mümkün olduğunca az dinamik ve ölü zaman içermelidir.

Aşağıda problemin matris teori tanımı ve ayrıştırıcı nasıl seçilir sorusunun cevabı bulunmaktadır.

Tanım 2: A matrisinin adjoint'i, $adj(A)$ olarak gösterilir ve A matrisinin kofaktörlerinin transpozudur.

$$(adj(A))_{ij} = A_{ji}$$

Burada A_{ji} terimleri A matrisinin kofaktörleridir.

Proposition 1:

$$A \bullet adj(A) = adj(A) \bullet A = \det(A) \bullet I$$

Ayrıştırıcı tasarımında ilk adım, tüm muhtemel ayrıştırıcı uzayının bulunmasıdır. Tüm uzay bulunduktan sonra en uygunun seçilmesi gereklidir.

Proposition 2 ayrıştırıcı uzayını ifade etmektedir. [5].

Proposition 2:

GD sistemini diagonal yapan tüm D matrisleri, G matrisinin adjoint'i ile diagonal bir matris olan K matrisinin çarpımı ile bulunur.

$$D = adj(G) \bullet K \tag{15}$$

Bu proposisyon her ne kadar önemsiz gibi gözükse de tüm muhtemel ayrıştırıcıların bulunmasına olanak verdiği için önemlidir.

Burada önemli olan konu K matrisinin nasıl seçilmesi gerektiğidir.

Endüstrideki sistemlerin doğası gereği, prosesin transfer fonksiyonuna ait adjoint ve kofaktörlerin hepsi alçak geçiren karakteristiktir.

Aşağıda belirtilen methodlarda görüleceği üzere, başlangıç noktası olarak $K = I$ ve dolayısıyla $D = adj(G)$ alınmıştır. [5]

Ayrıştırıcı dizaynında önemli olan nokta ayrıştırıcının olabildiğince az bir zaman gecikmesine sahip olmasıdır. Bu ise K matrisinin modifikasyonu ile yapılabilir.[5]

Aşağıda ayrıştırıcı tasarım yöntemlerinden üçü özet olarak verilmiştir. Bu yöntemlerden biri dörtlü tank sistemine uyarlanıp uygulanmıştır.

3.2.1. Yöntem I

Ayrıştırıcı Tasarım Yöntemi

(1) Başlangıç Noktası olarak $K = I$ alınır bu durumda $D = \text{adj}(G)$ olur.

(2) Ayrıştırıcıdaki mümkün olan en büyük zaman gecikmesini yok edebilmek için K matrisine onun tersleri yazılır.

(3) Ayrıştırıcı sütunlarındaki ortak kutup ve sıfırları yok edebilmek için bu sıfırlar ve kutupların tersleri K matrisine yazılır. Burada önemli olan nokta Ayrıştırıcıya yüksek geçiren özellik gelmemesi için K matrisine alçak geçiren filtre de konması gerekebilir.[5]

3.2.2. Yöntem II: Yaklaşık Ayrıştırıcı Tasarım Yöntemi

Bu bölümde sistemin transfer fonksiyon matris elemanlarının birinci dereceden ölü zamanlı sistemlere benzediği varsayılmıştır. [5]

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{k_{11}}{T_{11}s+1} e^{-sL_{11}} & \frac{k_{12}}{T_{12}s+1} e^{-sL_{12}} \\ \frac{k_{21}}{T_{21}s+1} e^{-sL_{21}} & \frac{k_{22}}{T_{22}s+1} e^{-sL_{22}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Birinci dereceden ölü zamanlı sistemler endüstride çok yaygın olduğu için, bu yöntem de oldukça popülerdir.

G matrisinin adjointi aşağıdaki gibidir.

$$\text{adj}(G(s)) = \begin{pmatrix} \frac{k_{22}}{T_{22}s+1} e^{-sL_{22}} & -\frac{k_{12}}{T_{12}s+1} e^{-sL_{12}} \\ -\frac{k_{21}}{T_{21}s+1} e^{-sL_{21}} & \frac{k_{11}}{T_{11}s+1} e^{-sL_{11}} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Adjoint matris sütunlarındaki ortak zaman gecikmeleri ayrıştırıcı tasarımı sırasında yok edilir. Ortak kutuplar da bu yöntemle yok edilir. Her ayrıştırıcı sütun elemanın T_{ij} ile ifade edilen bir zaman sabiti vardır.

Bu zaman sabitlerinin en kısası T_s ile, en uzununu ise T_l ile ifade edilmektedir. Uzun zaman sabiti olan elemanlar aşağıdaki varsayımla ikinci dereceden transfer fonksiyonları ile ifade edilir.

$$\frac{1}{T_l s + 1} \approx \frac{1}{(T_s s + 1)((T_l - T_s)s + 1)} \quad (18)$$

$$\frac{1}{T_s s + 1} \quad (19)$$

Bu durumda kutup (19) sütundan yok edilebilir.

Kısaca özetlemek gerekirse;

(1) Sistemin birinci dereceden ölü zamanlı modeli çıkarılır.

(2) Başlangıç Noktası olarak $K = I$ alınır bu durumda $D = \text{adj}(G)$ olur.

(3) Ayırıştırıcıdaki mümkün olan en büyük zaman gecikmesini yok edebilmek için K matrisine onun tersi yazılır.

(4) Yukarıdaki (18) no lu varsayım kullanılarak, ayırıştırıcıdaki ortak kutuplar , kutuplarının tersinin K matrisine yazılmasıyla yok edilir.

3.2.3. Yöntem III : Statik Ayırıştırıcı

Statik ayırıştırıcı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$D = G^{-1}(0) = \frac{1}{\det G(0)} \begin{pmatrix} g_{22}(0) & -g_{12}(0) \\ -g_{21}(0) & g_{11}(0) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Burada önemli olan nokta $G(0)$ ın tersinin alınabilmesi için $G(0)$ singular olmamalıdır. Ayırıştırıcı kullanılmış sistemin transfer fonksiyonu $Q(s) = G(s)D$ dir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} q_{11}(s) &= \frac{g_{11}(s)g_{22}(0) - g_{12}(s)g_{21}(0)}{\det G(0)} \\ q_{12}(s) &= \frac{g_{12}(s)g_{11}(0) - g_{12}(0)g_{11}(s)}{\det G(0)} \\ q_{21}(s) &= \frac{g_{21}(s)g_{22}(0) - g_{21}(0)g_{22}(s)}{\det G(0)} \\ q_{22}(s) &= \frac{g_{22}(s)g_{11}(0) - g_{21}(s)g_{12}(0)}{\det G(0)} \end{aligned} \quad (21)$$

Buradan görüleceği gibi $Q(0)$ bir birim matristir ve $Q(s)$ matrisinin ufak $|s|$ ler için Taylor serisi açılımı aşağıdaki gibidir.

$$Q(s) \approx \begin{pmatrix} 1 & K_{12}s \\ K_{21}s & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Burada düşük frekanslı w değerleri için diagonal elemanlar bire eşittir ve diagonal olmayan elemanlar ise w değeriyle orantılıdır.

Eğer PID kontrolörün bant genişliği yeteri kadar düşükse diagonal olmayan elemanlar ufalacaktır ve sistem ayrıştırıcı kullanılmış olacaktır.[1]

Burada kapalı çevrim sistem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} 1+q_{11}c_1 & q_{12}c_2 \\ q_{21}c_1 & 1+q_{22}c_2 \end{pmatrix} Y = \begin{pmatrix} q_{11}\bar{c}_1 & q_{12}\bar{c}_2 \\ q_{21}\bar{c}_1 & q_{22}\bar{c}_2 \end{pmatrix} Y_r \quad (23)$$

Bu ifadeyi aşağıdaki gibi de yazabiliriz.

$$Y = \bar{H}Y_r$$

burada

$$\begin{aligned} \bar{h}_{11} &= \frac{q_{11}\bar{c}_1 + (q_{11}q_{22} - q_{12}q_{21})\bar{c}_1c_2}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2) - q_{12}q_{21}c_1c_2} \\ \bar{h}_{12} &= \frac{q_{12}\bar{c}_2}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2) - q_{12}q_{21}c_1c_2} \\ \bar{h}_{21} &= \frac{q_{21}\bar{c}_1}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2) - q_{12}q_{21}c_1c_2} \\ \bar{h}_{22} &= \frac{q_{22}\bar{c}_2 + (q_{11}q_{22} - q_{12}q_{21})c_1\bar{c}_2}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2) - q_{12}q_{21}c_1c_2} \end{aligned} \quad (24)$$

Yukarıda elemanları verilen H matrisi aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir. Sistemimizin sağ yarı düzlemdeki sıfırları nedeniyle, kapalı çevrim bant genişliği, w_b , sınırlıdır. Eğer $z > 0$ dan büyük sadece bir sıfırı var ise, bantgenişliği $0.5z \text{ rad s}^{-1}$ den az olmalıdır [19]. G matrisinin sıfırları aşağıdaki denklemin çözümü ile bulunur.

$$\det G(s) = g_{11}(s)g_{22}(s) - g_{12}(s)g_{21}(s) = 0 \quad (25)$$

Eğer $|\det G(s)| \gg 0$ tüm $|s| < w_b$ için doğruysa, $\det Q(s) = \det G(s) \det D$ olur ve $|q_{11}(s)q_{22}(s)| \gg |q_{12}(s)q_{21}(s)|$ dir. Bu durum $\det Q(s)$ meromorphic fonksiyon olup $\det Q(0) = 1$ oluncaya kadar devam eder. h_{11} 'in paydası $(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2)$ şeklinde payı ise $q_{11}c_1 + q_{11}q_{22}c_1c_2 = q_{11}c_1(1+q_{22}c_2)$ şeklinde ifade edilebilir. h_{22} 'nin payı $q_{22}c_2 + q_{11}q_{22}c_1c_2 = q_{22}c_2 + (q_{11}c_1)$ şeklinde ifade edilirse;

H matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{q_{11}\bar{c}_1}{1+q_{11}c_1} & \frac{q_{12}\bar{c}_2}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2)} \\ \frac{q_{21}\bar{c}_1}{(1+q_{11}c_1)(1+q_{22}c_2)} & \frac{q_{22}\bar{c}_2}{1+q_{22}c_2} \end{pmatrix} \quad (26)$$

H matrisinin diagonal elemanları TGTC sistemlerde geçerli olan kontrolör tasarımına uygun olduğu için, bu elemanlar kontrolör tasarımında kullanılabilir.[18] Diagonal olmayan elemanlar ise bize etkileşimler hakkında bilgiler verebilir.

3.3 Dörtlü Tank Sistemi için Ayrıştırıcı Tasarımı

Şekil 2.1 de gösterilen dörtlü tank sistemine ait daha önce çıkardığımız transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{1+sT_1} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1+sT_4)(1+sT_2)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1+sT_2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Burada

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i=1,\dots,4 \quad c_1 = T_1 k_1 k_c / A_1 \quad \text{ve} \quad c_2 = T_2 k_2 k_c / A_2 \quad (28)$$

$$\det G(s) = \frac{c_1 c_2 \gamma_1 \gamma_2}{\prod_{i=1}^4 (1+sT_i)} \times \left[(1+sT_3)(1+sT_4) - \frac{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \right] \quad (29)$$

olarak verilebilir.

G transfer fonksiyonu $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ için non-minimum fazlıdır ve $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ için ise minimum fazlıdır.

Burada görüldüğü gibi valflerin işaretleri değiştirilerek sistemin kontrolü kolaylaştırılıp zorlaştırılabilir.

$$T_i = \dots = T_4 = T > 0, \quad c_1 = c_2 = 1$$

Ayrıştırıcı kullanılmış sistem aşağıdaki gibi verilebilir.

$$Q(s) = G(s)D = G(s)G^{-1}(0) = \frac{1}{(1+sT)^2} \begin{pmatrix} 1-sT\beta & sT \frac{\gamma_1(\gamma_2-1)}{\gamma_1+\gamma_2-1} \\ sT \frac{\gamma_2(\gamma_1-1)}{\gamma_1+\gamma_2-1} & 1-sT\beta \end{pmatrix} \quad (30)$$

Burada $\beta = \gamma_1\gamma_2/(1-\gamma_1-\gamma_2)$.

Önemli olan bir başka nokta ise

$$q_{11}(s) = q_{22}(s) = \frac{1-sT\beta}{(1+sT)^2} \quad (31)$$

G matrisinin değişken sıfırı sağ tarafta olunca ayrıştırıcı kullanılmış sistemde de bir sıfır sağ tarfa olacaktır. Burada dikkat edilecek bir başka husus ise G(s) sistemi minimum fazlı ise K_{12} and K_{21} pozitifdir aksi takdirde bu değerler negatiftir.

Yukarıdaki statik ayrıştırıcı algoritmasını dörtlü tank sistemi için uygularsak aşağıda belirtilen ayrıştırıcıyı elde etmiş oluruz.

$$D = \begin{pmatrix} 5.9554 & -2.5524 \\ -2.5524 & 5.9554 \end{pmatrix} \quad (32)$$

4. DÖRTLÜ TANK SİSTEMİ İÇİN KONTROLÖR TASARIM YÖNTEMLERİ

4.1 Decentralized Kontrolörlerin Tasarımı

Merkezi olmayan(decentralized) PID kontrolörü bulmak için, $Q(s)$ transfer fonksiyonunun diyagonal terimleri dikkate alınır. Sistemin yapısı olarak tüm diyagonal elemanların statik kazançları birliktedir. Standart yöntemler PI tasarımı için veya her $q_{kk}(s)$ transfer fonksiyonunun PID kontrolörü için kullanılabilir. Belirtilen integral kazancı ile PI kontrolör parametreleri baskın kutup tasarımı kullanarak elde edilebilir [20]. Diğer bir olasılık bir dayanıklılık kısıtlamasına bağlı olarak integral kazancını maksimize eden bir optimizasyon tekniği kullanmaktır. Böyle bir yöntem yük bozucularının reddine göre optimize edilen kontrolörleri verecektir. Bu yöntem sistemde etkileşim olmadığı durumda integral kazançlarını $k_{Ik}^0 > 0$ olarak verecektir. $\lambda_k = k_{Ik} / k_{Ik}^0$ oranı etkileşim yüzünden meydana gelen performans kayıplarının ölçütüdür. Eğer $\lambda_k \geq 1$ ise aslında döngü dinamikleri tarafından verilen performans kayıpları ve performans limitleri bulunmamaktadır. Eğer $0 \leq \lambda_k < 1$ ise kontrolörlerin detune edilmesi zorunludur. Bu durumda bize kapalı çevrim bant genişliği özellikleri ile PID kontrolör tasarımı yöntemleri gerekir. Bu amaçla kullanılan pek çok yöntem bulunmaktadır. PID kontrolör tasarımındaki iki basit teknik; baskın kutup atama yöntemi ve model indirgemeye dayalı kutup yerleştirme yöntemidir.(bkz. [18] ve [20]).

4.2. Tasarım Algoritmasının Özeti

Önerilen tasarım prosedürü aşağıdaki algoritmada özetlenebilir:

1. Statik ayrıştırıcı bulunur $D = G^{-1}(0)$.
2. İstenilen etkileşim göstergeleri K_1 , K_2 'yi ve maksimum TGTC duyarlılıklarını M_{s1} , M_{s2} değerleri seçilir.
- 3.Eğer Adım 2 de belirtilen TGTC kontrolörler integral kazançlarının maksimizasyonu ile tasarlandıysa [21], bu kontrolörler uygulanmalı, yoksa Adım 4'e geçilir.

4. Adım 2'ye gidilebilir fakat daha düşük performans tasarım özellikleri olan veya özellikleri yerine getirebilecek başka bir TGTC tasarım yöntemi tercih edilebilir. (ör. Baskın kutup tasarımı[18]). Algoritma olarak tanımlanan, özel TGTC kontrolörler için ilk tasarım seçimi integral kazancını maksimize eder. [1] Eğer bu bir kapalı çevrim sistemde çok büyük bir etkileşim ile sonuçlanırsa, TGTC kontrolörler yeniden ayarlanmalıdır. Bu ayarlama istenilen tasarım özelliklerini (K_i , ve M_{si}) değiştirerek veya başka bir TGTC kontrol metodu kullanarak yapılabilir .

4.3. Decentralized Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı

Bulanık mantık kontrol teorisi Zadeh tarafından 1965 yılında çıkarılmıştır. Bulanık mantık küme teorisinde, bulanık kümeler muğlak ve belirsizdir ve bu da sistemleri yaklaşık olarak belirlenmesine olanak tanır. Çok değişkenli mantık, olasılık teorisi ve sistem bilgisiyle bulanık kontrolörler, insan düşünce sistemi gibi çalışır ve tüm fiziksel sistemlere teorik olarak uygulanabilir. Bulanık kontrolörler, özellikle sistemlerin fiziksel modellerinin tam bilinmediği sistemlerde, uygulanmaya çok elverişlidir. Dörtlü tank sisteminde bulanık kontroller sistemin iki girişini kontrol ederek alttaki tankların sıvı seviye sistemlerini kontrolünde kullanılır.

Bulanık kontrolörler, bulanıklaştırma (fuzzification), karar verme (decision making logic) ve netleştirme (defuzzification) olarak üç ana işlemin birleştirilmesiyle oluşur.

4.3.1. Fuzzification (Bulanıklaştırma)

Bulanık mantık nümerik değişkenlerden ziyade sözel değişkenlerle çalışır. Nümerik değişkenleri, sözel değişkenlere çevirme işlemine bulanıklaştırma denir. Dörtlü tank sisteminde uygulanan bulanık kontrolörün giriş değerleri; tank seviye hataları (h_1 ve h_2) ve hataların değişimidir, çıkış değeri ise sisteme uygulanacak olan gerilimdir (v_1, v_2).

Hata ve hatanın değişimi üç ayrı sözel değişken olarak tanımlanmıştır. Bulanık kontrolörün çıkışı ise yine üç ayrı sözel değişken ile tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonları üçgen olarak tanımlanıp sözel değişkenler belirtilmiştir.

4.3.2. Decision Logic stage (Karar Verme)

Karar verme aşaması bulanık kontrolörün nasıl çalışacağını belirler. Bu kısım normal kontrolörün verebileceği cevaplardan yola çıkılarak hazırlanmıştır. Karar verme aşaması dörtlü tank sistemi için dokuz kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallar aşağıdaki

çizelgede olduğu gibi tanımlanmıştır. Karar verme aşaması giriş değişkenini işleyerek çıkış değişkenini belirler.

4.3.3. Defuzzification (Netleştirme)

Bu kısımda ise karar verme aşamasında belirlenen kararın numerik bir değere çevrilmesi yapılır. Bulanık kontrolörün parametreleri Ek A1’de verilmiştir.

4.4. Dörtlü Tank Sistemi İçin Kontrolör Tasarımı

Dörtlü tank sisteminin valflerinin $y_1 = y_2 = y \in (0,1/2)$. olduğunu varsayalım. Sistem non-minimum fazlı ve sağ yarı düzlem sıfırları $(1-2y)/(T_y)$. noktasında bulunmaktadır. $T=1$ ve $y=1/3$. olduğu özel durumu inceleyelim. $K = K_1 = K_2$ değerlerinin birbirine eşit ve 0.2’den küçük olduğunu ve maksimum duyarlılık $M_{s1} = M_{s2}, \sqrt{2}$ değerindedir(3), burada tasarım kısıtlaması $k_I = k_{I1} = k_{I2} < 0.15$ dır ve bu sürecin simetrisinden dolayı, özdeş TGTC kontrolörler $c_1 = c_2$ seçilmiştir.

Kutup atama Yöntemi ile:

$$q_{11}(s) = q_{22}(s) \approx \frac{1 - sT\beta}{1 + s2T} \quad (33)$$

Denklemden

$$k_p = \frac{2\omega_0^2 T^2 \beta + 4\xi\omega_0 T - 1}{\omega_0^2 T^2 \beta^2 + 2\xi\omega_0 T \beta + 1} \quad (34)$$

$$k_I = \frac{\omega_0^2 T(2 + \beta)}{\omega_0^2 T^2 \beta^2 + 2\xi\omega_0 T \beta + 1}$$

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (35)$$

Elde edilir.

Sağ yarı düzlem sıfırı $(1-2y)/(T_y)=1$ ω_0 değerinin 1’den küçük olması gerektiğini önerir. Yukarıdaki denklemlerde parametrik olarak verilen değişkenleri yerine koyarsak kontrolör katsayıları yaklaşık olarak $K_p=4.8$, $K_i=0.5$ bulunur.

Dörtlü tank sistemi TGTC sistemlerin thumb kuralını ÇGÇÇ sistemlere uyarlanmasını da öngörmektedir. Bazı durumlarda sağ yarı düzlemin sıfırını da dikkate almak gerekebilir. [22].

4.5 Tartışmalar

Önerilen kontrol şeması statik ayrıştırıcı ve iki tekil döngüden oluşan PI kontrolörlerden oluşan basit çokdeğişkenli bir kontrolördür. Kontrolörün basitliğine rağmen pratikte pek çok kontrol problemi ile başa çıkabilir Ayrıca hemen her DCS sistemine uygulanması kolaydır. Kontrolörün parametrelerinin bulmak için kullanılan metod bu bölümde anlatılmıştır. Burada anahtar varsayım, etkileşimlerin çok şiddetli olmadığıdır [1]. Bu nicelik etkileşim indisleri K_1 ve K_2 ile görülür. PID kontrolörlerin olası ayarlanması bu indisler ile sayısallaştırılmış olur.

Etkileşim indisleri K_1 ve K_2 hem sürece hem de kontrolöre bağlıdır. RGA'nın çok sıkı kontrol altında etkileşimi yansıttığına dikkat edin. [1] Bu bölümde gösterilen indisler etkileşimin döngülerini tekrar ayarlanarak azaltılabileceği gerçeğini yakalamıştır. Ayrıca unutmayın ki bu etkileşimler dinamikleri de dikkate almaktadır. Dekouple edilmiş sistem için dinamik RGA küçük I s I değerleri için yaklaşık olarak $1 - K_{12}K_{21}s^2$ diyagonal elemente ve $K_{12}K_{21}s^2$ anti diyagonal elemente sahip olduğu zaman, $Q(s) = G(s)D$ RGA identity matrisine eşittir.

5. TEORİK MODEL SİMULASYON VE KONTROL

5.1. Giriş

Teorik olarak elde edilen sistem ile sistem tanıma yöntemiyle elde edilen gerçek sistemin çıkışları endüstride olduğu gibi farklılıklar göstermiştir. Dörtlü tank sistemine ait parametreler ile aşağıdaki transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

$$A_1, A_2, A_3, A_4 [cm^2] = 167.416$$

$$a_1, a_2 [cm^2] = 0.6636$$

$$a_3, a_4 [cm^2] = 0.3318$$

$$k_c [V/cm] = 0.20$$

$$g [cm/s^2] = 981$$

$$k_1 [ml/V.sn] = 6.84$$

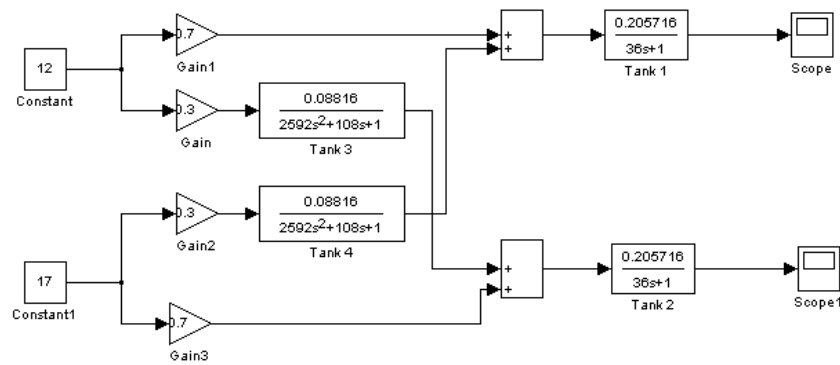
$$k_2 [ml/V.sn] = 6.84$$

$$\gamma_1, \gamma_2 = 0.70$$

$$h_1^0, h_2^0, h_3^0, h_4^0 [cm] = 10$$

$$G_-(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.205716}{1+36s} & \frac{0.08816}{(1+72s)(1+36s)} \\ \frac{0.08816}{(1+72s)(1+36s)} & \frac{0.205716}{1+36s} \end{bmatrix} \quad (36)$$

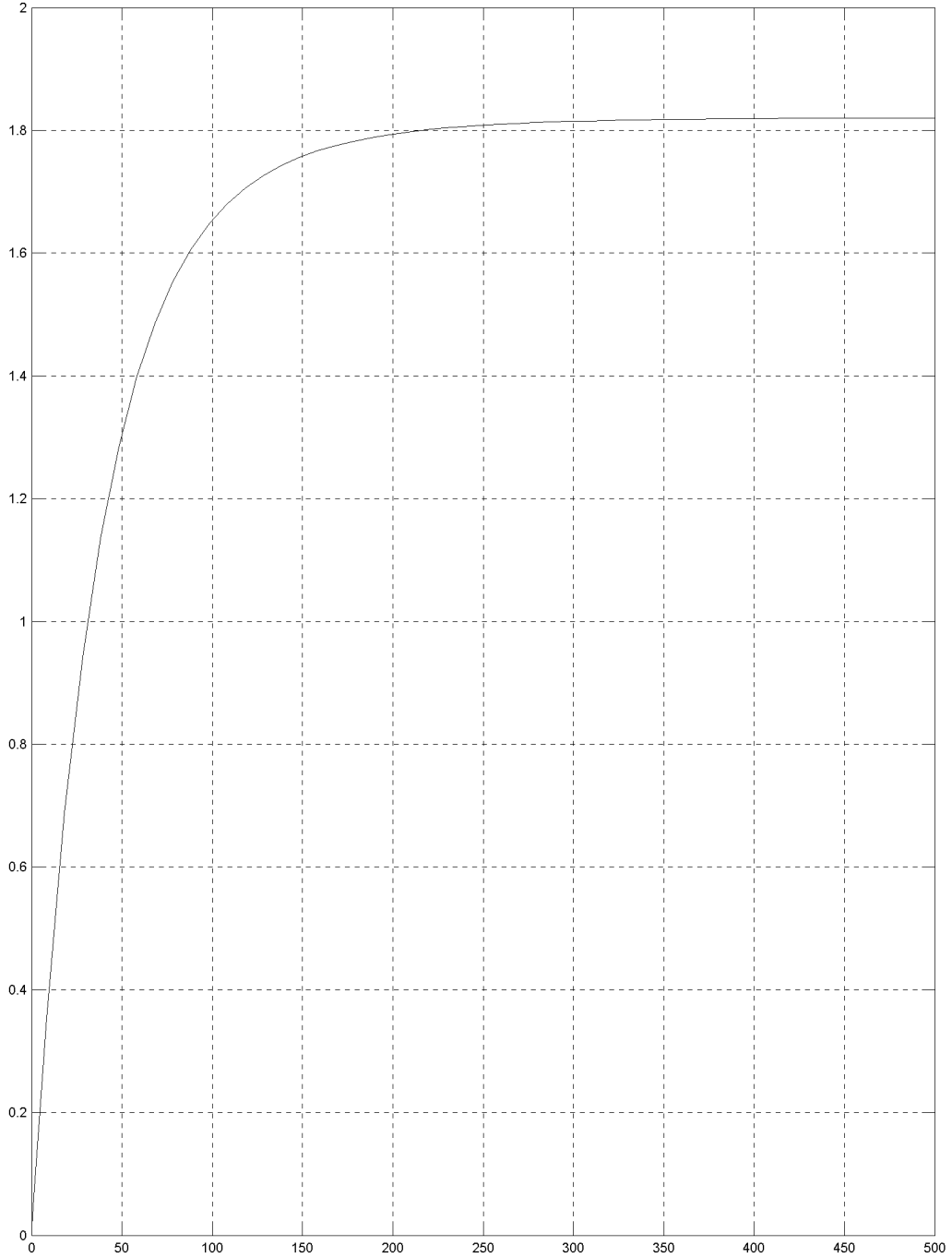
Yukarıdaki transfer fonksiyonunu MATLAB / Simulink kullanarak aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.



Şekil 5.1 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Blok Diyagramı.

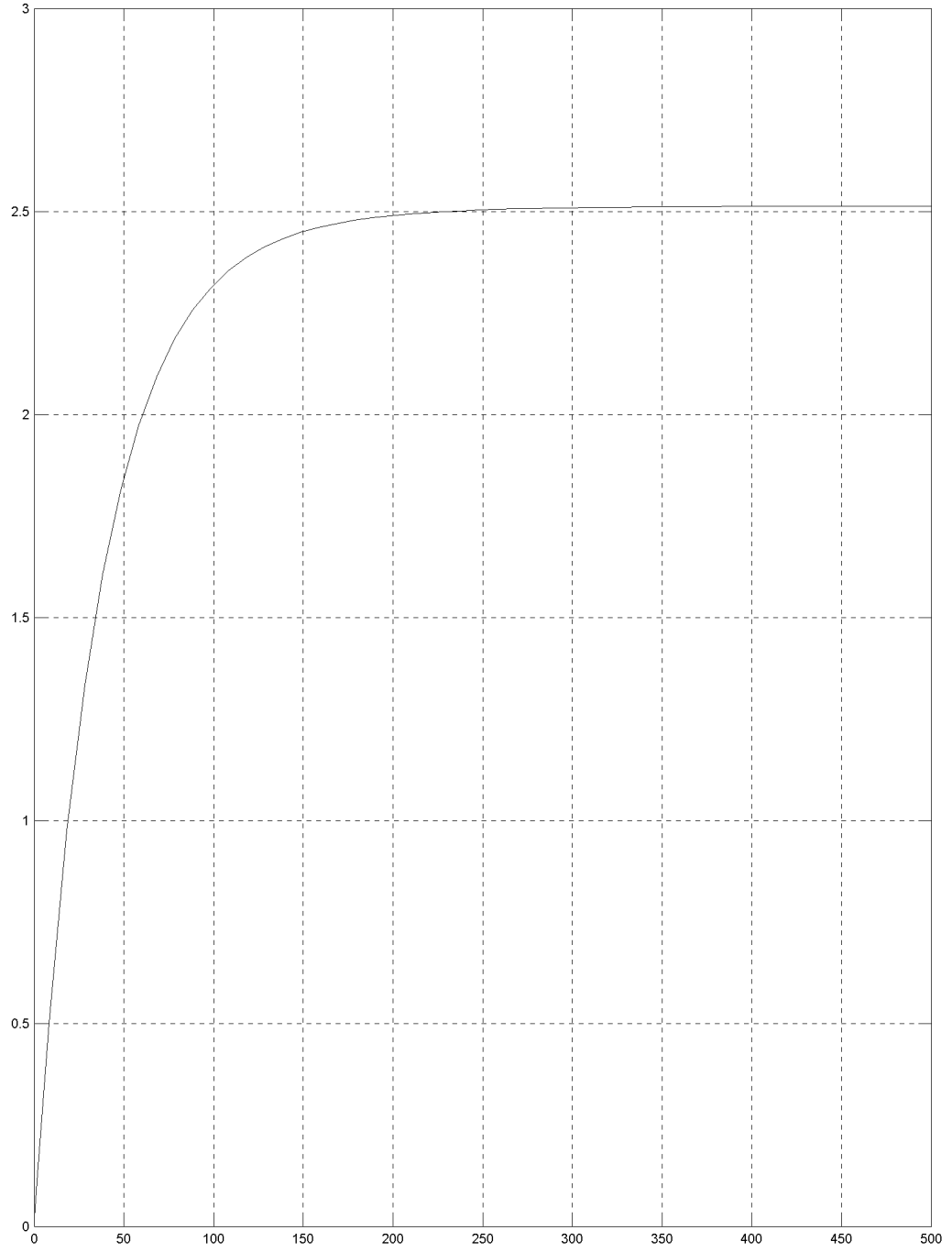
Burada Tank 1 ve Tank2 sistemin kontrol edilmek istenen alttaki tanklarına, tank 3 ve tank 4 ise sistemde etkileşimlere karşılık gelmektedir. Sistem cevapları alınırken Tank 1 in 12 ye ve Tank 2 nin de 17 referans işaretleri verilmiştir.

Sistemin açık çevrim cevapları aşağıdaki gibidir.



Time offset: 0

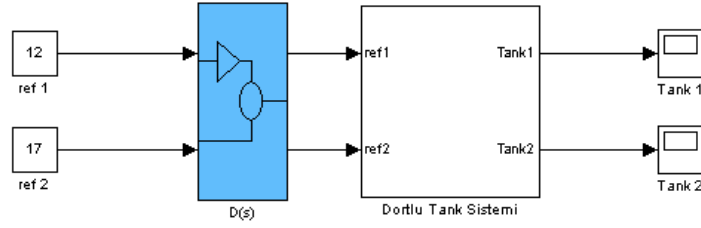
Şekil 5.2 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 1 Seviyesi.



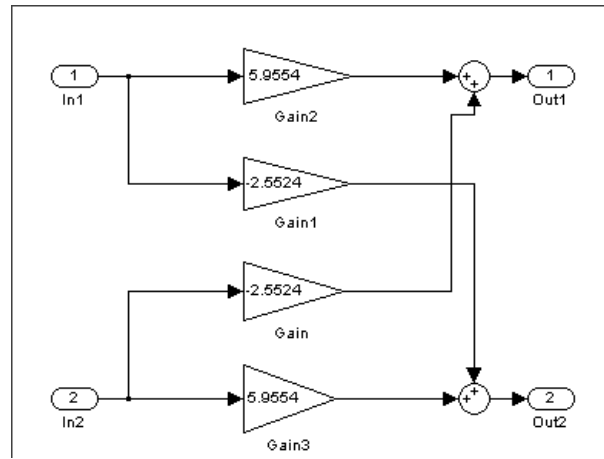
Time offset: 0

Şekil 5.3 : Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 2 Seviyesi.

Bir sonraki aşamada Bölüm 3 te tasarlanan ayrıştırıcı sisteme uygulanmıştır ve sistemin blok diyagramı ile ayrıştırıcının blok diagramları aşağıda gösterilmiştir.

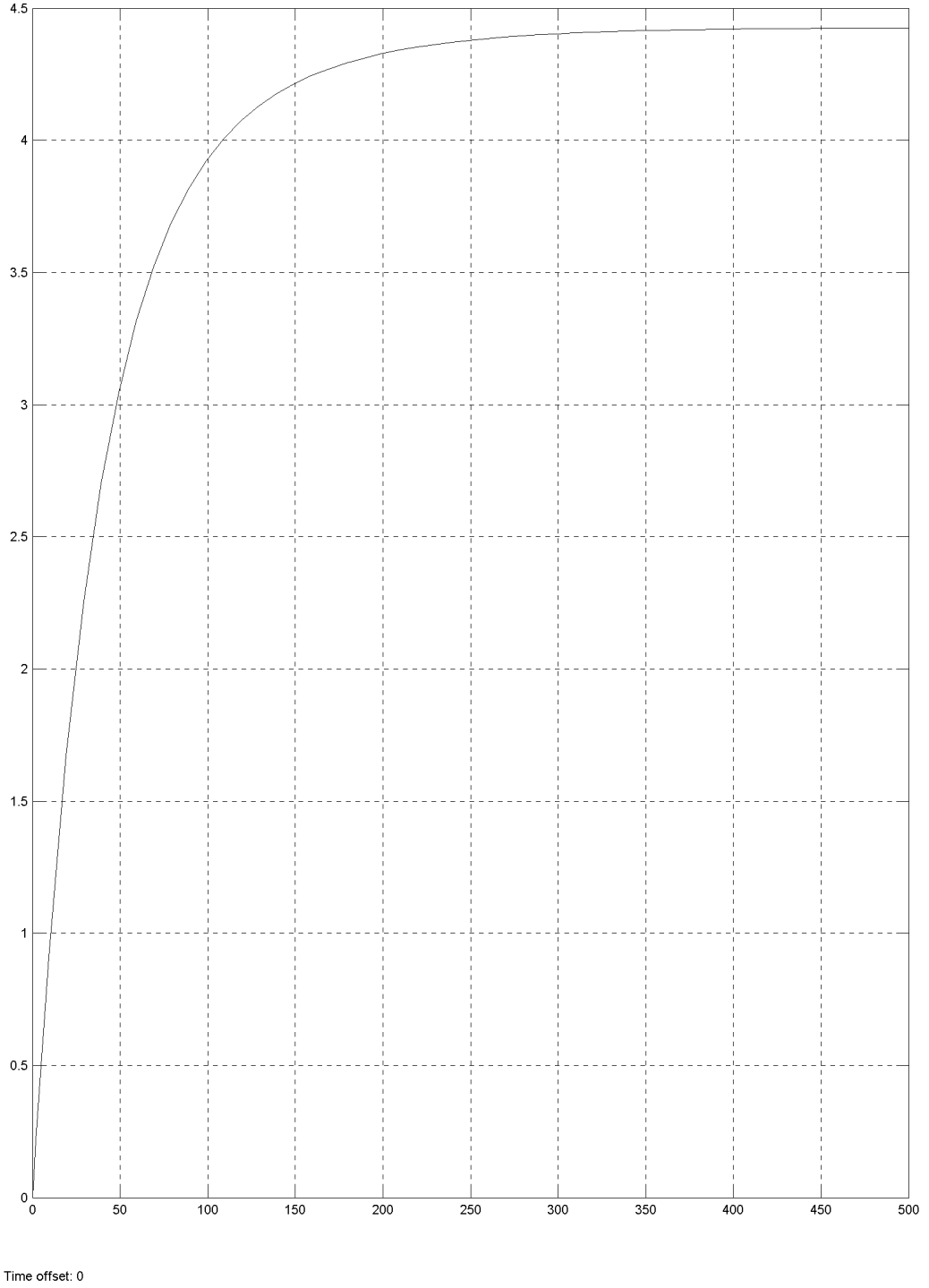


Şekil 5.4 : Ayrıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Blok Diyagramı.

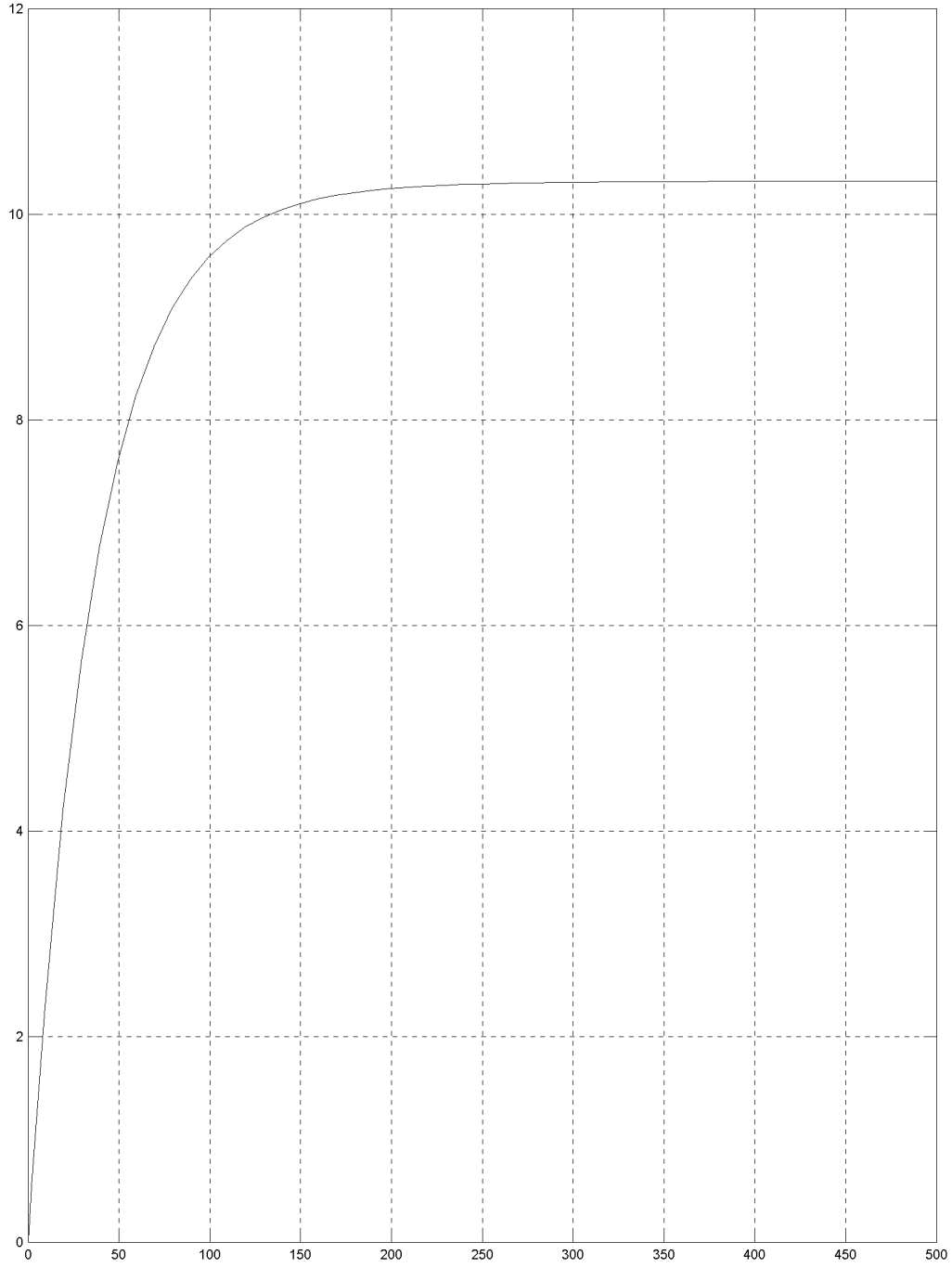


Şekil 5.5 : Ayrıştırıcı Blok Diyagramı.

Ayrıştırıcı Kullanılmış sistemin yanıtları aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 5.6 : Ayrıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 1 Seviyesi.

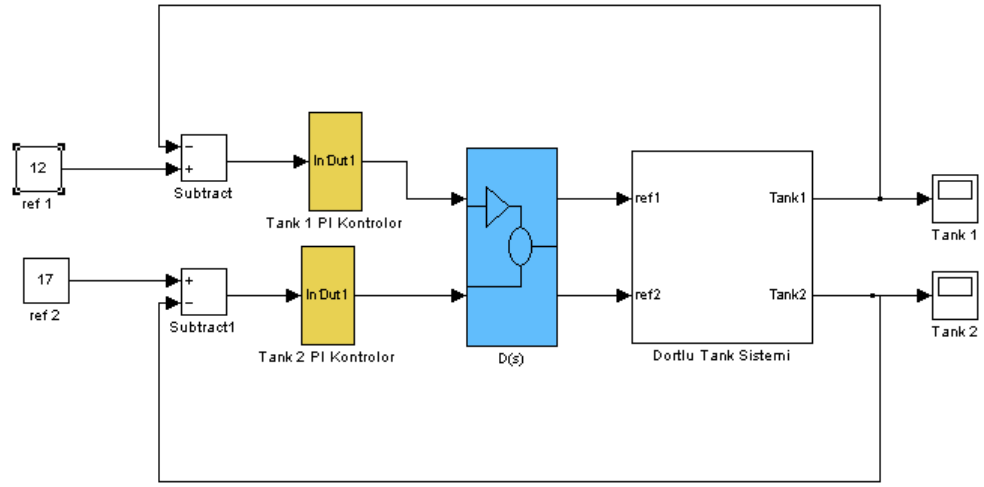


Time offset: 0

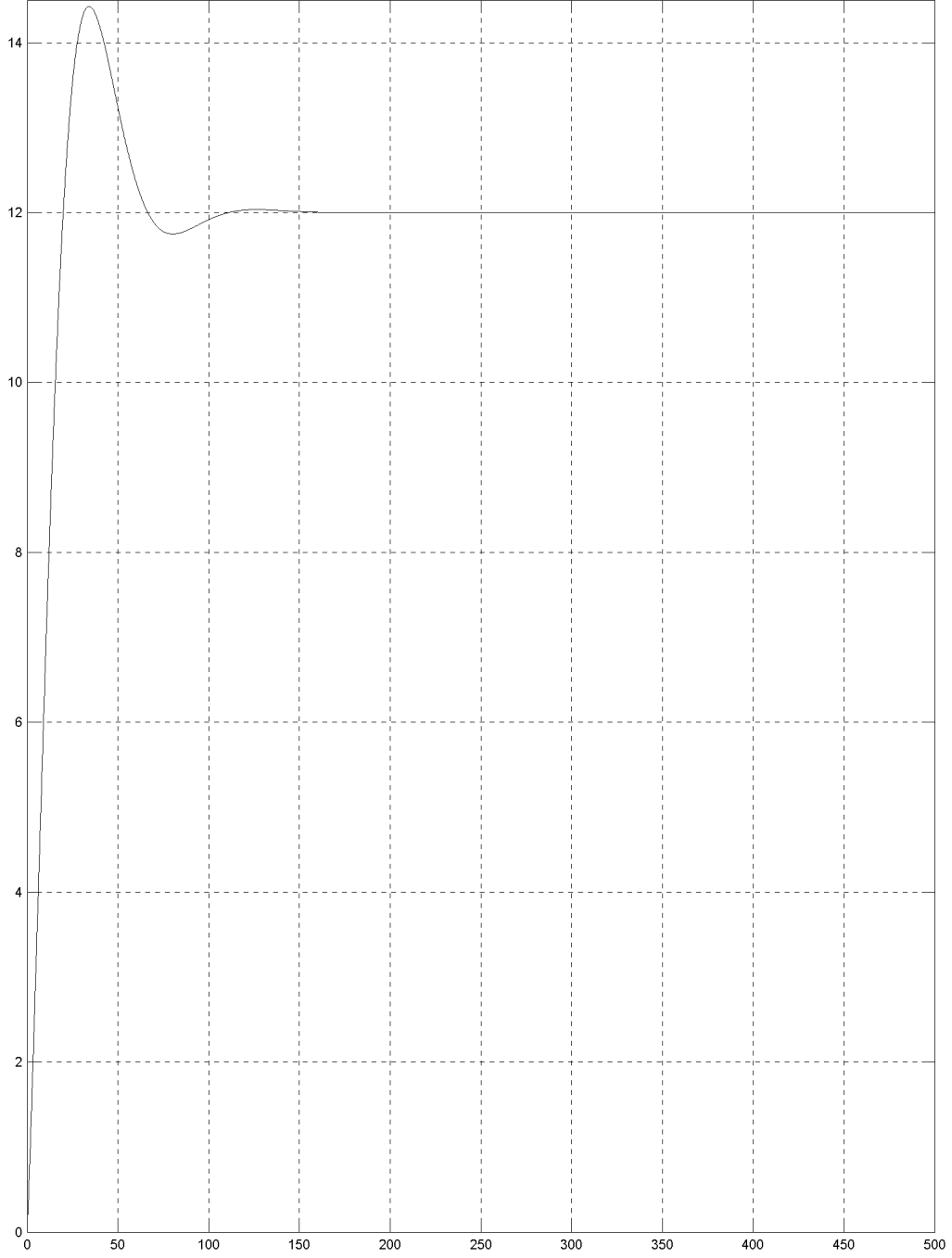
Şekil 5.7 : Ayrıştırıcı Kullanılmış Dörtlü Tank Sistemi Açık Çevrim Tank 2 Seviyesi.

Sistem yanıtlarından da görüldüğü gibi ayrıştırıcı kullanılmış sistem açık çevrimde çok daha iyi yanıtlar vermektedir. Tabii ki bu ayrıştırıcının etkisini görmek için yeterli değildir. Ayrıştırıcının etkisi sistemin kapalı çevrim kontrolünde daha net görülecektir.

Teorik olarak elde edilen sistem transfer fonksiyonu ve ayrıştırıcının amacı sistemi en uygun şekilde kontrol edebilmektir. Bu amaçla hazırlanan sistemin blok diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

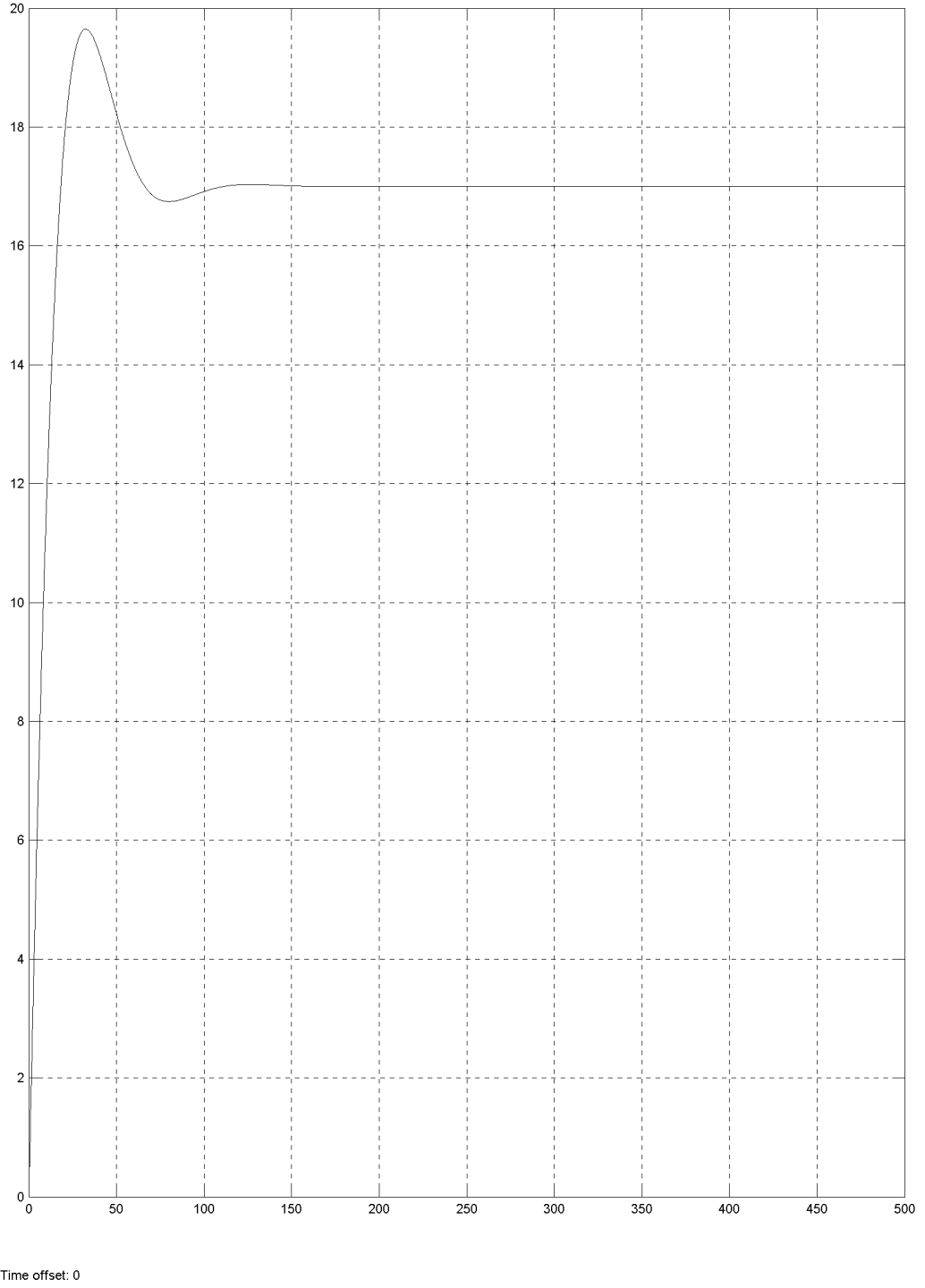


Şekil 5.8 : Ayrıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Blok Diyagramı.



Time offset: 0

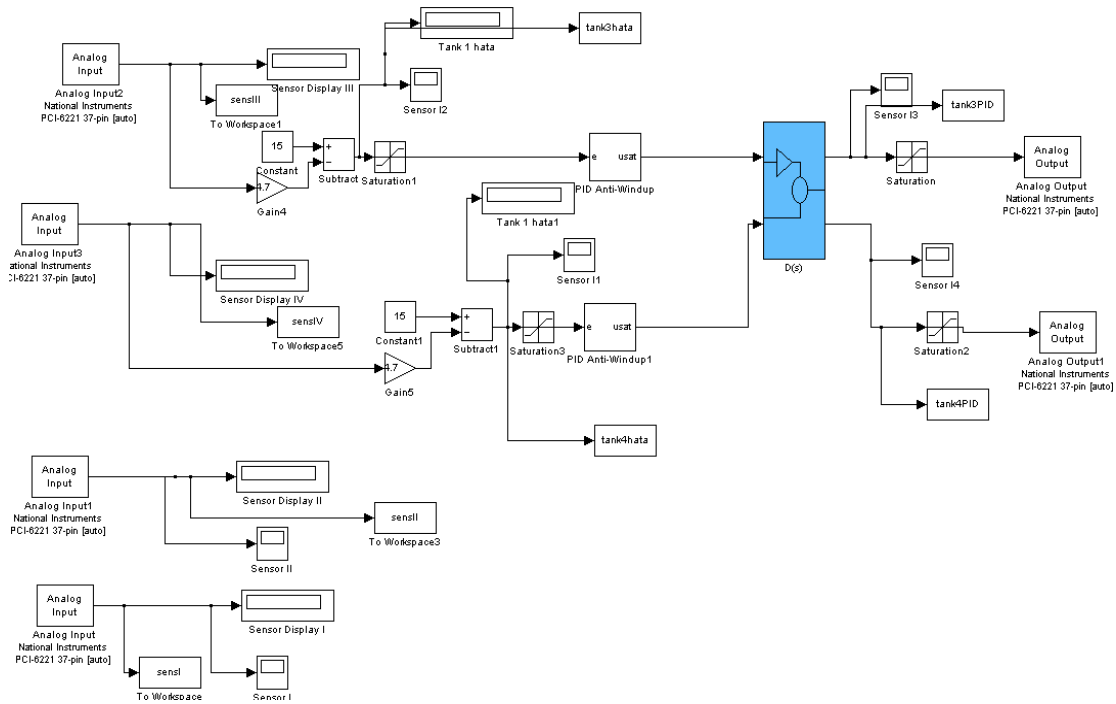
Şekil 5.9 : Ayrıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Tank 1 Seviyesi.



Şekil 5.10 : Ayrıştırıcı Kullanılmış, PI Kontrolörlü Dörtlü Tank Sistemi Tank 2 Seviyesi.

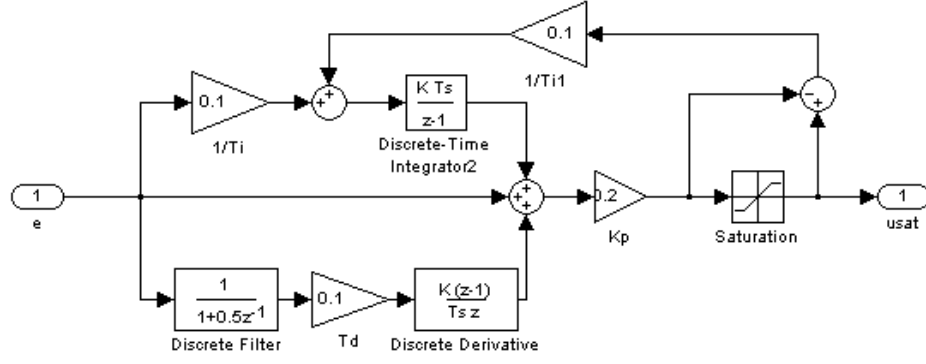
5.2 Dörtlü Tank Sistemi Gerçek Zamanlı Kontrolü

Dörtlü tank sistemi daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi iki farklı kontrol algoritmasıyla kontrol edilmiştir. Bunlardan ilki klasik PID diğeri ise Bulanık PID ile gerçekleştirilmiştir. Sistemde ayrıştırıcıların etkisini daha net görebilmek için aynı kontrol algoritması sisteme ayrıştırıcı olmadan uygulanmıştır. Sistemden elde edilen seviye ve seviye hata bilgilerinden ayrıştırıcının sisteme etkisi daha net görülebilmektedir. Sisteme klasik PID uygulandığı zaman kontrolör sarmaya girmektedir. Bunun önüne, uygulanan saturasyon elemanlarıyla geçilememiştir. Bu yüzden sarmasız PID kontrolör algoritması uygulanmıştır. Sarmasız PID ile gerçekleştirilen kontrolün blok diyagramı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibidir.



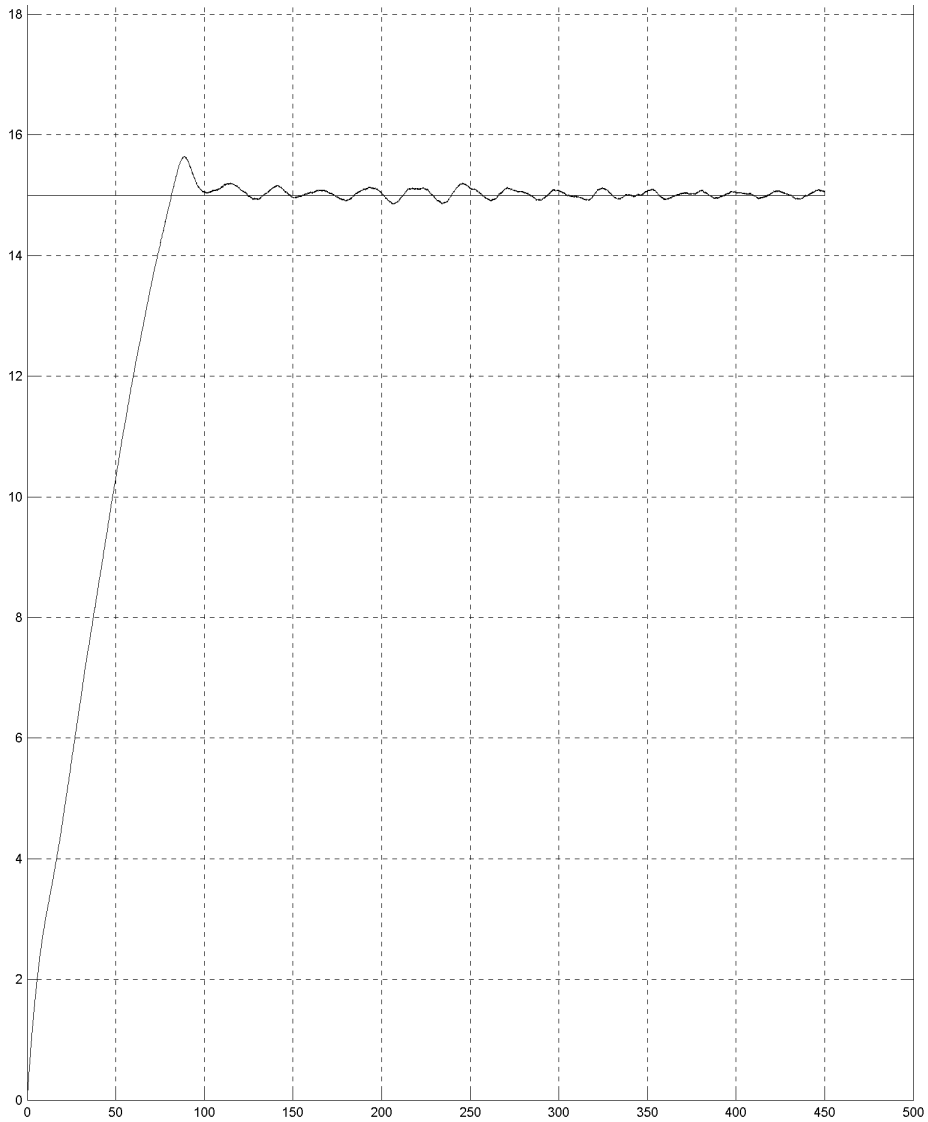
Şekil 5.11 : Sarmasız PID Kontrolör ile Gerçeklenen Sistemin Blok Diyagramı.

Sarmasız PID kontrolörün iç blok yapısı ise aşağıdaki gibidir. Bu bloktaki katsayılar, teorik modelde elde edilen katsayılar yardımıyla ve deneme – yanılma yoluyla bulunmuştur.

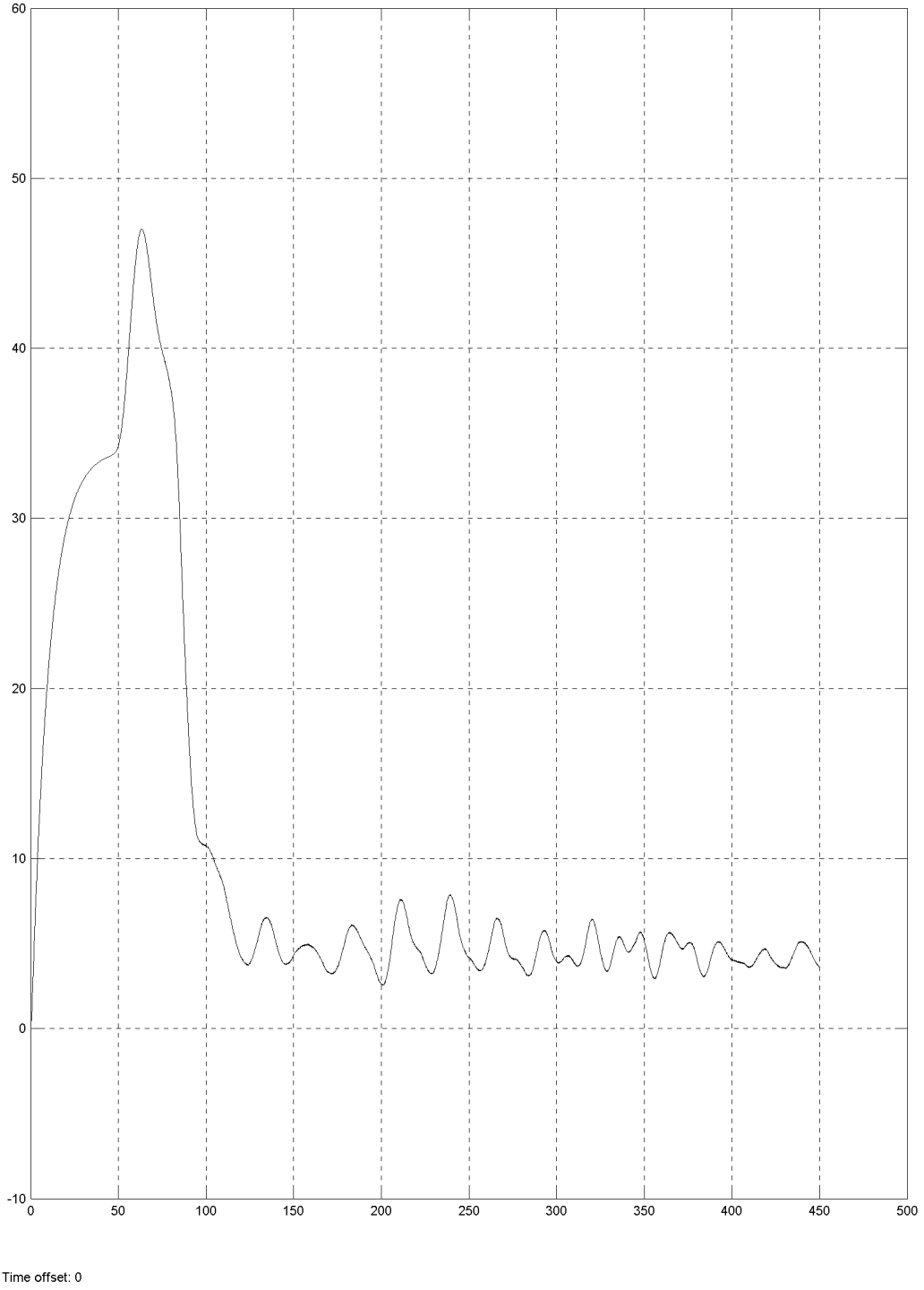


Şekil 5.12 : Sarmasız PID Kontrolör İç Blok Yapısı.

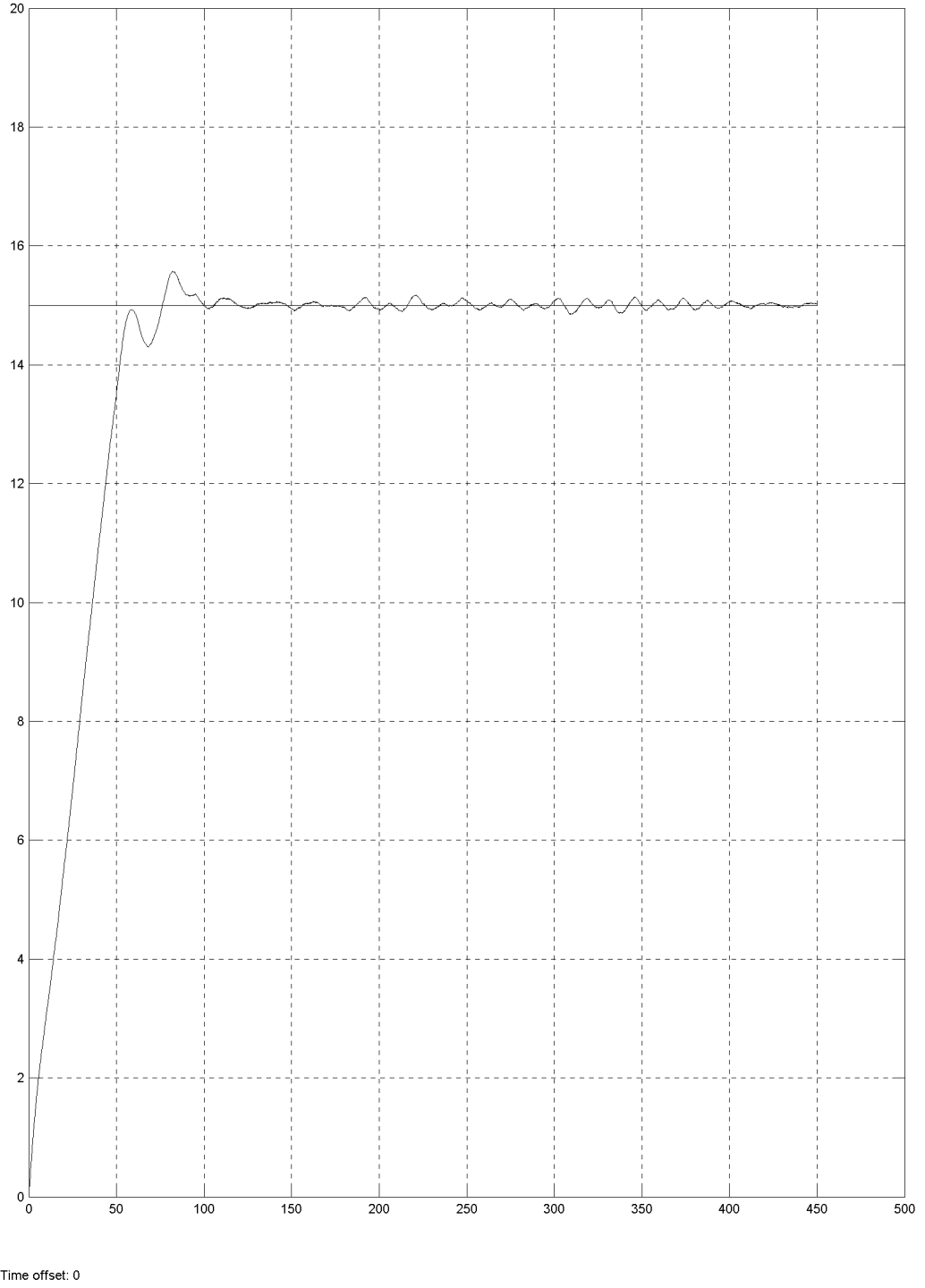
Sistemden elde edilen seviye ve kontrolör çıkış grafikleri ise aşağıdaki gibidir.



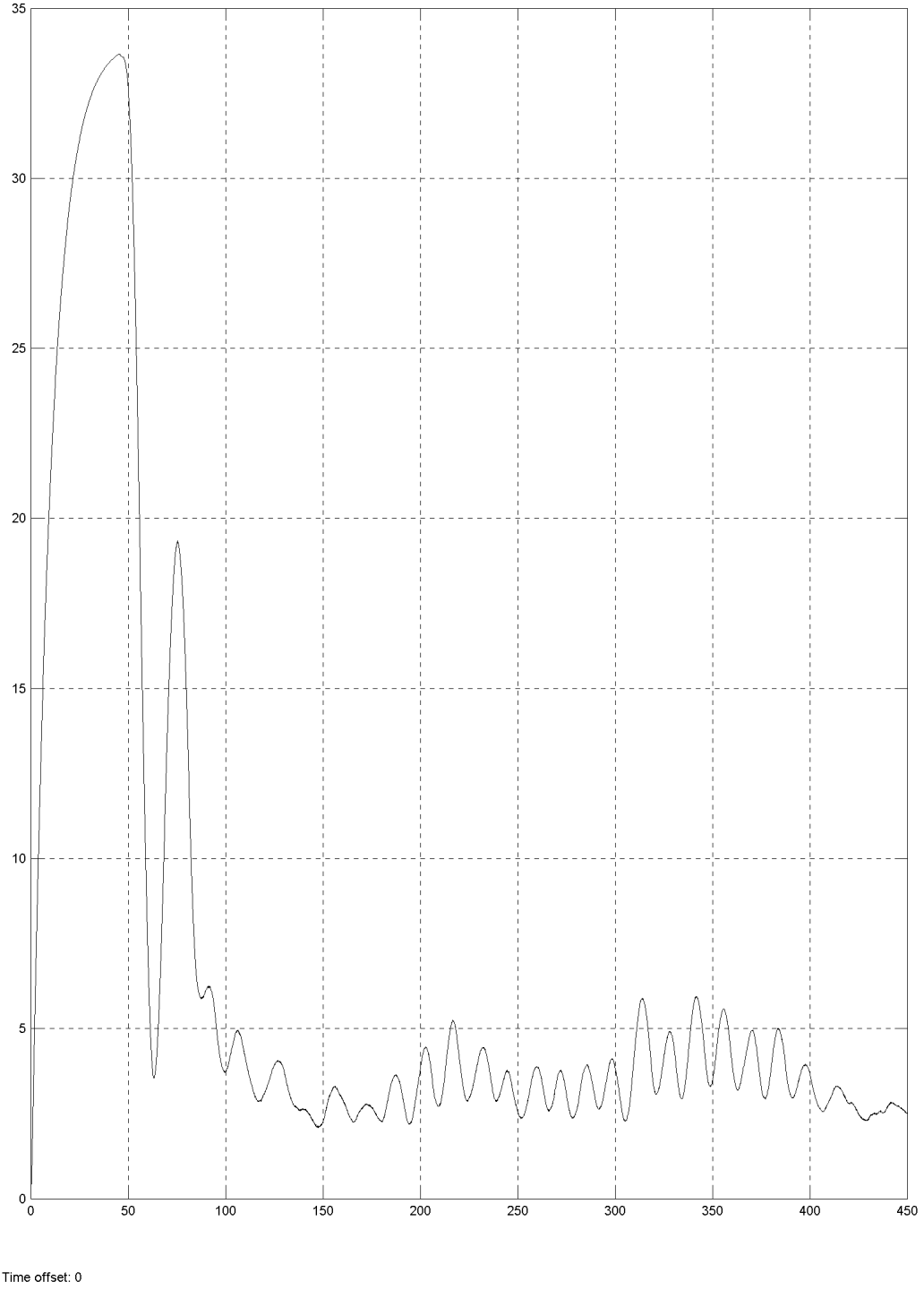
Şekil 5.13 : Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.



Şekil 5.14 : Ayrıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 PID Kontrol İşareti.

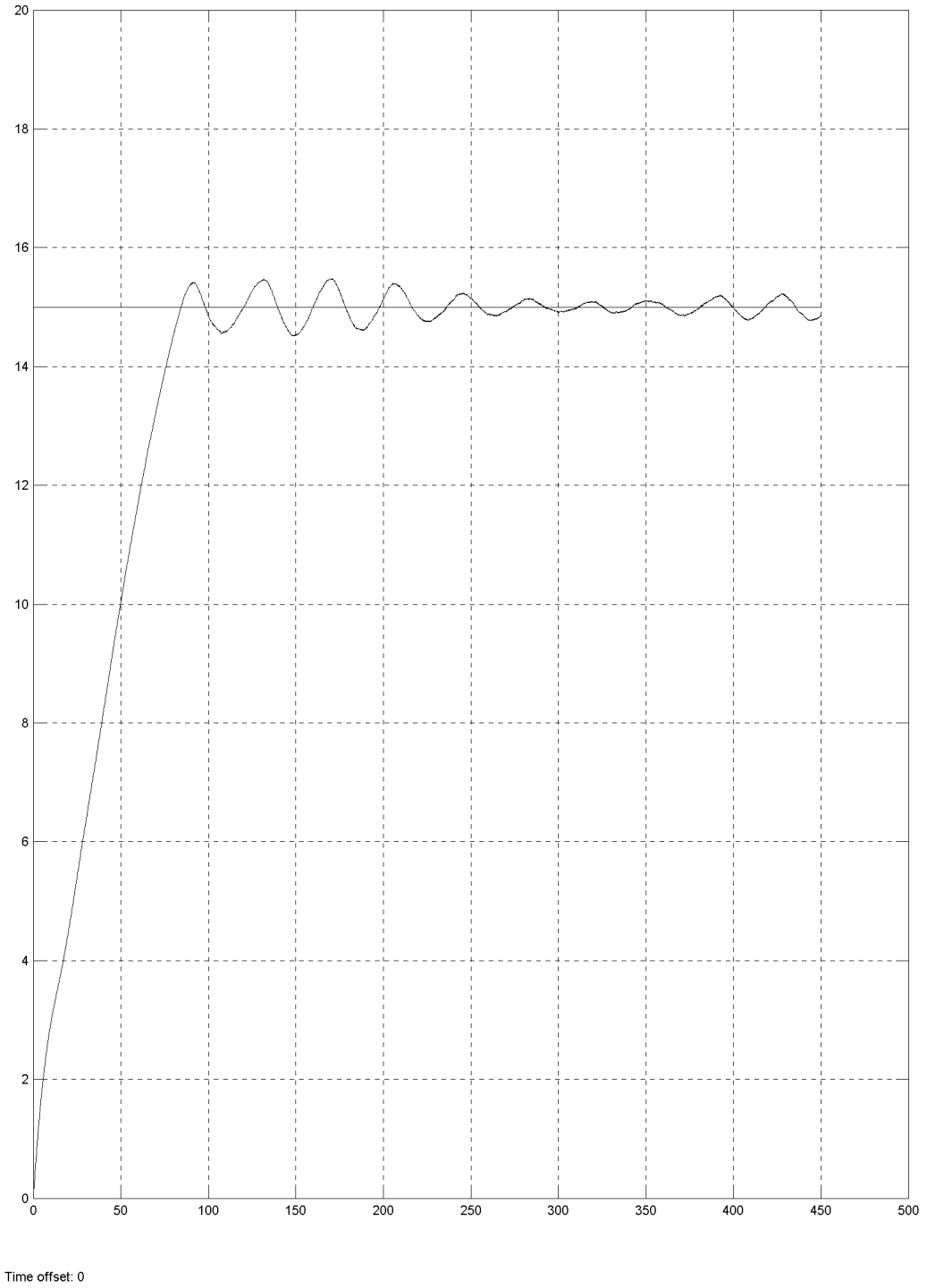


Şekil 5.15: Ayırıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.

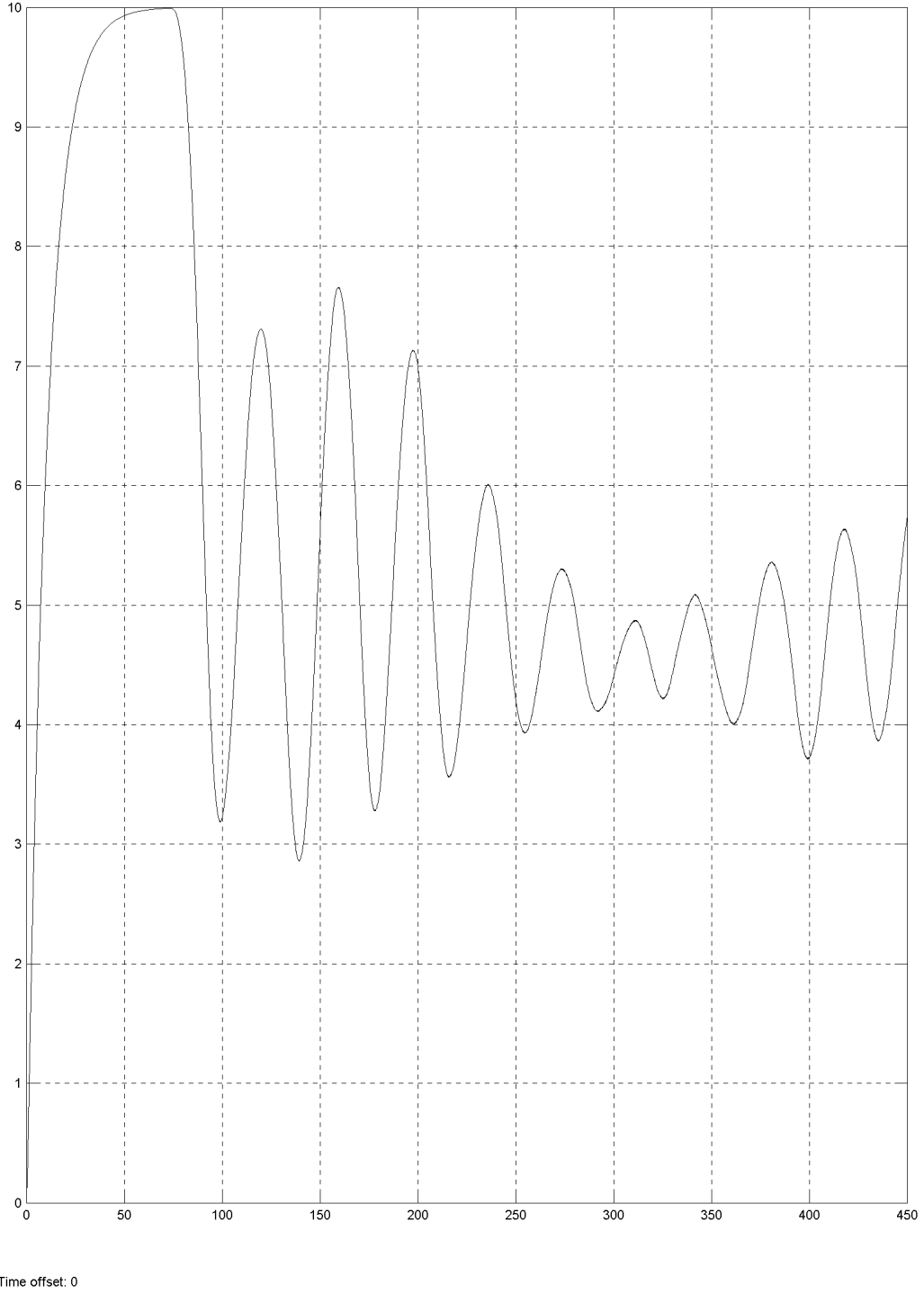


Şekil 5.16 : Ayrıştırıcı Kullanılarak PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 PID Kontrol İşareti.

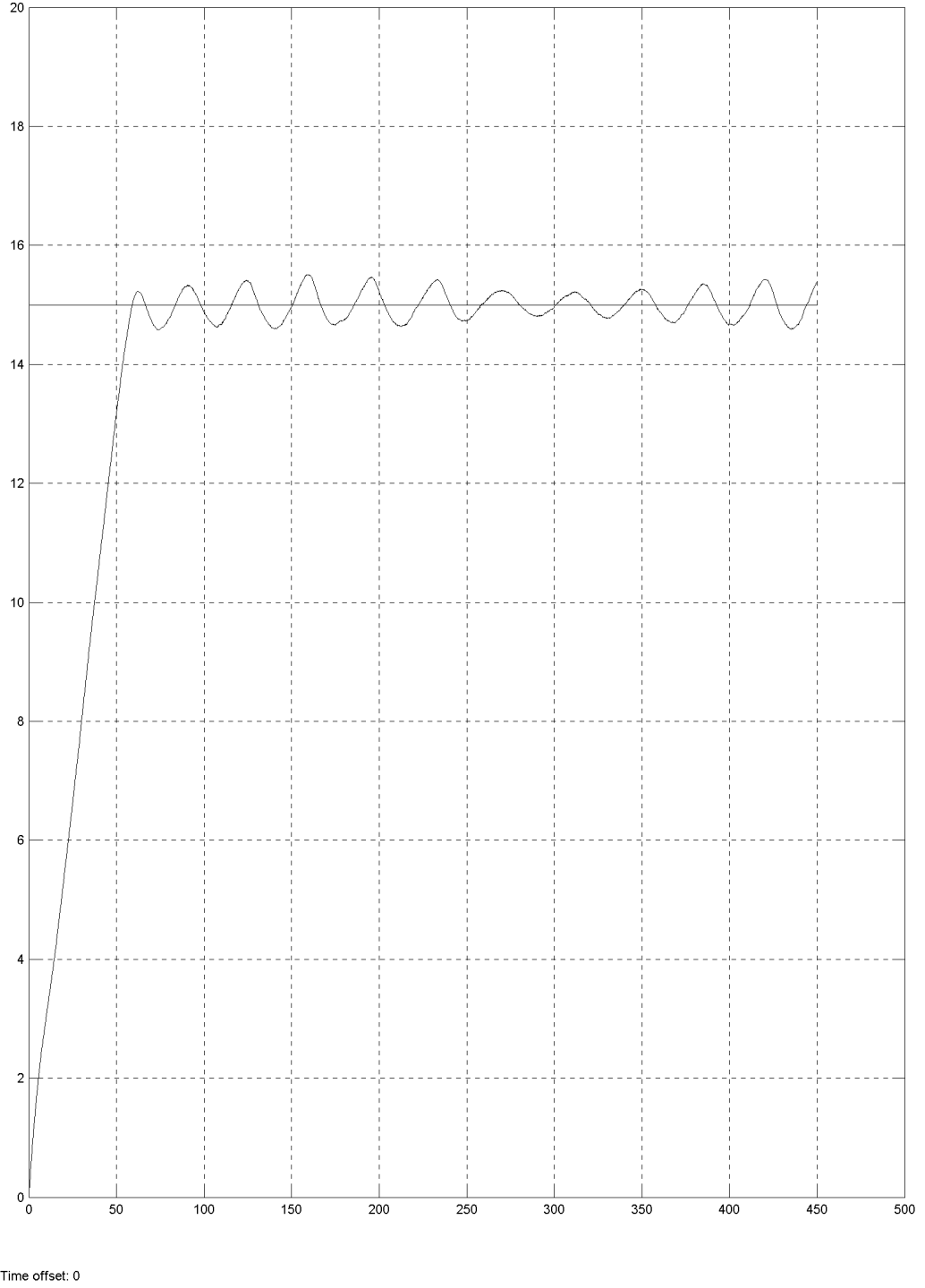
Sarmasız PID kullanılarak ancak ayrıştırıcı olmadan oluşturulan kontrol sisteminin sıvı seviye ve kontrolör çıkış grafikleri ise aşağıdaki gibidir.



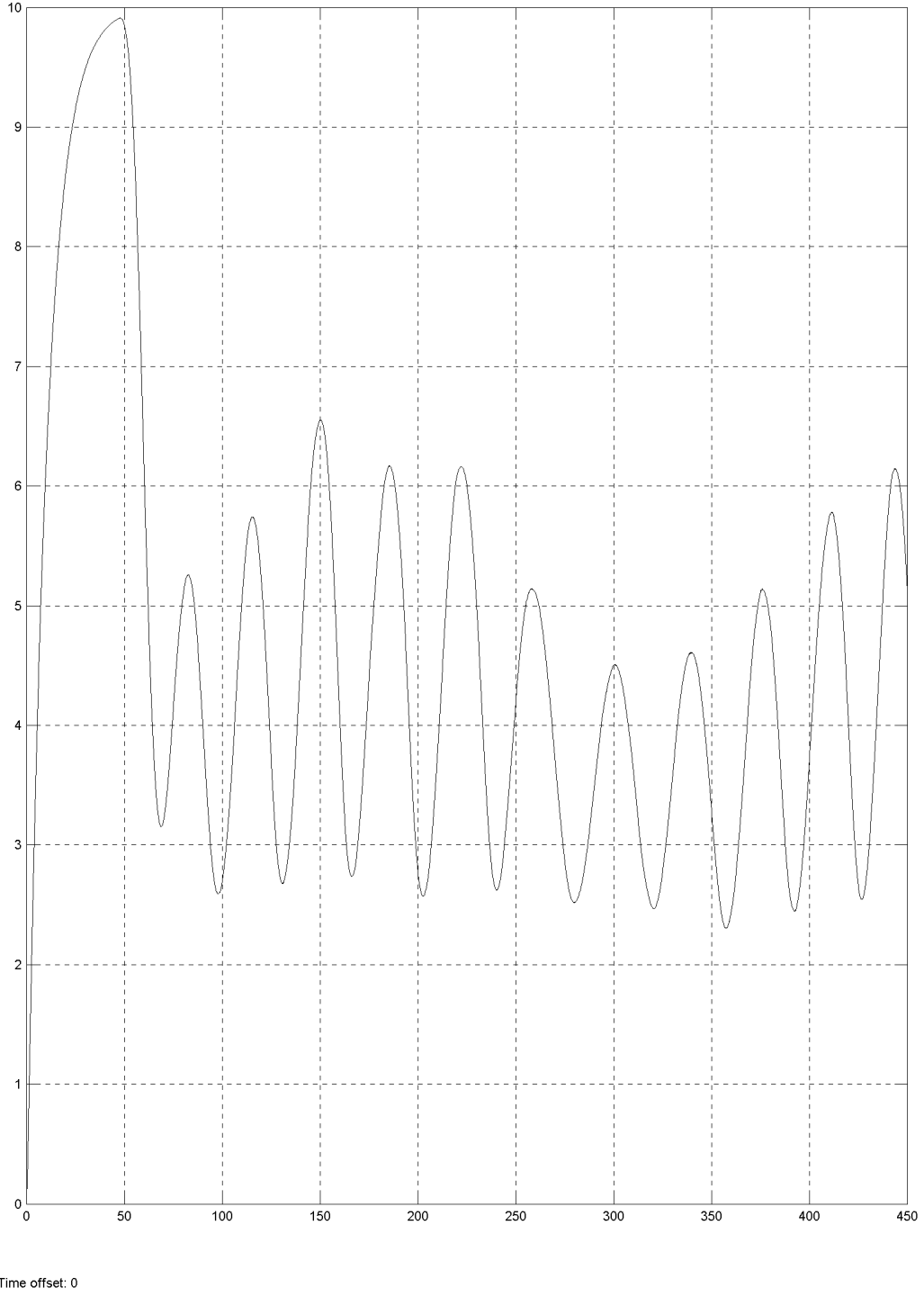
Şekil 5.17: Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.



Şekil 5.18 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1
PID Kontrol İşareti.



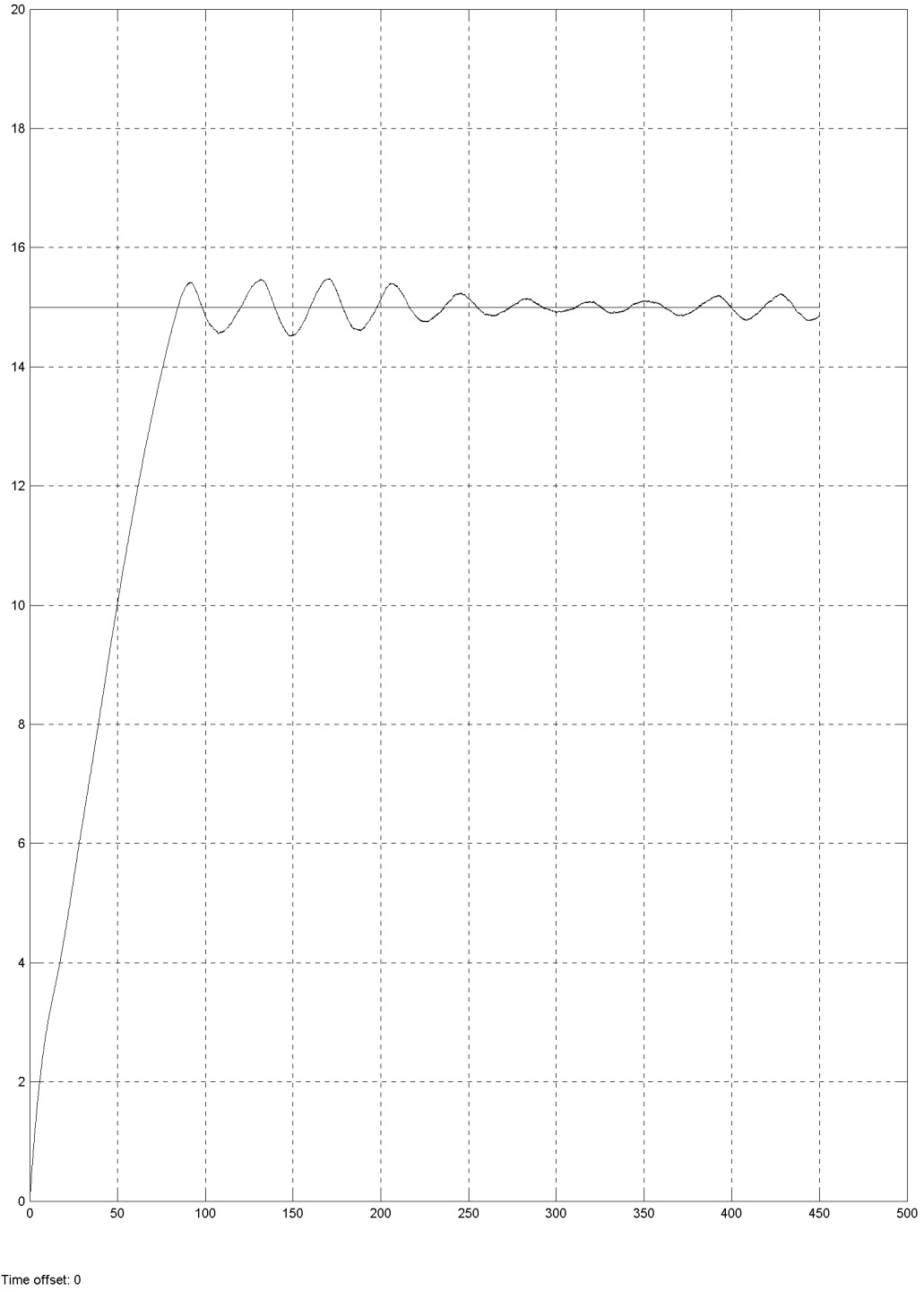
Şekil 5.19: Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.



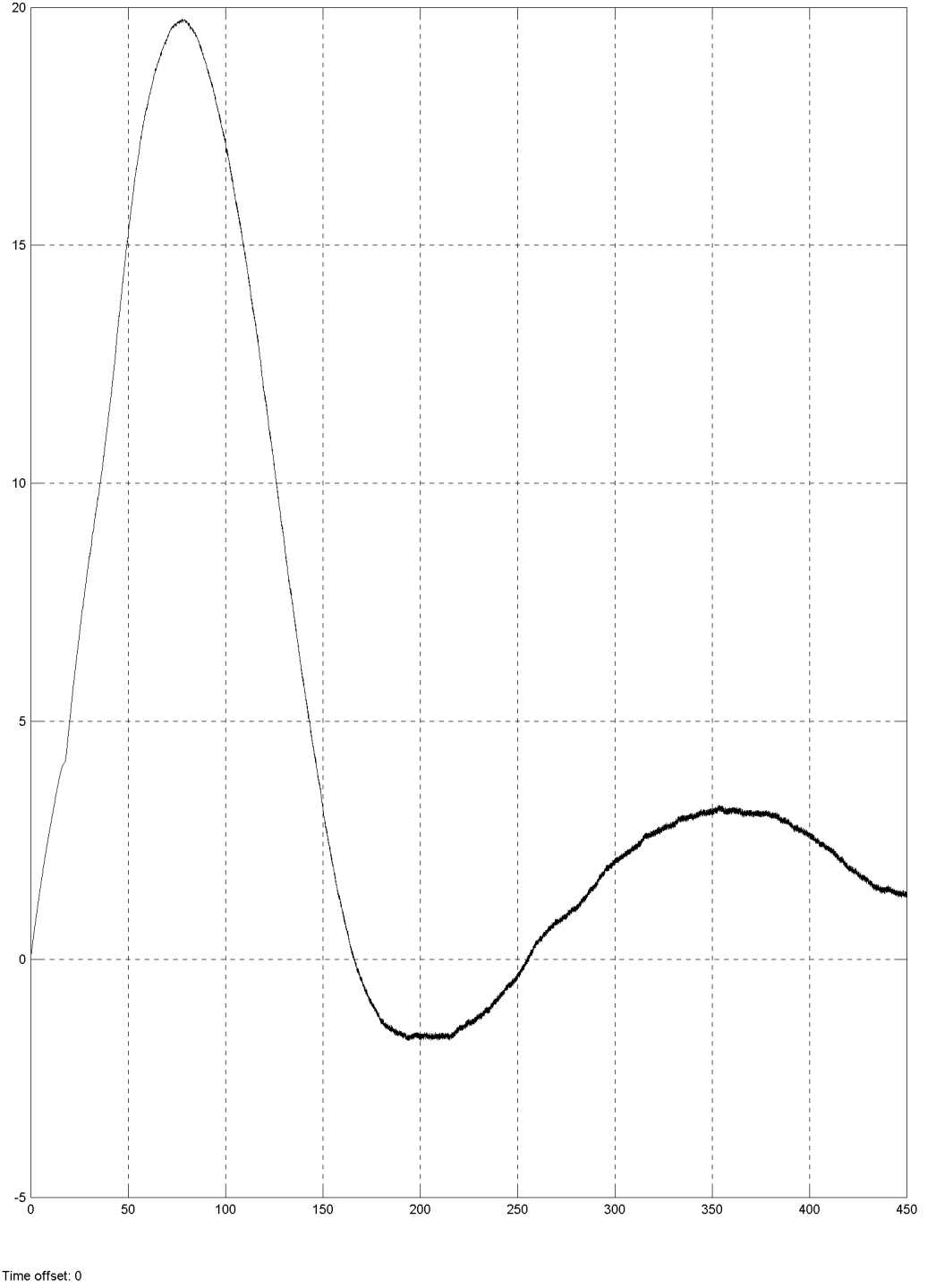
Şekil 5.20 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2

PID Kontrol İşareti.

Sistemden elde edilen seviye grafikleri ise aşağıdaki gibidir.

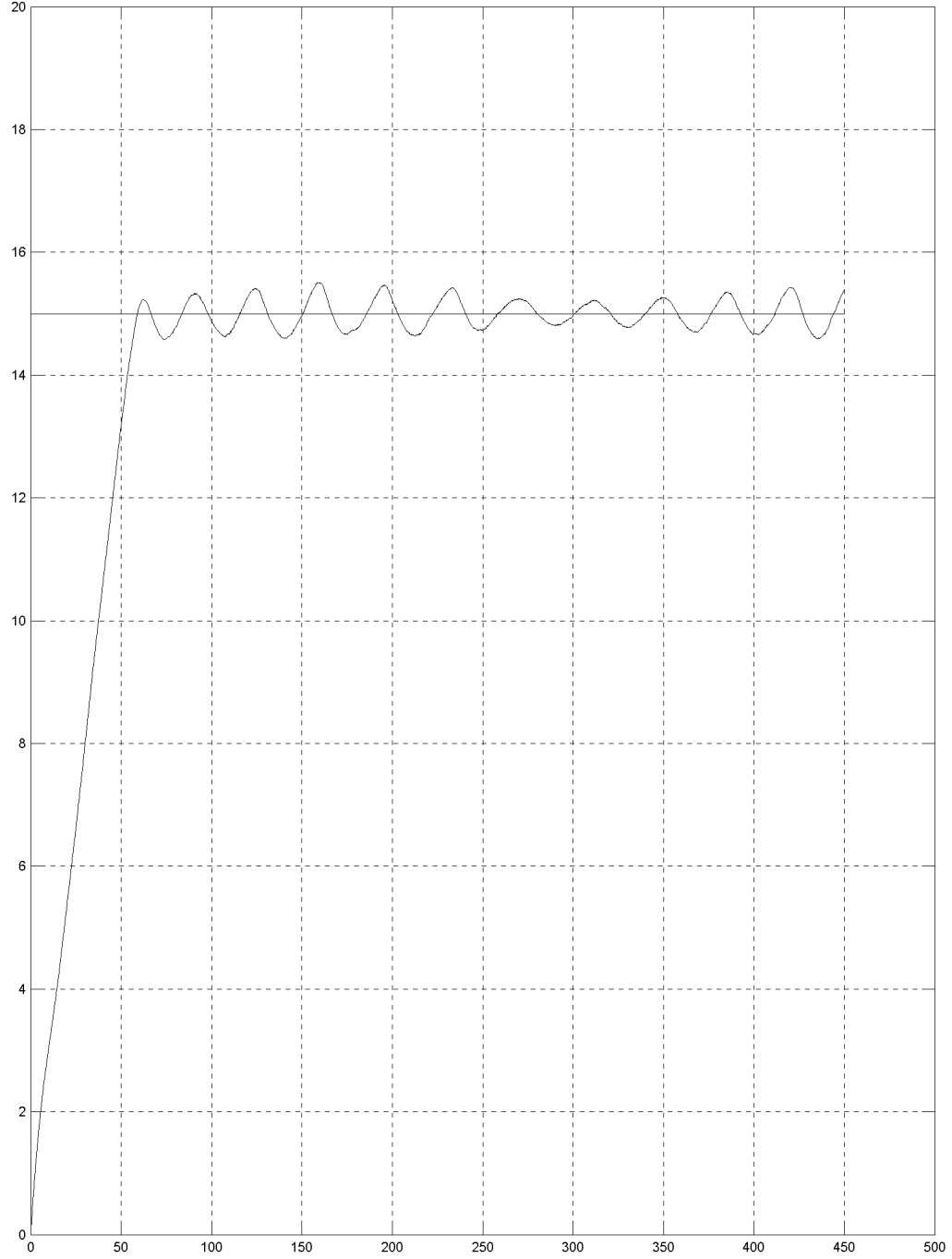


şekil 5.23 Ayırıtıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.



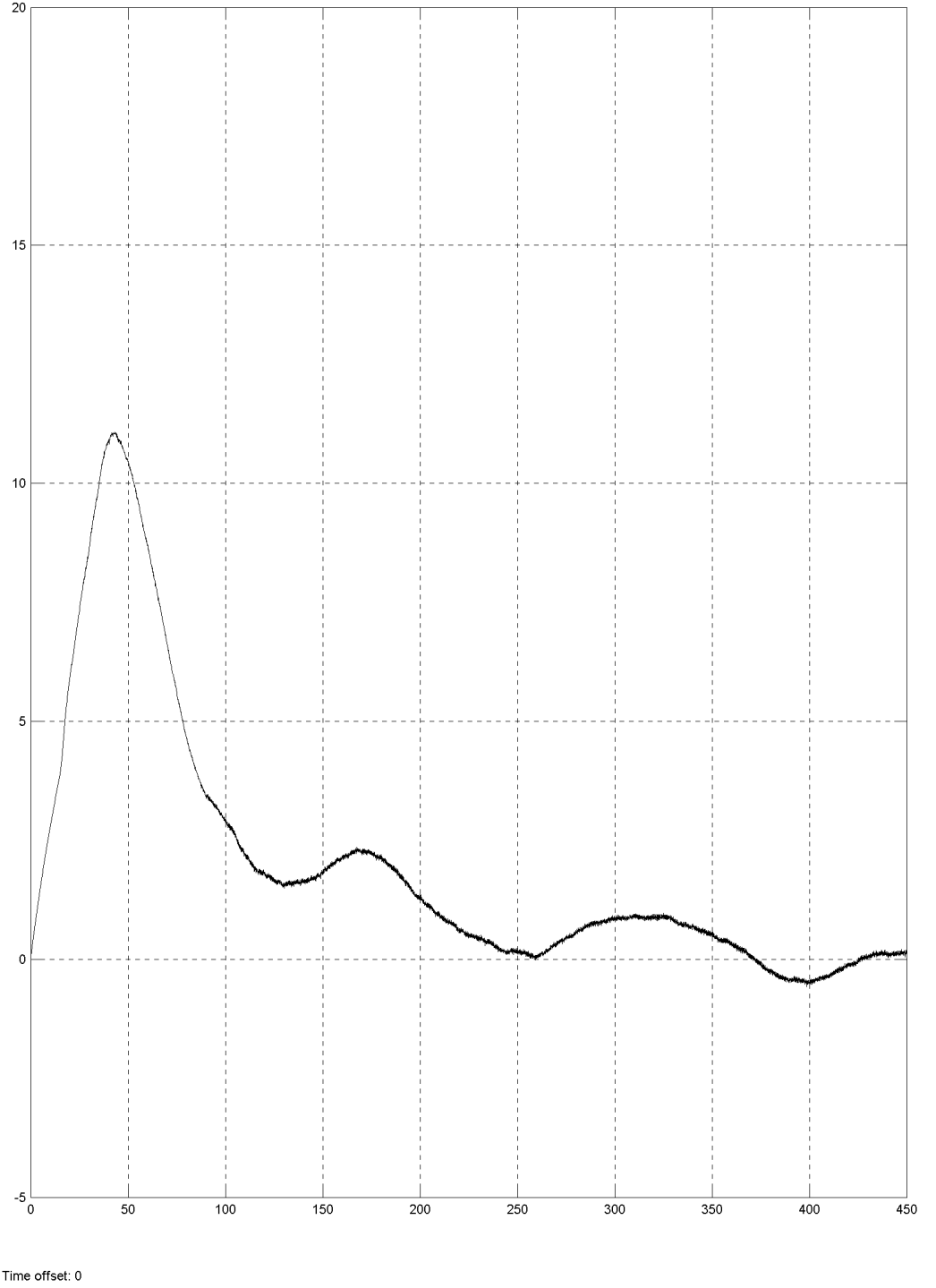
Şekil 5.24 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Bulanık PID Kontrol İşareti.

Aynı kontrolör yapısı tank 2 için de uygulandığında sistemin sürekli hal davranışı dolayısıyla kontrolör çıkışı da değişmiştir. Bu değişimi aşağıda verilen grafiklerde görmek mümkündür.



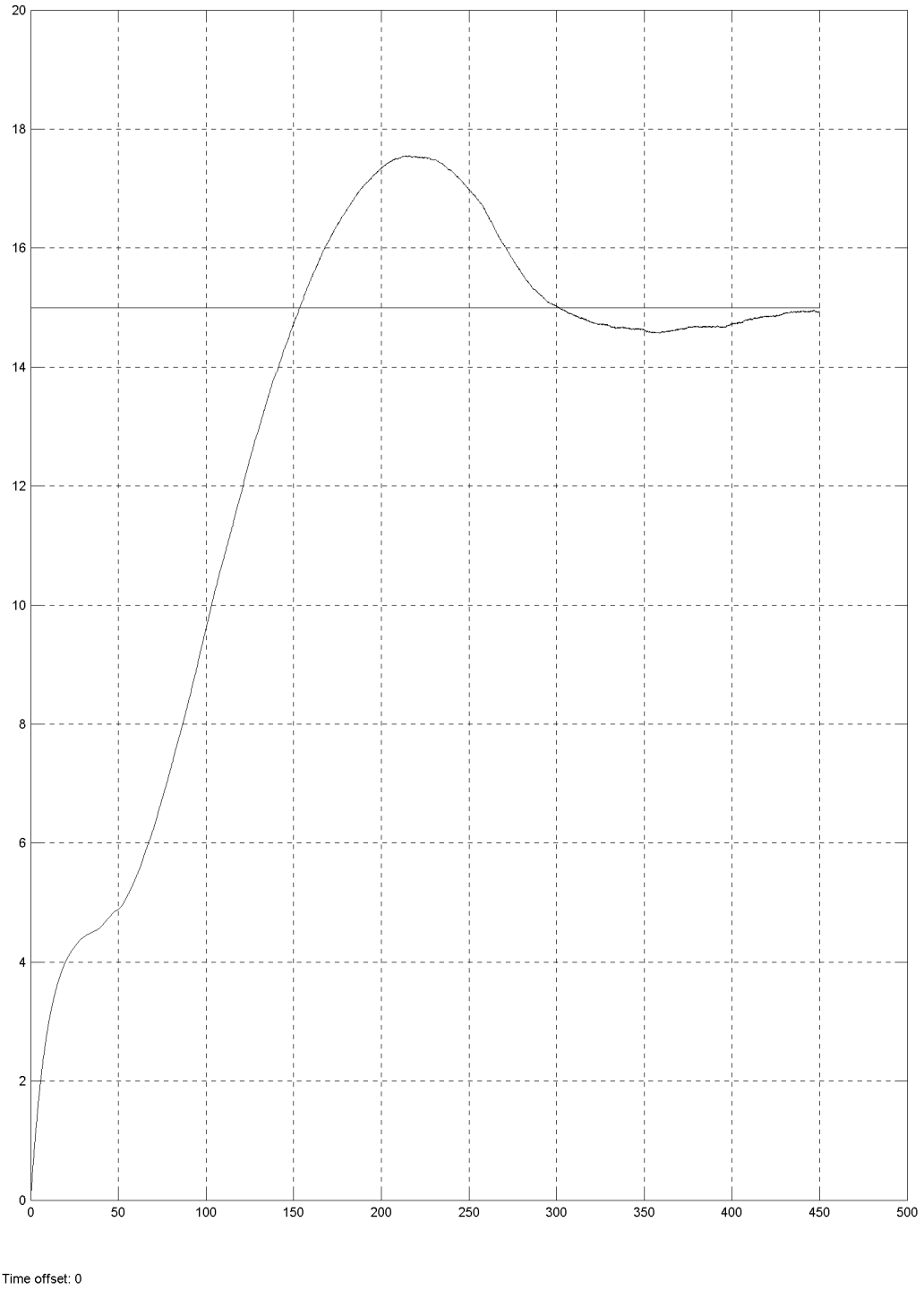
Şekil 5.25: Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin

Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.

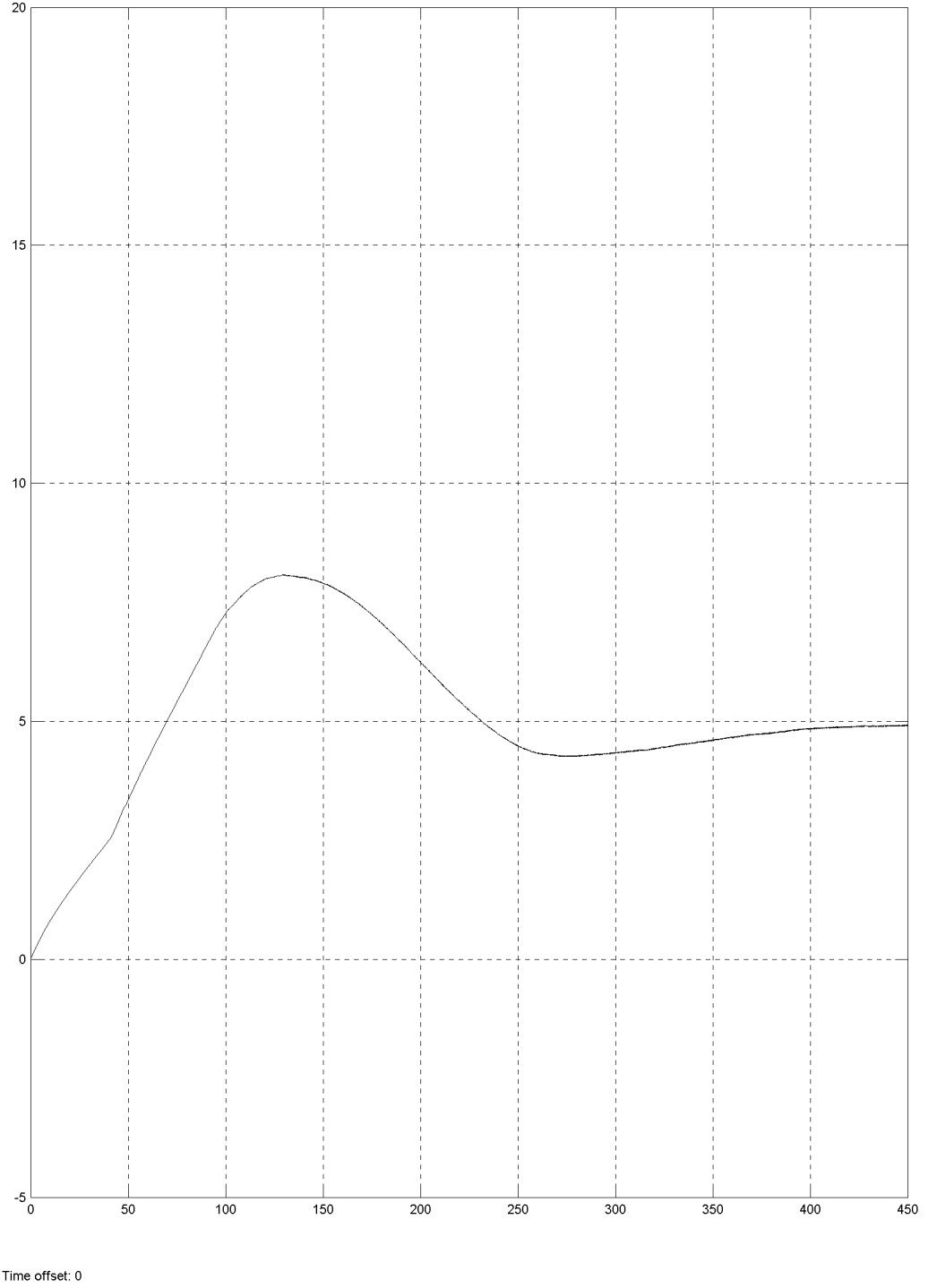


Şekil 5.26 : Ayrıştırıcı Kullanılarak Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Bulanık PID Kontrol İşareti.

Klasik PID uygulamasında olduğu gibi bulanık PID’de de ayrıştırıcı ikinci aşama olarak etkisini görebilmek için kaldırılmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

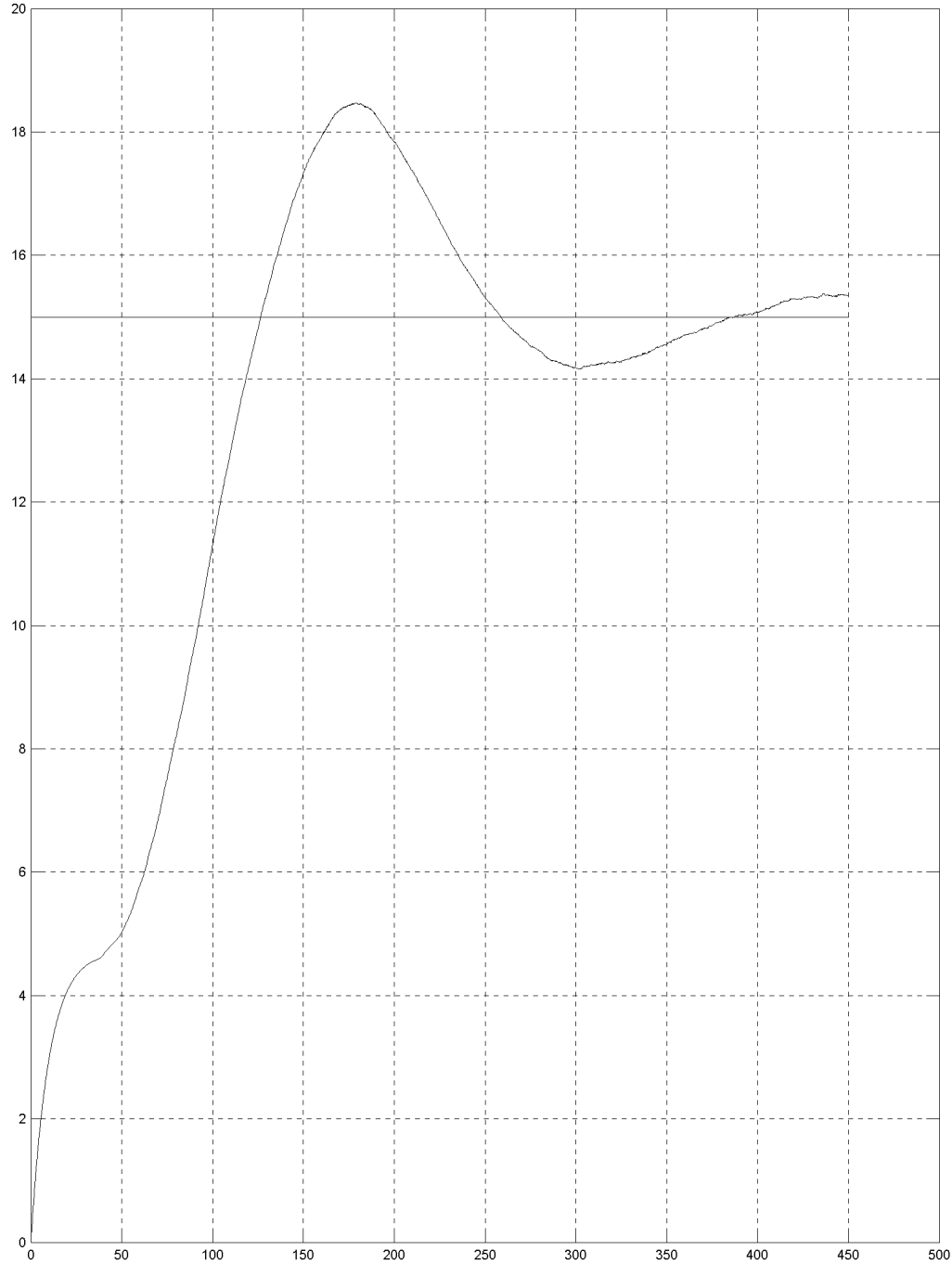


Şekil 5.27: Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Sıvı Seviye Grafiği.



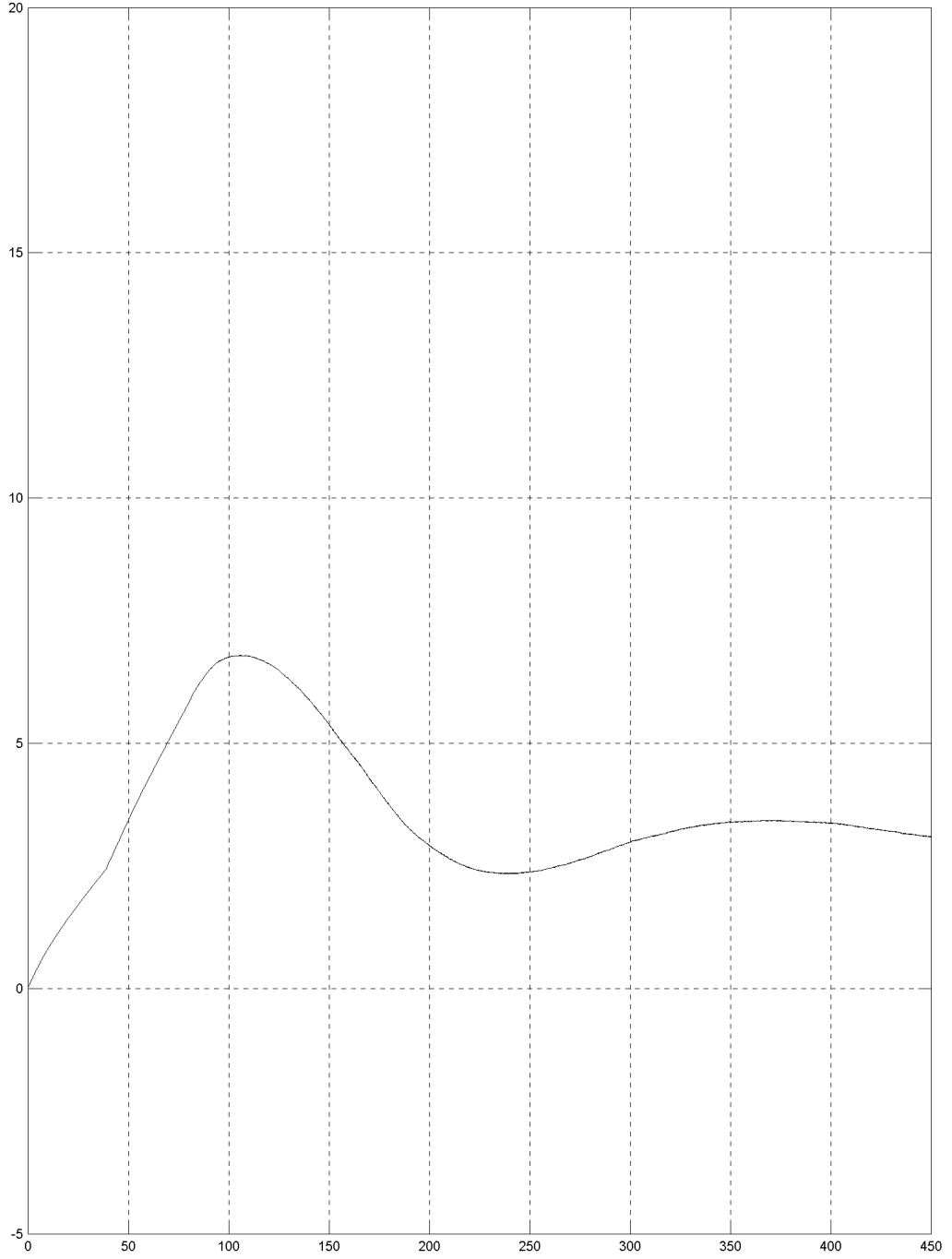
Şekil 5.28 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 1 Bulanık PID Kontrol İşareti.

Aynı kontrolör yapısı tank 2 için de uygulandığında sistemin sürekli hal davranışı dolayısıyla kontrolör çıkışı ayrıştırıcı kullanıldığı zaman kadar değişmemiştir. Bu durumu ayrıştırıcının sistem çıkışı üzerinde gösterdiği etki olarak değerlendirmek mümkündür.



Time offset: 0

Şekil 5.29: Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Sıvı Seviye Grafiği.



Time offset: 0

Şekil 5.30 : Ayrıştırıcı Kullanılmadan Bulanık PID ile Kontrol Edilen Sistemin Tank 2 Bulanık PID Kontrol İşareti.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sistemimize uygulanacak olan her türlü kontrol algoritması için öncelikle modelimizin doğru elde edilmesi önemlidir. Bunun için sistemi öncelikle fiziksel denklemler kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Elde edilen sistem modeli normalde matematiksel olarak ifade edilemeyen fiziksel kısıtları barındırmadığı için sistem, kara kutu yöntemiyle MATLAB Simulink te tekrardan tanımlanmıştır.

Statik ayrıştırıcılar, dinamik ayrıştırıcılara göre çok daha kolay hesaplanıp sisteme entegre edilebildiği için endüstride oldukça sık kullanılır. Bunun yanında statik ayrıştırıcılar daha dinamik versiyonlarına göre kötü sonuçlar verebilir. Statik decouplerlar eğer yukarıda görüldüğü gibi sisteme uygulandığında kabul edilebilir sonuçlar veriyorsa kullanılabilir aksi takdirde yapılacak işlem ya dinamik ayrıştırıcı tasarlayıp sisteme uygulamak ya da İGİÇ sistemimiz için bir İGİÇ kontrolör kullanmaktır. İGİÇ kontrol tasarımı ve diğer ayrıştırıcı algoritmaları bu tezde verilmemiştir.

Dördüncü bölümde PID kontrol algoritması verilmiştir. Bu bölümde PID kontrol algoritması çok derinlemesine incelenmemiştir. Bunun nedeni sistem iki TGTC sisteme çevrildiği için genel PID tasarım methodları da sistemde kullanılabilir. Bu PID kontrol algoritmasının başarısının ölçülebilmesi açısından Bulanık PID kontrol tasarımına değinilmiş ve Bulanık PID tasarlanmıştır. İki kontrolör arasında karşılaştırma yapabilmek için aynı giriş değerleri sisteme verilmiş ve çıktıları çizdirilmiştir. Sistemin örnekleme zamanı 0.1 saniye olarak belirlenip MATLAB Workspace'e atılmıştır ve buradan çizdirilmiştir. Her iki kontrolörün katsayıları deneme yanılma yoluyla bulunmuştur.

Bölüm 5 te söz konusu kontrolörler ait verilen sistem çıktıları ayrıntılı olarak verilmiştir. Tezin esas amacı olan kaskat yapılı çok girişli çok çıkışlı sistemlerin kontrolünü daha optimum yapabilmek adına sisteme ayrıştırıcı tasarlanmıştır. Söz konusu ayrıştırıcının başarısını ölçebilmek için sistemdeki ayrıştırıcı direkt olarak çıkarılmış ve sisteme aynı girişler tekrar uygulanarak sistem cevapları yine

çizdirilmiştir. Sistemin her iki uygulamasının dem ayırıştırıcı ile hem de ayırıştırıcısız versiyonlarında da referans değere oturmaktadır.

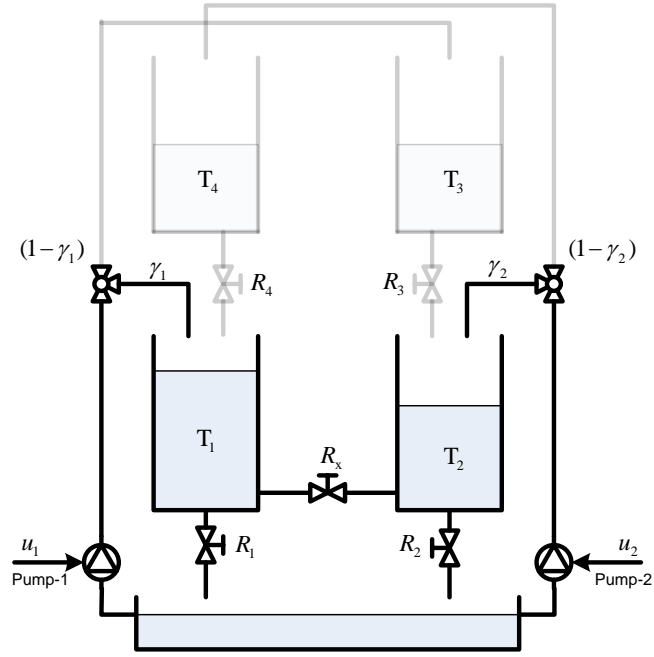
Gerçeklenen sistemde 100 saniye oturma zamanı ile ayırıştırıcı uygulanmış PID en iyi sonucu verdiği açıkça görülmektedir. Sistemdeki ayırıştırıcı çıkarıldıktan sonra sistemin oturma zamanı yaklaşık 2.5 kat artıp 250 saniyeye çıkmıştır. Sistemde kullanılan ayırıştırıcının başarısı da açıkça görülmektedir. Ayırıştırıcı uygulanmış PID den sonra en iyi performans ayırıştırıcı uygulanmış Bulanık PID den alınmıştır. Bu uygulamada da aynı ksik PID uygulamasında olduğu gibi ayırıştırıcı sistemden çıkarıldığında sistemin oturma zamanı artmaktadır. Oturma zamanları aşağıda çizelge şeklinde verilmiştir.

Çizelge 6.1. : Dörtlü Tank Sistemi Oturma Zamanları.

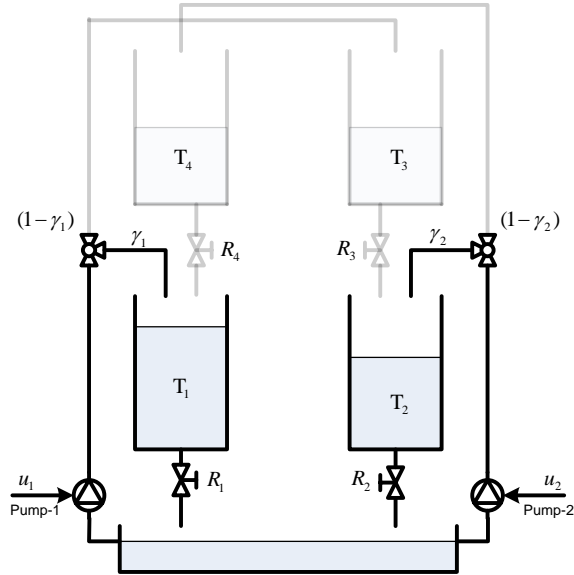
	PID	BULANIK PID
AYRIŞTIRICI UYGULANMIŞ	100 SN	230 SN
AYRIŞTIRICI UYGULAMAMIŞ	250 SN	320 SN

Teze konu olan sistem ileriki çalışmalarda da kullanılabilmesi açısından çok çeşitli kombinasyonlarda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Aşağıda olabilecek bazı çalışmalar sıralanmıştır.

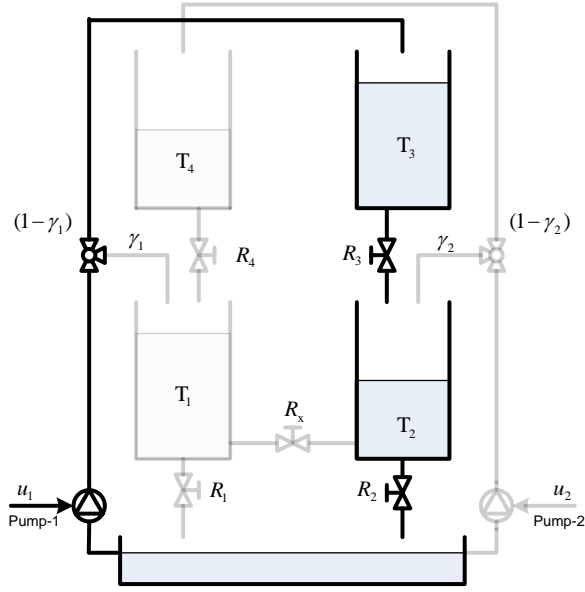
- Sistem, şekil 6.1 de görüldüğü gibi etkileşimli iki tank sistemi halinde modellenip kontrolü yapılabilir.
- Sistem , şekil 6.2 de görüldüğü gibi etkileşimsiz iki tank sistemi halinde modellenip kontrolü yapılabilir.
- Sistem, şekil 6.3 te görüldüğü gibi ikinci dereceden TGTÇ sistem halinede modellenip kontrolü yapılabilir.
- Sistem, şekil 6.4 te görüldüğü gibi ikinci dereceden etkileşimli TGTÇ sistem halinede modellenip kontrolü yapılabilir.



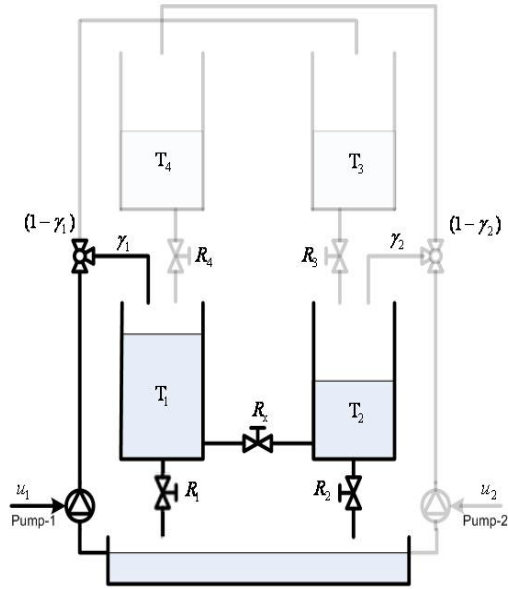
Şekil 6.1 : Etkileşimli İki Tank Sistemi Şematik Gösterimi.



Şekil 6.2 : Etkileşimsiz İki Tank Sistemi Şematik Gösterimi.



Şekil 6.3 : İkinci Dereceden TGTC Sistem Şematik Gösterimi.



Şekil 6.4 : İkinci Dereceden Etkileşimli TGTC Sistem Şematik Gösterimi.

KAYNAKLAR

- [1] **Åström KJ, Johansson KH, Wang QG.** Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems. *IEEE Proc Control Theory Appl.* 2002;149:74-81.
- [2] **Wang ,Q.-G., B. Huang, and X. Gu (2000):**”Auto-tuning of İGİÇ decoupling controllers from step tests.” In *ISA Transactions* 39 (2000) 407-418
- [3]**Zhou, K. and J.C. Doyle (1998):** *Essentials of Robust Control.* Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River , New Jersey 07458
- [4] **Åström, K. J. and B. Wittenmark (1990):** *Computer Controlled Systems-Theory and Design.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [5] **Nordfeldt P, Hagglund T.** *Journal of Process Control* 2006. Vol.16, Iss.9; p.923-936
- [6]**Wang H.** 2003 *The Quadruple-Tank Process: Modelling and Controller Design.* Thesis (MS). University of Calgary.
- [7] **Bristol EH.** On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Trans Autom Control.* 1966;AC-11:133-134.
- [8]**Akesson, M. E., Gustafson, and K. H. Johansson,** “Control design for a helicopter lab process” in *IFCA*, 1996.
- [9] **M. Mansour and W. Schaufelberger,** “Software and laboratory experiment using computers in control education,” *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 19–24, 1989.
- [10] **Vischer, D. and H. Bleuler,** “A new approach to sensorless and voltage controlled AMB’s based on network theory concepts” in *2nd Int Symp. Magnetic Bearings*, 1990.
- [11] **T. J. McAvoy,** “Interaction analysis: Principles and applications,” *Instrument Soc. Amer.*, Research Triangle Park, NC, 1983.
- [12] **K. H. Johansson** “The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero” *IEEE Trans on Control Systems Technology* May 2000. Vol.8, Iss.3; p.456-465
- [13] **P. Grosdidier, M. Morari, and B. R. Holt,** “Closed-loop properties from steady-state gain information,” *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 24, no. 2, pp. 221–235, 1985.
- [14] *Static Decouplers for Control of Multivariable Processes*
- [15] **Luyben WL.** Distillation decoupling. *AICHE J.* 1970;16:198-203.
- [16] **Waller KVT.** Decoupling in distillation. *AICHE J.* 1974;20:592-594.
- [17] **Skogestad S, Postlethwaite I.** *Multivariable Feedback Control.* New York, NY: Wiley; 1996.

- [18] **Åström, K.J., and Hagglund, T.:** 'PID controllers: theory, design, and tuning'. (Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 1995)
- [19] **Åström, K.J.:** 'Limitations on control system performance', *EUK J.Control*, 2000, 6, pp 2-20,
- [20] **Persson, P., and Astrom, K.J.:** 'Dominant pole design-a unified view of PID controller tuning'. Preprints of 4th IFAC symposium on Adaptive systems in control and signal processing, Grenoble, France, 1992, pp. 127 -132
- [21] **Åström, K.J., Panagopoulos, H., and Hagglund, T.:** 'Design of PI controllers based on non-convex optimization', *Automatica*, 1998, 34, (5), pp. 585-601
- [22] **Seron, M.M., Braslavsky, J.H., and Goodwin, G.C.:** 'Fundamental limitations in filtering and control' (Springer-Verlag, 1997)

EKLER

EK A.1 : Bulanık Mantık Kontrollör

EK A.1

[System]

Name='kont'

Type='sugeno'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=9

AndMethod='prod'

OrMethod='probor'

ImpMethod='prod'

AggMethod='sum'

DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]

Name='de'

Range=[-1 1]

NumMFs=3

MF1='N':'trimf',[-2 -1 0]

MF2='Z':'trimf',[-1 0 1]

MF3='P':'trimf',[0 1 2]

[Input2]

Name='e'

Range=[-1 1]

NumMFs=3

MF1='N':'trimf',[-2 -1 0]

MF2='Z':'trimf',[-1 0 1]

MF3='P':'trimf',[0 1 2]

[Output1]

Name='output1'

Range=[0 1]

NumMFs=5

MF1='-1':'constant',[-1]

MF2='-0.8':'constant',[-0.8]

MF3='0':'constant',[0]

MF4='0.8':'constant',[0.8]

MF5='1':'constant',[1]

[Rules]

1 1, 1 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 3 (1) : 1
2 1, 2 (1) : 1
2 2, 3 (1) : 1
2 3, 4 (1) : 1
3 1, 3 (1) : 1
3 2, 4 (1) : 1
3 2, 5 (1) : 1

ÖZGEÇMİŞ

**VESİKALIK
FOTO**

Ad Soyad: Hasan Hüseyin Kor

Doğum Yeri ve Tarihi: EDİRNE 1983

Adres:

Lisans Üniversite: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Yayın Listesi: