

126857

**ÇİFT TANKLI BİR SIVI SEVİYE KONTROL  
SİSTEMİNİN GERÇEKLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Müh. Ali Özgür EMEKLİ**  
**(504001262)**

**İ.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DOKÜMAN TAYYİN MERKEZİ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2002**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Salman KURTULAN**  
**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Leyla GÖREN**  
**Doç.Dr. M.K. Külmez ÇEVİK**

**MAYIS 2002**

126857

## ÖNSÖZ

Bulanık kontrolör tasarımıındaki engin bilgisini benimle paylaşıp, çalışmamın her aşamasında fikirleri ile bana yardımcı olan Araştırma Görevlisi Engin Yeşil'e yardımları ve özellikle samimiyetinden, Prof. Dr. Leyla Gören'e ilgisinden, danışman hocam Doç. Dr. Salman Kurtulan'a da beni serbest bırakıp, çalışma boyunca karşılaştığım sorunlar karşısında çözümü kendim bulmayı öğrenmem konusunda yaptığı katkıdan dolayı teşekkür ederim.

Tüm hayatım ve özellikle yüksek lisans ve bu çalışma sırasında bana verdikleri destek ve duydukları güvenden dolayı aileme şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2002

Ali Özgür Emekli



YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| KISALTMALAR                                                         | v         |
| TABLO LİSTESİ                                                       | vi        |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                       | vii       |
| SEMBOL LİSTESİ                                                      | viii      |
| ÖZET                                                                | ix        |
| SUMMARY                                                             | x         |
| <b>1. GİRİŞ VE SIVI TANKI SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ</b>                 | <b>1</b>  |
| 1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı                                      | 1         |
| 1.2. Sıvı Tankı Sistemine Genel Bakış                               | 1         |
| <b>2. SIVI TANKI SİSTEMİNİN MODELLENMESİ</b>                        | <b>5</b>  |
| 2.1. Sıvı Tankı Sisteminin Fiziksel Olarak Modellenmesi             | 5         |
| 2.1.1. Tek Tank İçin Sistemin Matematiksel Modeli                   | 5         |
| 2.1.2. Çift Tank İçin Sistemin Matematiksel Modeli                  | 6         |
| 2.2. Sıvı Tankı Sisteminin Sistem Tanıma Metotları ile Modellenmesi | 8         |
| 2.2.1. Dinamik Sistemleri Modelleme İhtiyacı                        | 8         |
| 2.2.2. Tek Tank İçin Modelleme                                      | 10        |
| 2.2.3. Çift Tank İçin Geçiş Analizi Yapılarak Modelleme             | 12        |
| 2.2.4. Çift Tank İçin En Küçük Kareler Metodu ile Modelleme         | 14        |
| 2.2.4.1. En Küçük Kareler Metodu                                    | 14        |
| 2.2.4.2. Sistem İçin Model Seçimi                                   | 16        |
| 2.2.4.3. Metodun Sisteme Uygulanması                                | 18        |
| <b>3. SIVI TANKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ</b>                            | <b>21</b> |
| 3.1. Çeşitli Kontrolör Tipleri ve Algoritmaları                     | 21        |
| 3.1.1. Aç-Kapa Kontrolörün Gerçeklenmesi                            | 25        |
| 3.1.2. Oransal tip (P) Kontrolörün Gerçeklenmesi                    | 26        |
| 3.1.3. PID Kontrolörün Gerçeklenmesi                                | 28        |
| 3.1.4. PID Kontrolörün Parametrelerinin Tespiti                     | 30        |
| 3.1.5. Sonuçların İrdelenmesi                                       | 34        |
| 3.2. Bulanık Kontrol                                                | 36        |
| 3.2.1. Bulanık Mantık                                               | 36        |

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2. Bulanık Kontrolörün Yapısı         | 37        |
| 3.2.3. Bulanık Kontrolörün Programlanması | 40        |
| <b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>            | <b>44</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                          | <b>46</b> |
| <b>EKLER</b>                              | <b>47</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                           | <b>58</b> |



## **KISALTMALAR**

|             |                                                    |
|-------------|----------------------------------------------------|
| <b>PLC</b>  | : Programmable Logic Controller                    |
| <b>PID</b>  | : Proportional, Integral and Derivative Controller |
| <b>F_PI</b> | : Fuzzy Proportional and Integral Controller       |
| <b>F_PD</b> | : Fuzzy Proportional and Derivative Controller     |



## TABLO LİSTESİ

## Sayfa No

|                   |                                                                                 |    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> | Ziegler-Nichols Yöntemine göre kontrolör parametrelerinin tespiti               | 31 |
| <b>Tablo 3.2.</b> | Ziegler-Nichols Frekans Yanıtı Metoduna göre kontrolör parametrelerinin tespiti | 31 |
| <b>Tablo 3.3.</b> | Ziegler-Nichols Basamak Yanıt Metoduna göre kontrolör parametreleri             | 32 |
| <b>Tablo 3.4.</b> | Bulanık Kontrolör Kural Tablosu                                                 | 39 |
| <b>Tablo 3.5.</b> | Yeni Kural Tablosu                                                              | 42 |
| <b>Tablo B.1.</b> | Sistem Tanıma deneyinde kullanılan matrisler                                    | 51 |
| <b>Tablo C.1.</b> | Kontrolör programında kullanılan semboller ve karşılıkları                      | 52 |



ULU YATIRIM KURULU  
FONDAASYON MERKEZİ

## ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa No

|            |                                                                                                                            |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | : Sıvı Tankı Sistemi .....                                                                                                 | 2  |
| Şekil 2.1  | : Genel olarak dinamik bir sistem .....                                                                                    | 8  |
| Şekil 2.2  | : Sistem Tanımanın şematik akış diyagramı .....                                                                            | 10 |
| Şekil 2.3  | : Tek Tank Sistemi Basamak Yanıtı .....                                                                                    | 11 |
| Şekil 2.4  | : Çift Tank Sistemi Basamak Yanıtı.....                                                                                    | 12 |
| Şekil 2.5  | : İntegral terimi içeren üç parametrelili model için grafiksel olarak<br>parametre tespiti                                 | 14 |
| Şekil 2.6  | : Çift Tank için sistem tanıma giriş işareti .....                                                                         | 19 |
| Şekil 2.7  | : Çift Tank için sistem tanıma deneyi çıkış işareti .....                                                                  | 19 |
| Şekil 3.1  | : İdeal Aç-kapa kontrol karakteristiği (A), ölü bölgesi Aç-kapa ....<br>kontrol (B), histerisis yapılı Aç-kapa kontrol (C) | 22 |
| Şekil 3.2  | : Oransal Kontrolör karakteristiği. Giriş hata işareti e, çıkış .....<br>kontrol işareti u.                                | 22 |
| Şekil 3.3  | : PID Kontrolörün blok diyagramı (standart yapı) .....                                                                     | 24 |
| Şekil 3.4  | : PID Kontrolörün seri olarak gerçekleşmesi .....                                                                          | 24 |
| Şekil 3.5  | : Bozucusuz durumda Aç-Kapa Kontrolörlü Sistem Yanıtı                                                                      | 25 |
| Şekil 3.6  | : Bozuculu durumda Aç-Kapa Kontrolörli Sistem Yanıtı                                                                       | 26 |
| Şekil 3.7  | : Sistemin Oransal Kontrolör Uygulandığında Blok Diyagramı                                                                 | 26 |
| Şekil 3.8  | : Sisteme Oransal Kontrolör Uygulandığında Oluşan Sürekli Hal<br>Hatası                                                    | 28 |
| Şekil 3.9  | : PID parametreleri ( $K_p, K_i, K_d$ )=(20.7,3,5) yapıldığında sistem<br>yanıtı.                                          | 35 |
| Şekil 3.10 | : Üyelik fonksiyonları .....                                                                                               | 37 |
| Şekil 3.11 | : Bulanık Kontrolör için üyelik fonksiyonları .....                                                                        | 38 |
| Şekil 3.12 | : Bulanık Kontrolörün yapısı .....                                                                                         | 40 |
| Şekil 3.13 | : Bulanık Kontrolör için yeni üyelik fonksiyonları .....                                                                   | 43 |
| Şekil 3.14 | : Bulanık kontrolör kullanıldığında sistem yanıtı .....                                                                    | 43 |

## SEMBOL LİSTESİ

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| $A_{1-2}$   | : Sıvı Tanklarının taban alanları                                   |
| $AIW0$      | : Analog PLC girişi                                                 |
| $AQW0$      | : Analog PLC çıkışı                                                 |
| $c$         | : Bulanık kontrolör için kuralların sonuç kısmı                     |
| $e$         | : Hata işareti                                                      |
| $f_A(x)$    | : A değişkenine ait üyelik fonksiyonu                               |
| $I_w$       | : PLC giriş akımı değeri (3200-16000 aralığında kelime)             |
| $I_N$       | : PLC giriş akımı değeri ([0,1] aralığına ölçeklenmiş değer)        |
| $I_{14-32}$ | : PLC çıkış akımı değeri (14000-32000 aralığına ölçeklenmiş kelime) |
| $I_{0-32}$  | : PLC çıkış akımı değeri (0-32000 aralığında kelime)                |
| $K_u$       | : Ziegler-Nichols yönteminde sınır kazanç                           |
| $L$         | : Ölü zaman                                                         |
| $R$         | : Tanklar arası hidrolik direnç                                     |
| $T$         | : Zaman sabiti                                                      |
| $T_u$       | : Ziegler-Nichols yönteminde salınım periyodu                       |
| $u$         | : Kontrol işareti                                                   |
| $u_i$       | : PID'e ait integral terimi                                         |
| $u_p$       | : PID'e ait oransal terim                                           |
| $u_d$       | : PID'e ait türev terimi                                            |
| $w$         | : Kuralın ateş gücü                                                 |
| $w_n$       | : Doğal frekans                                                     |
| $\Delta e$  | : Hatanın türevi                                                    |
| $\Delta u$  | : Kontrol işaretindeki değişim                                      |
| $\xi$       | : $\cos \phi$ değeri                                                |
| $\phi$      | : Köklerin yer eğrisinde bir kutbun açısı                           |

## ÖZET

Bu çalışma, Çift Tanklı Sıvı Seviye Sistemi üzerinde seviye kontrolü yapılması üzerinedir. Çalışmanın tüm aşamaları bir deney seti üzerinde uygulanmış, teorik yaklaşımların deneysel sonuçları elde edilmiştir.

Her iki sistem için, öncelikle fizik yasalarından yararlanarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Daha sonra Matematiksel modellerde kimi parametrelerin eldesi mümkün olamayabildiğinden, Sistem Tanıma metotlarının uygulanmasına geçilmiştir. Bu aşamada öncelikle her iki sistem için de geçiş analizi yapmış, sistemlerin basamak yanıtları kullanılarak sistem modelleri bulunmuştur. Elde edilen bu modellerin her bir sistem için yeterli düzeyde oldukları anlaşılmıştır. Buna rağmen Sistem Tanıma için bir uygulama örneği olması açısından Çift Tank Sistemi için En Küçük Kareler Yöntemi ile modelleme de yapılmıştır.

Modelleme işlemlerinin ardından seviye kontrolü için kontrolör tasarımına geçilmiştir. Sisteme sırayla Aç-Kapa ve Oransal Kontrol, en son ise PID kontrol uygulanmıştır. PID parametreleri çeşitli metotlar kullanılarak hesaplanmış, bulunan çeşitli parametre grupları sistem üzerinde test edilerek sonuçlar kaydedilmiş ve yorumlanmıştır. İkinci aşamada ise sisteme Bulanık Kontrolör uygulanmıştır. Kontrolör tasarımı öncesinde Bulanık Mantık yapısı açıklanmıştır. Bulanık kontrolör önce  $3 \times 3 = 9$  kural yapısında yazılmış, uygulamada istenilen hassaslıkta sonuç vermediği gözlemlendiğinden  $5 \times 5 = 25$  kural şeklinde tasarıma geçilmiştir. Bulanık kontrolörün verdiği sonuçlar PID tipi kontrolör ile kıyaslanmıştır. Bulanık kontrolörün de ayarları iyi yapıldığında piyasa standardı diye tabir edilebilecek PID kontrolör kadar iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmadaki tüm sistem tanıma ve kontrol aşamaları Siemens S7-200 PLC cihazı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sistemle PLC arasında EM-235 Analog giriş-çıkış birimi kullanılmıştır.

## SUMMARY

This study is about level control on a two connected liquid tanks system. Every stage of the study were applied to the tank systems experiment set and so the experimental results of theoretical approaches were obtained.

First, for both of the systems (one tank and two tanks), mathematical models were obtained by using physical laws. In mathematical models, some of the parameters could not be found, so use of System Identification Methods became a need. In this stage, for both of the systems, first transient analysis were done, using the step responses the models were obtained. It was inspected that each of the models was good enough and verified. In spite of good verification, for two tanks system, System Identification using Least Squares Estimate was also applied as a forward example.

The next stage after the modelling is designing the controllers for level control. First, On-Off and P type controller, at last PID type controller were applied to the system. The parameters were calculated using several methods, then tested on the system and the results were commented on. In the second stage, Fuzzy type controller was designed. Before designing, Fuzzy Logic Theory was explained. First, controller was programmed with  $3 \times 3 = 9$  rules but the results were not good enough, so  $5 \times 5 = 25$  rules were programmed. The results of the Fuzzy Controller were compared with the PID type controller's. It was seen that when Fuzzy Controller had a right tuning, it resulted as good as PID controller.

All of the experiments for the identification and the control stages of the system were became true using Siemens S7-200 Programmable Logic Controller (PLC). The system was connected to the PLC through EM 235 Analog input-output device.

## **1. GİRİŞ VE SIVI TANKI SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ**

### **1.1 GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI**

Bu çalışmada, tek tank ve çift tank sistemlerinde sıvı seviye kontrolü yapılması üzerinde çalışılmıştır. Konu, sistemin modellenmesinden, kontrol düzeneğinin çalıştırılmasına kadar geniş bir açıdan uygulamalı olarak incelenmiş, her aşamada karşılaşılan sorunlar ve uygulanabilecek metotlar açıklanmıştır. Bu bağlamda çalışma, herhangi bir sistem üzerinde çalışan kontrol mühendisine rehberlik edebilir.

### **1.2 SIVI TANKI SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ**

Bu tez çalışmasında üzerinde çalışılan ve tüm tez metni boyunca adı geçen Sıvı Tankı Sistemi Şekil 1.1’de görülmektedir. Sistem, seviye kontrol sistemleri hakkında çalışacak öğrenciye, kapsamlı bir çalışma imkanı sunacak şekilde tasarlanmış bir deney setidir. Tek su tankı seviye kontrolü yanında birbirine bağlı iki su tankı üzerinde de çalışmak mümkündür.

Tanklara sıvı girişi sadece birinci tank üzerinden yapılabilmektedir. Tanka gelen su miktarı basınçlı hava ile çalışan bir vana üzerinden ayarlanır. Aşağıdaki ana sıvı tankından bir motor aracılığıyla sıvı sürekli yukarıya çekilir, ancak vana, çekilen su ile tank arasında yer alarak sıvının akışının kontrol edilebilmesini sağlar.

Tanklardaki su seviyeleri, hava basıncını akıma çeviren dönüştürücü aracılığıyla ölçülür. Tank içinde su yükseldikçe, tankların ortasında bulunan boruda da su yükselir ve yükselen su boru içindeki havayı sıkıştırır. Ancak hava, dönüştürücüye ulaşmadan önce referans bir işaret ile kıyaslanır, daha sonra referans işaretle arasındaki fark akıma dönüştürülür. Hava basıncına karşı gelen akım değeri PLC tarafından okunarak kullanılır.

Vanayı kontrol etmek için bir anahtar elemandan yararlanılır. Bu eleman, girişindeki akım değerine göre çıkışa belli basınçta hava gönderir. Tanklara akan suyun miktarı bu elemanın girişi PLC'ye bağlanarak ayarlanmaktadır.



Şekil 1.1 Sıvı Tankı Sistemi

Sistemin çalışması için basınçlı hava, bir kompresör üzerinden sağlanır. Deneyler sırasında kompresör çıkışı ayarlanarak, sistem 2 bar basınç altında çalıştırılmıştır.

Tanklar birbirlerine 3 adet ayarlanabilir vana ile bağlıdır. Vanalar kapatıldığında ikinci tank kullanım dışı kalmaktadır. Ayrıca birinci tankın alt kısmında üç adet daha vana bulunmakta, bu vanalar açıldığında tanklardaki su aşağıdaki ana tanka akmaktadır.

Sistemin kontrolü Siemens S7-200 CPU 214 1.01 model bir PLC cihazı üzerinden yapılmaktadır. Vananın kontrol girişi ve tanklardaki sıvı yüksekliğinin akım olarak çıkışı, PLC'nin EM 235 analog giriş-çıkış ünitesine bağlıdır. Vanaya ait kontrol işareti AQW0 analog çıkışından 0-20 mA aralığında gönderilmektedir. Tanklardaki sıvı yüksekliği akım karşılığı ise 4-20 mA aralığında olup, AIW0 analog girişten

okunmaktadır. AIW0'ın 4 mA olduğu anda, PLC'de 16 bit kelime olarak karşılığı 3200 olmaktadır. 20 mA değerinde ise kelime karşılığı 16000 okunmuştur. Buna göre kelime olarak sistem çıkış ölçeği [3200-16000], sistem giriş ölçeği ise [0,32000] aralığında olmaktadır.

Ancak tank boşken 3200 değeri okunmasına rağmen, tank ağzına kadar dolduğunda 16000 değil, 9000 değeri okunmaktadır. Bu değerler sistem 2 bar basınç altında çalıştırıldığında geçerlidir. Besleme basıncı değiştirilirse, tank ağzına kadar dolu olduğunda daha farklı bir değer okunacaktır. İlerideki bölümlerde yapılan kontrol işlemlerinde 6000 referans alınarak deneyler yapılmıştır. 2 bar basınç altında bu değer yaklaşık 23 [cm] yüksekliğe karşı gelmektedir.

Giriş ve çıkış değerlerinin, PLC programında akım olarak görünmeyip, 16 bitlik kelime şeklinde görünmesi, PLC programında yapılacak her türlü hesap için bu değerlerin [0,1] aralığına ölçeklenerek normalleştirilmesini zorunlu kılar. Sisteme uygulanacak giriş için kelime değerini 32000'e bölmek [0,1] normalleştirmesini sağlar. Ancak sistemden okunan çıkış için daha farklı bir işlem gereklidir.  $I_W$ , [3200-16000] aralığında kelime değeri ve  $I_N$ , [0,1] aralığına ölçeklenip normalleştirilmiş değer olmak üzere bu işlem şu şekilde yapılır:

$$I_N = \frac{I_W}{12800} - 0.25 \quad (1.1)$$

Tez boyunca verilen grafikler ve tüm kontrolör programlarında normalleştirilmiş değerler kullanılmış, işlemler sonucu elde edilen sonuç değerler ise geri ölçeklenerek kelime haline getirilip sisteme uygulanmıştır.

Sistemin kontrolü için kullanılan vananın yapısı gereği de ayrıca bir çıkış ölçeklemesi yapılması gerekmiştir. Normalde, üretilen kontrol işareti kelime olarak 0-32000 (0-20 mA) aralığındadır. Ancak vana 14400'den daha az kelime değerlerinde (<9 mA) tetiklenmemekte, dolayısıyla hiç su akıtmamaktadır. Bu nedenle kontrol işareti 0-32000 aralığından 14000-32000 aralığına ölçeklenerek sisteme uygulanmıştır. Bu ölçekleme işlemi şu şekilde yapılmıştır:

$$I_{14-32} = (I_{0-32} \times 0.5625) + 14000 \quad (1.2)$$

Ayrıca özellikle vanada ve ara dönüştürücü elemanlarda başka doğrusal olmayan davranışlar da görülmüştür, ancak bunlar sistemin başarımına etki etmediği sürece yok varsayılmıştır. Özellikle vanada histerisis şeklinde bir çalışma karakteristiği görülmektedir. İleri halde, bu doğrusal olmayan davranışlar, belli aralıklarla doğrusallaştırılıp, her bir parça için ayrı ayrı kontrolör tasarlanması da mümkündür.



## 2. SIVI TANKI SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

### 2.1 SIVI TANKI SİSTEMİNİN FİZİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

#### 2.1.1 TEK TANK İÇİN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Tek sıvı tankı, girişi vanadan gelen suyun debisi  $d_1(t)$  [ $\text{cm}^3/\text{sn}$ ], çıkışı ise tanktaki sıvının yüksekliği  $h_1(t)$  [ $\text{cm}/\text{sn}$ ] olan bir sistem olarak düşünülür. Tankın altındaki boşaltma vanası açıksa, sistem üzerinde  $d(t)=D$  gibi sabit bir değer ile tanımlayabileceğimiz bozucu da etki gösterecektir. Bozuculu bir sistem sanki iki girişli bir sistem gibidir, bu nedenle her bir giriş için ayrı ayrı transfer fonksiyonu yazmak gerekir. Vanaya bağlı metal borudan tanka su akmaya başladığında tankın sıvı seviyesindeki değişim ile  $d_1(t)$  arasındaki ilişki:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{d_1(t) - d(t)}{A} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemdaki  $A$ , [ $\text{cm}^2$ ] olarak tankın taban alanını göstermektedir. Bu  $A$  değerine aynı zamanda hidrolik kapasite de denir. Sistem öncelikle bozucusuz olarak düşünülüp  $d(t)=0$  alınır,  $d_1(t)$  sistem girişi,  $h_1(t)$  sistem çıkışı olarak bu denklemden Laplace Dönüşümü yapıp sistemin transfer fonksiyonu elde edilir:

$$\text{Laplace} \left( \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{d_1(t)}{A} \right) \Rightarrow \left( s \cdot H_1(s) = \frac{D_1(s)}{A} \right) \Rightarrow \frac{H_1(s)}{D_1(s)} = \frac{1}{As} \quad (2.2)$$

Tank düzgün silindirik yapıda olduğundan sadece yarıçap bilgisi taban alanının hesabı için yeterlidir. Bu şekilde alan  $74 \text{ cm}^2$  bulunmuştur. Öyleyse tek tank sistemine ait transfer fonksiyonu:

$$\frac{H_1(s)}{D_1(s)} = \frac{0.0135}{s} \quad (2.3)$$

olarak yazılır. İkinci durumda ise  $d_1(t)=0$  alınıp, sistem girişi  $d(t)$ , çıkış ise  $h_1(t)$  olmak üzere aynı yapıda transfer fonksiyonu yazılır.  $d(t)=D$  gibi bir sabit olduğundan  $D(s)=D/s$  şeklindedir.

### 2.1.2 ÇİFT TANK İÇİN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Bu sistem için giriş, vanaya bağlı borudan birinci tanka akan sıvı debisi  $d_1(t)$  [ $\text{cm}^3/\text{sn}$ ], çıkış ise ikinci tankın yüksekliği  $h_2(t)$  [ $\text{cm}/\text{sn}$ ] olarak düşünülür. Boşaltma vanası açıksa sistem  $d(t)$  olarak gösterilen bozucu tarafından da uyarılır, bu halde sistem iki girişli olarak düşünülüp her bir giriş için ayrı ayrı transfer fonksiyonları yazılır.

Birinci tanka vana aracılığıyla dışarıdan sıvı verilebilmesine karşın, ikinci tank ancak birinci tank üzerinden dolup boşalabilmektedir. İki tank arasındaki bu sıvı geçişi, hidrolik direnç olarak adlandırabileceğimiz üç adet vana tarafından sağlanmaktadır. Bu üç hidrolik direnç birbirine paralel bağlanmıştır ve eşdeğer direncin bulunması aynı elektriksel dirençlerde olduğu gibidir. Burada kullanacağımız hidrolik direnç  $R$ , üç direncin eşdeğer direnci olarak düşünülmüştür.

Çift Sıvı tankı sistemi aşağıdaki fiziksel ifadelerle belirlenebilir:

$$1. \quad d_2(t) = \frac{h_1(t) - h_2(t)}{R} \quad (2.4a)$$

$$2. \quad d_1(t) - d_2(t) - d(t) = A_1 \cdot \frac{dh_1(t)}{dt} \quad (2.4b)$$

$$3. \quad \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{d_2(t)}{A_2} \quad (2.4c)$$

Denklemlerdeki “1” alt indisleri, birinci tanka ait büyüklükleri, “2” alt indisleri ise ikinci tanka ait büyüklükleri göstermektedir. Üç denklemin de Laplace Dönüşümü alınırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$1. \quad D_2(s) = \frac{H_1(s) - H_2(s)}{R} \quad (2.5a)$$

$$2. \quad D_1(s) - D_2(s) - D(s) = s \cdot A_1 \cdot H_1(s) \quad (2.5b)$$

$$3. \quad s \cdot H_2(s) = \frac{D_2(s)}{A_2} \quad (2.5c)$$

Öncelikle bozucu  $D(s)=0$  alınıp,  $D_1(s)$  giriş,  $H_2(s)$  çıkış olmak üzere, (2.5c) denklemindeki  $D_2(s)$  ve (2.5b) denklemindeki  $H_1(s)$  çekilip (2.5a) denklemindeki yerlerine konulursa:

$$s \cdot A_2 \cdot H_2(s) \cdot R = \frac{D_1(s) - s \cdot A_2 \cdot H_2(s)}{s \cdot A_1} - H_2(s) \quad (2.6)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenerek:

$$\frac{H_2(s)}{D_1(s)} = \frac{1}{s^2(A_1 A_2 R) + (A_1 + A_2)s} \quad (2.7)$$

şeklinde çift tank sisteminin  $D_1(s)$  giriş,  $H_2(s)$  çıkış olmak üzere transfer fonksiyonu elde edilmiş olur. İkinci halde ise  $D_1(s)=0$  yapıp,  $D(s)$  giriş ve  $H_2(s)$  çıkış olmak üzere bozucuya ait transfer fonksiyonu bulunur. (2.7) ifadesinde  $A_1$  ve  $A_2$  tankların taban alanları olup  $74 \text{ [cm}^2\text{]}$ 'dir. Ancak iki tankın arasındaki vanaların oluşturduğu eşdeğer direncin değeri ölçülememiştir. Bu değer elde edilememesi durumunda sistemin modellenmesi için sistem tanıma metotlarının kullanılması kaçınılmaz görünmektedir.

Sistemlerin her biri için elde edilmiş olan (2.2) ve (2.7) transfer fonksiyonları ölü zaman terimi içermemektedir. Eğer sistem, uygulanan girişe belli bir gecikme sonrası yanıt veriyorsa ölü zaman vardır. Yapılan deney sonuçları sistemin ölü zamana sahip olduğunu göstermektedir. Bu değer, vana gibi ara elemanlardaki yanıt süresi veya suyun boru içinde ilerlemesi için geçen süreden kaynaklanıyor olabilir. Bu nedenle deneysel olarak tespit edilmesi en uygun yoldur. Buradaki gibi bir ölü zaman, transfer fonksiyonlarına "L" değeri kadar gecikme olduğunu gösteren " $e^{-sL}$ " çarpanını getirecektir. Burada L, ölü zaman değeridir.

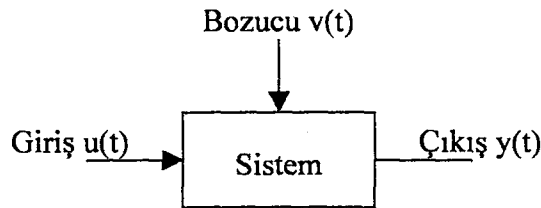
## 2.2 SIVI TANKI SİSTEMİNİN SİSTEM TANIMA METODLARI İLE MODELLENMESİ

### 2.2.1 DİNAMİK SİSTEMLERİ MODELLEME İHTİYACI

Sistem tanıma tamamen deneysel bilgiye dayanarak dinamik sistemlerin modellenmesi alanıdır. Dinamik bir sistem kavramsal olarak Şekil 2.1'deki gibi tarif edilebilir. Sistem, giriş değerleri  $u(t)$  ve bozucular  $v(t)$  tarafından sürülür. Kullanıcı  $u(t)$ 'yi kontrol edebilir, ancak  $v(t)$ 'ye edemez. Kimi işaret işleme uygulamalarında girişler belirsiz de olabilir. Bu nedenle çıkış işaretleri, sistem hakkında işe yarar bilgi sağlayan değerler durumunda olur. Dinamik bir sistem için,  $t$  anındaki kontrol işlemi,  $s > t$  anında çıkışta etkisini gösterir.

Dinamik sistemlerin modelleri çok çeşitli olabilir. Bunlara aşağıdaki örnekler verilebilir:

- Zihinsel, sezgisel ve sözel modeller: Bunlara örnek araba kullanırken kullandığımız model verilebilir (“direksiyonu saat yönünde çevirirsen araba sağa döner” veya “frene basmak hızı düşürür” gibi)
- Grafikler ve Tablolar: Bir servo sistemin Bode Diyagramı grafik yapıdaki modellere tipik bir örnektir. Birim basamak girişle uyarılan bir sistemin çıkışı da başka bir çeşit grafik modeldir.
- Matematiksel Modeller: Grafikler de matematiksel model olarak nitelendirilebilirse de, burada özellikle vurgulanan diferansiyel ve (veya) fark denklemleriyle ifade edilen modellerdir. Bu tip modeller, üzerinde işlem yapmaya çok elverişlidir. Model üzerinde, hata düzeltme, kuvvetlendirme ve filtreleme gibi işlemler yapılabilir.



Şekil 2.1 Genel olarak dinamik bir sistem

Dinamik bir sistemin, yukarıdaki model tiplerinden herhangi biri ile modellenmesi için temel olarak iki yol vardır. İlki Analitik bir yaklaşım olan Matematiksel Modellemedir. Burada, Newton Kanunları gibi basit fizik yasaları kullanılarak, olayın veya sürecin dinamik davranışı tanımlanır. Bu tip modelleme Bölüm 2.1’de her iki tank sistemi için de yapılmıştı. İkinci yol ise tamamen deneysel bir yaklaşım olan Sistem Tanımadır. Sistem üzerinde bazı deneyler yapılarak veriler toplanır, daha sonra kaydedilen bu verilere dayanılarak sisteme bir model uydurulur.

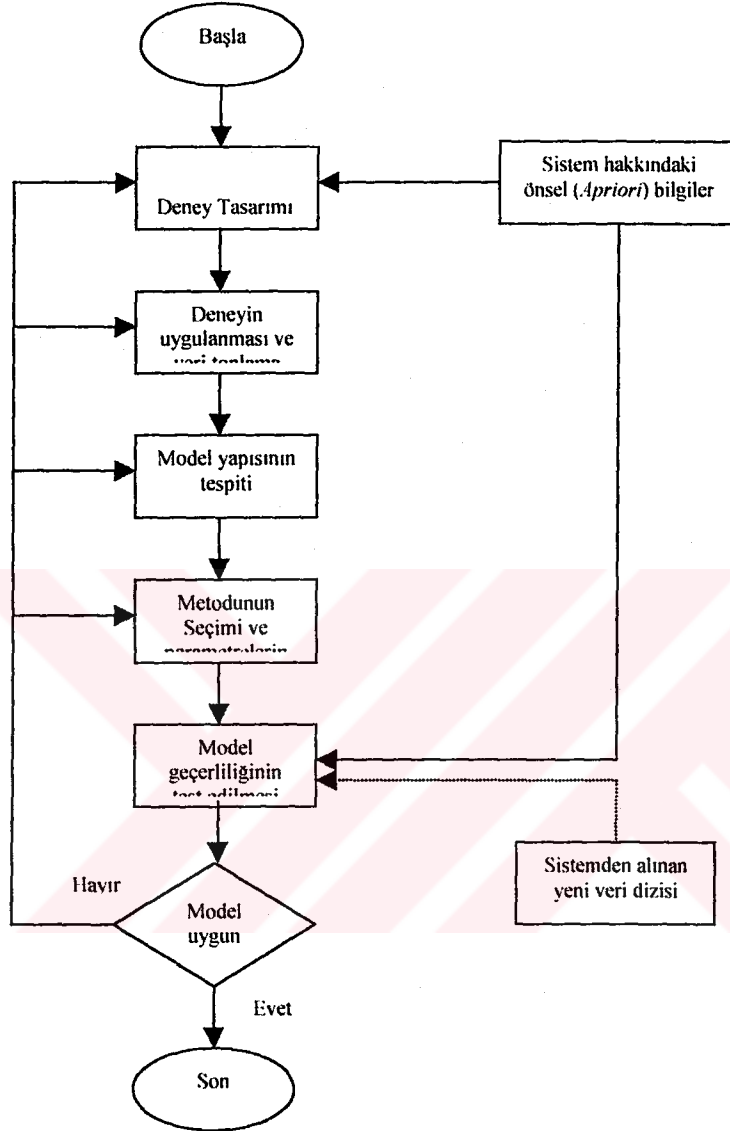
Çoğu durumda süreçlerin karmaşıklığı nedeniyle, sadece fiziksel bakış açısı kullanılarak kullanışlı modellerin elde edilmesi mümkün olmaz. Bu durumda sistem tanıma metotlarının kullanılması zorunlu hale gelir.

Sistem Tanıma ile elde edilen modeller, matematiksel modelleme yoluyla edilenlere kıyasla sınırlı bir kullanıma sahiptir. Sistem Tanıma yapılarak oluşturulan modeller, sadece belli giriş işaretleri ve çalışma noktaları için sistemi temsil edebilmektedir. Bu tip modellerin parametreleri çoğunlukla fiziksel bir anlam içermez. Ancak sistem Tanıma Modellerinin yapısı basit ve kullanımı kolay olur.

Sistem Tanıma Sürecinin bazı zorlukları da vardır. Bunlar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Uygun bir model yapısı tespit edilmelidir. Özellikle sistem davranışı doğrusal değilse model tespiti önemli bir sorun oluşturabilir.
- Gerçek hayatta hiçbir zaman mükemmel doğrulukta veri elde edilemez. Bu nedenle ölçülen veriler kullanılırken gürültünün etkisi de hesaba katılmalıdır.
- Tanınmak istenen süreç zamanla değişebilir. Bu durumda zamandan bağımsız bir model yapısı öneriliyorsa sorun olması kaçınılmazdır.
- Önerilen model yapısı için kesin öneme sahip bazı işaretlerin veya değişkenlerin ölçülmesi zor olabilir, kimi durumda mümkün olmaya da bilir.

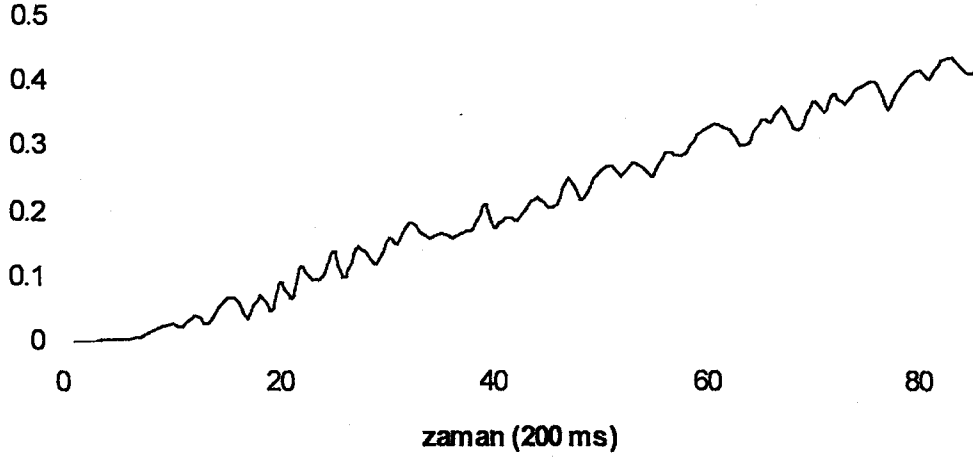
Sistem Tanıma Süreci genel olarak Şekil 2.2’de verilen algoritma üzerinden yürür.



Şekil 2.2. Sistem Tanıma'nın şematik akış diyagramı

### 2.2.2 TEK TANK İÇİN MODELLEME

Burada tek tank için sisteme “1” (kelime karşılığı: 32000) genlikli birim basamak giriş işareti uygulanmış, tanktaki sıvı taşmaya yaklaştığı zaman giriş işareti sıfıra çekilmiştir. Sistemin çıkışı Şekil 2.3’deki gibi gözlenmiştir.



Şekil 2.3 Tek Tank Sisteminin basamak yanıtı

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, sistem bir gecikme sonrası harekete geçmektedir, yani bir ölü zaman vardır. Bu ölü zaman, vananın açılıp kapanması ve vana açıldıktan sonra boruya sıvı dolması için geçen zamandır. Bu değer grafikten 0.4 [s] okunmuştur. Ancak ölçme düzeneğinin yapısı gereği tank boşken doldurulmaya başladığında ölçme işlemi ancak belirli bir yükseklikten sonra başlamaktadır. Bu nedenle ölü zaman değeri tank dolu iken ölçülmelidir. Bunun için tank orta seviyelerde doldurulup, birim basamak işaret uygulanmış ve 10 ms periyotla sıvı yüksekliği okunmuştur. Sistemin uyarıdan 150 ms sonra harekete geçtiği tespit edilmiştir. O halde ölü zaman  $L=0.15$  [s] olarak belirlenir.

Grafikteki parazitler, sıvı borudan tanka dolarken şiddetle fişkırdığından tanktaki sıvının dalgalanıp, köpürmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak ölçmedeki bu gürültü, sistemin tanınması için bir sorun oluşturmaz. Çünkü sistemin birim basamak girişi verdiği yanıt, tamamen  $K/s$  şeklinde tanımlanan integral bir sistem yapısını göstermektedir. Bu tip sistemler için  $K$  değeri, sistemin basamak yanıtının eğimidir. Şekil 2.3'ü oluşturan 85 adet değerlerin ortalaması alındığında  $K=0.0233$  okunmuştur.

Ölü zaman ise sistemin transfer fonksiyonuna " $e^{-sL}$ " şeklinde bir terimin çarpan olarak eklenmesiyle gösterilir. Grafikten okunan değerlere göre tek tank sisteminin transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$G(s) = \frac{0.0233}{s} \cdot e^{-s \cdot 0.15} \quad (2.8)$$

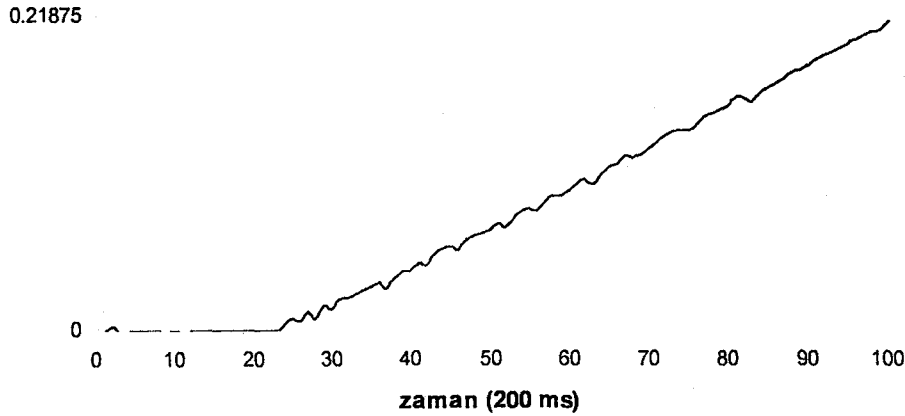
### 2.2.3 ÇİFT TANK İÇİN GEÇİŞ ANALİZİ YAPILARAK MODELLEME

Endüstriyel uygulamalarda, sistem ikinci veya daha yüksek mertebeden bile olsa öncelikle birinci derece modelleme tercih edilmektedir. Modelin düşük mertebeden olması, kontrolör mertebesini de düşürür, böylece tasarım ve uygulama kolaylaşır. Ancak bu durumda, modelin gerçek sistemi sadece belli koşullar altında temsil edeceği hatırlanmalı ve kabul edilen modelin uygulamada yeterli olup olmadığı kontrol edilmelidir.

Çift tank sistemi için burada da ilk olarak birinci derece modelleme yapmak düşünülebilir. Birinci derece ölü zamanlı bir sistemin transfer fonksiyonu genel olarak:

$$G(s) = \frac{K}{1 + T \cdot s} \cdot e^{-s \cdot L} \quad (2.9)$$

şeklinde gösterilir.  $G(s)$  fonksiyonunun parametreleri, sistemin birim basamak girişine verdiği yukarıdaki gibi yanıt kullanılarak belirlenebilir. Burada  $K$ , sistemin kazancıdır. Giriş  $R$  genlikli basamak olduğunda bu parametre, sistem çıkışının sürekli halde aldığı değerin,  $R$ 'ye oranıdır.  $T$  parametresi ise sistemin zaman sabiti olup, çıkışın, sürekli hal değerinin %632'sine geldiği zaman değeridir. " $L$ " parametresi ise ölü zamanı gösterir. Çift tank sisteminin basamak girişine verdiği yanıt Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Çift Tank Sistemi basamak yanıtı

Sisteme çeşitli genliklerde basamak giriş uygulanmış, ancak sürekli hal değeri hep aynı ölçülmüştür. Bu değer tankın ağzına kadar dolup, taşmaya başladığı ana karşı gelir ve doğal olarak çıkışın alabileceği en büyük değerdir. Bu durumda bir önceki paragrafta anlatılan şekilde sistem kazancını tespit etmek mümkün değildir. Sistemin bu şekilde yanıt vermesi, sistemin transfer fonksiyonunun integral terimi içerdiğini gösterir. Demek ki Tek Tank Sistemi gibi Çift Tank Sistemi de toplanarak artan (integrating process) yapıdadır. Bu tip sistemlere basamak giriş uygulandığında  $t \rightarrow \infty$  için teorik olarak sistem yanıtı da sürekli artarak sonsuza gider. Pratikte ise sistemin fiziksel yapısının izin verdiği sınır değere kadar çıkış artacaktır. Üzerinde çalışılan sistemde bu, tankların ağzına kadar dolup, suyun taşmaya başladığı ana karşı gelmektedir. Şekil 2.4'te çıkışın en son 0.2 değeri civarında sabit kalması bir yerleşme değil, fiziksel sınırlara varıldığı için deneyin kesilmesidir.

Bu durumda sistemi, birinci derece modele bir integral teriminin çarpan olarak eklendiği aşağıdaki yapıda düşünmek yerinde olacaktır:

$$G(s) = \frac{K}{s(1 + T \cdot s)} \cdot e^{-s \cdot L} \quad (2.10)$$

Bu tip bir sisteme Birim Basamak giriş uygulandığında sistem yanıtı:

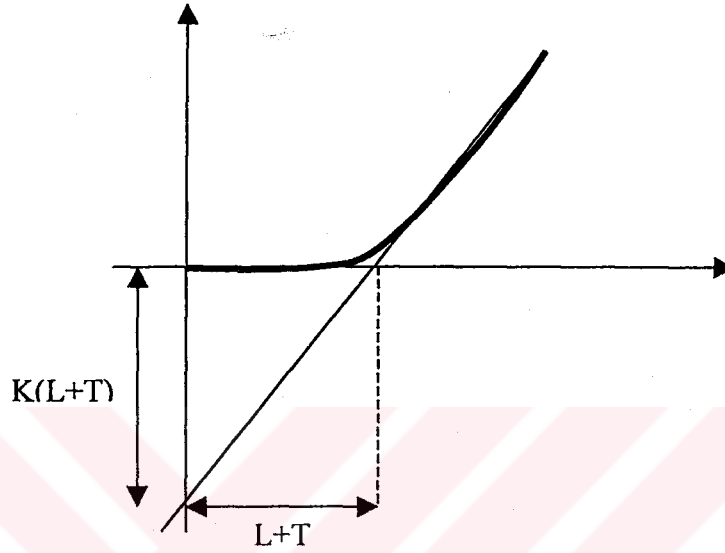
$$s(t) = K \cdot (t - L - T(1 - e^{-(t-L)/T})) \quad (2.11)$$

şeklinde. K, T ve L parametrelerinin sistem yanıtından grafik olarak nasıl tespit edileceği Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Buna göre Şekil 2.4'deki sistem yanıtını oluşturan noktaların eğimleri hesaplanıp ortalaması alınırsa  $K=0.0124$  bulunur. Yine aynı grafikten sistemin 4.4 [s] sonra uyarıya yanıt verdiği görülmüştür. Ancak bu değer ölçme sisteminin yapısı nedeniyle "L+T" olarak alınmamalıdır. Bu konu hakkında bilgi Bölüm 2.2.2'de Tek Tank için modelleme konusunda verilmiştir. Tek Tankta yapıldığı gibi, Çift Tank uygun seviyeye kadar doldurulup 10 ms periyotla değerler alındığında sistemin 0.93 [s] sonra harekete geçtiği anlaşılmıştır. "L" ölü zaman değerini sistemi tek tanklı çalıştırdığımızda  $L=0.15$  [s] olarak hesaplamıştık. Öyleyse  $T=0.78$  olarak bulunur. Bu değer sistemin yapısından kaynaklanan gecikmedir. Bu, (2.11)'deki  $s(t)$  çizdirildiğinde görülebilir.

Hesaplanan değerlere göre Çift Tank Sisteminin transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{0.0124}{s(1 + 0.78 \cdot s)} \cdot e^{-s \cdot 0.15} \quad (2.12)$$

şeklinde bulunur.



Şekil 2.5. İntegral terimi içeren üç parametrelili model için grafiksel olarak parametre tespiti

## 2.2.4 ÇİFT TANK İÇİN EN KÜÇÜK KARELER METODU KULLANILARAK MODELLEME

### 2.2.4.1 EN KÜÇÜK KARELER METODU

Temel olarak En Küçük Kareler Metodu, bir ayırık nokta kümesinden en küçük hale getirilmiş toplam karesel hata ile geçen polinomun bulunması konusudur. Ancak bu metod, polinom tipi olmayan yaklaşıklıklar için de kullanılabilir. Burada, anlatıma bir örnek üzerinden başlamak yararlı olacaktır:

*Örnek:*

{(0, 1) (0.25, 1.2840) (0.5, 1.6487) (0.75, 2.1170) (1, 2.7183)} şeklinde iki boyutlu olarak verilen noktalardan en küçük karesel hata ile geçen 2. derece polinom bulunmak istensin. Aradığımız polinom:

2013 YILI EN KÜÇÜK KARELER  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

$$P(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (2.13)$$

şeklindedir. Amaç polinomun katsayılarının bulunmasıdır.

Denklem takımı şu şekilde yazılır:

$$\tilde{b} = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 1.2840 \\ 1.6487 \\ 2.1170 \\ 2.7183 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.25 & 0.25^2 \\ 1 & 0.50 & 0.50^2 \\ 1 & 0.75 & 0.75^2 \\ 1 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}, \bar{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Burada çözülmesi gereken:

$$A \cdot \bar{x} = \tilde{b} \quad (2.15)$$

denklemdir.

Bu denklem sisteminin çözümü:

$$\bar{x} = (A^T A)^{-1} A^T \tilde{b} \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanabilir.

(2.14)'teki değerlerle (2.16) denklemi çözülerek polinomun katsayıları bulunur.

Verilen örnekte sonuç:

$$P(x) = 1.0052 + 0.8641x + 0.8437x^2 \quad (2.17)$$

bulunmuştur.

En Küçük Kareler Yöntemini hatırlatmak amacıyla küçük bir örnek verildi. Şimdi artık bu yöntemi Sıvı Tank Sistemi üzerinde model parametrelerini elde etmede kullanmaya geçilebilir.

Az önce verilen örnekte, bulunmak istenen polinomun yapısı tamamen kendi tercihimizle seçilmişti. Sonucun daha az hatalı olması istenseydi, çözüm süresinin uzaması göz önüne alınabildiği sürece, polinom 3 veya daha yüksek dereceli de seçilebilirdi. Aynı şekilde Çift Sıvı Tankı Sistemi için bu yöntem uygulanırken, elimizdeki giriş-çıkış dizisine uydurmak üzere bir model yapısı seçilmelidir. Sistem için model önerisi bir sonraki bölümde anlatılacaktır. Model yapısı seçildikten sonra uygulanacak çözüm aşamaları aynen yukarıda verilen örnekteki gibi olacaktır. Sadece, polinom tipinde bir yapı kullanılmazsa parametre vektörünün ( $A$ ) oluşturulmasında biraz değişiklik olabilir. Bunu da bir örnekle açıklamak uygundur:

*Örnek:*

Bir sisteme  $u(k) = [6, 7, 8, 9]$  şeklinde giriş uygulanmış ve  $y^*(k) = [2, 3, 4, 5]$  gibi bir çıkış okunmuştur. İlgili sistem için  $y(k) = a_0 u(k) + a_1 u(k-1) + a_2 y^*(k)$  tipinde bir model önerilsin. Bu halde:

$$A = \begin{bmatrix} 7 & 6 & 3 \\ 8 & 7 & 4 \\ 9 & 8 & 5 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılacaktır. Sonraki çözüm aşamalarında herhangi bir değişiklik yoktur.

#### 2.2.4.2 SİSTEM İÇİN MODEL SEÇİMİ

Sistem için herhangi yapıda bir model önerilebilir. Burada fiziksel denklemlerden çıkarılan model yapısı önerilecektir. Ancak model parametrelerinin tespitinde fiziksel büyüklükleri kullanmak yerine deneysel bir yaklaşımla En Küçük Kareler Yöntemi kullanılacaktır. Bölüm (2.1)'de Zaman Ülkesinden, Laplace Dönüşümü ile "s" Ülkesine geçilerek bir model elde edilmişti. Şimdi ise bu model ayrıklaştırıp "z" Ülkesine geçilecek, daha sonra da hesaplarda kullanmak üzere ayrık durum denklemleriyle ifade edilecektir.

Gerçekte tüm sistemler sürekli şekilde çalışır. Sistemden istenilen veriler belli anlarda örneklenerek alınır, bu şekilde işaretler ayrık hale getirilmiş olur. Ancak sistem uyarılmak istendiğinde ayrık işaretler sisteme doğrudan uygulanamaz. Ayrık

işaretin tutucudan geçirilerek sürekli yapıdaki sisteme uygulanabilir hale getirilmesi gerekir. Tutucu çeşitli yapılarda olabilir. Burada sistem üzerindeki işlemler PLC üzerinden yapıldığından, modelin ayrıklaştırılması için sıfırıncı dereceden bir tutucu kullanılmış olmaktadır.

Sıfırıncı dereceden tutucu:

$$H_0(s) = \frac{1 - e^{-T \cdot s}}{s} \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir.  $G(s)$  ile ifade edilen sistemin ayrıklaştırılması,  $G(s) \cdot H_0(s)$  çarpımının  $z$  dönüşümünün alınmasıyla olur. Çift tank sistemi için bu dönüşüm:

$$Z \left\{ \frac{1 - e^{-T \cdot s}}{s} \cdot \frac{1}{A_1 A_2 R \cdot s^2 + (A_1 + A_2)s} \right\} = \quad (2.20a)$$

$$\frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{A_1 A_2 R \cdot s^3 + (A_1 + A_2)s^2} \right\} \quad (2.20b)$$

şeklinde olur.  $(s \rightarrow z)$  dönüşüm özellikleri kullanılarak dönüşüm yapıp, ifade düzenlendiğinde:

$$G_s H_0(z) = \frac{1}{(A_1 + A_2)} \cdot \left[ \frac{T}{(z-1)} - \frac{1 - e^{-a \cdot T}}{a \cdot (z - e^{-a \cdot T})} \right] \quad (2.21)$$

elde edilir. İfade:

$$a = -\frac{(A_1 + A_2)}{A_1 A_2 R} \quad (2.22)$$

yazılarak kısaltılmıştır.  $G_s H_0(z)$  düzenlenerek sıfır-kutup gösterimine geçildiğinde:

$$G_s H_0(z) = \theta \cdot \frac{z + \beta}{(z-1) \cdot (z - \gamma)} \quad (2.23)$$

gibi bir yapı elde edilir. En son olarak bu yapı da düzenlenirse, ifade:

$$G_s H_0(z) = \theta \cdot \frac{\beta \cdot z^{-2} + z^{-1}}{1 + \gamma \cdot z^{-2} - (1 + \gamma) \cdot z^{-1}} \quad (2.24)$$

şekline gelir.  $G_s H_0(z) = y(k)/u(k)$  şeklinde yazılabildiğinden, ifade ayrık durum denklemini olarak:

$$y(k) = \theta \cdot \beta \cdot u(k-2) + \theta \cdot u(k-1) + (1 + \gamma) \cdot y(k-1) - \gamma \cdot y(k-2) \quad (2.25)$$

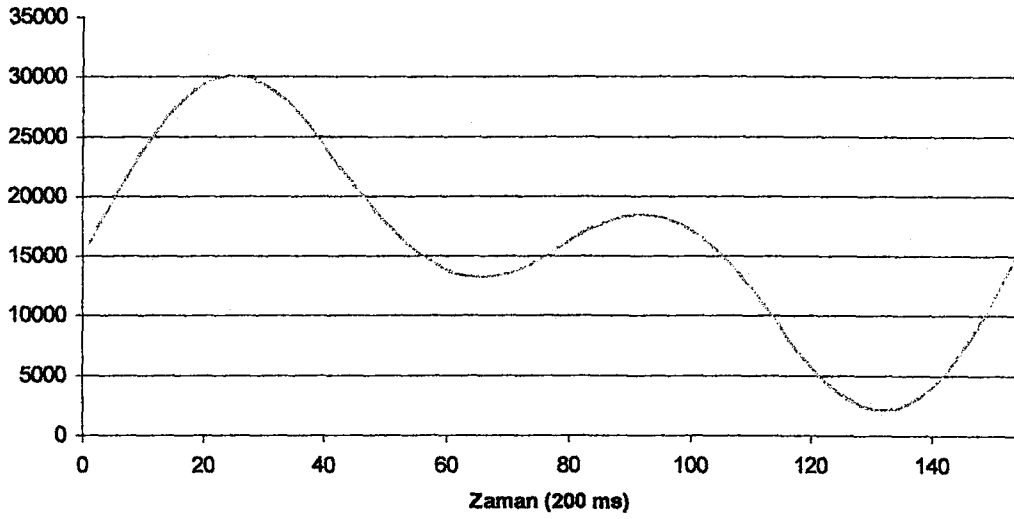
şeklinde gösterilir. Bu durumda model önerisi:

$$y(k) = b_1 \cdot u(k-1) + b_2 \cdot u(k-2) + a_1 \cdot y(k-1) - a_2 \cdot y(k-2) \quad (2.26)$$

yapısında olacaktır. Bu aşamadan sonra,  $[b_1, b_2, a_1, a_2]$  parametrelerinin hesaplanması için önceki bölümde anlatılmış olan En Küçük Kareler Yönteminin uygulanmasına geçilir.

#### 2.2.4.3 METODUN SİSTEME UYGULANMASI

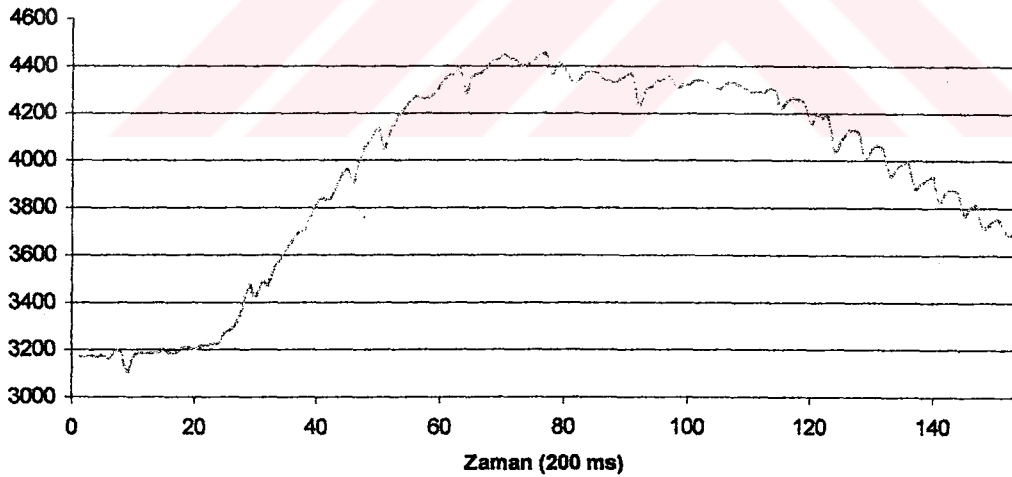
Önceki konuda anlatılan En Küçük Kareler Yönteminin uygulanabilmesi için, bir deney düzenlenerek, sistem girişine ve çıkışına ait verilerin elde edilmesi gerekmektedir. Sistemi uyarmak için, basamak, rampa veya sinüs şeklinde işaretler kullanılabilir. Deney yapılırken seçilecek işaretin, kontrol uygulaması çalışırken kontrolörün sistem girişine uygulayacağını tahmin ettiğimiz işarete kabaca da olsa benzemesi uygun olur. Hatırlanırsa, sistem için bulunacak model, ancak belli koşullar altında bir dereceye kadar geçerli olacaktır. Deney koşulları, sadece yaklaşık olarak biliniyor da olsa, bu koşulları çalışma noktasına ne kadar benzer seçersek, bulunacak model de o çalışma noktasında sistemi o kadar iyi temsil eder. Bu açıdan bakıldığında, birinci tanktan sürekli ana tanka sıvı akışı olduğu için sistemde giriş hiçbir zaman sıfır olmayacak, kontrolör girişe belli değerlerde yumuşak geçişler yaptırarak sıvı seviyesini sabit tutmaya çalışacaktır. Bu nedenle sistem girişine sinüs şeklinde işaret uygulanması uygun olabilir. Deneyde giriş işaretini biraz daha güzelleştirmek için iki sinüs toplamı şeklinde bir işaret tercih edilmiştir. Giriş işareti aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 2.6 Çift Tank için sistem tanıma giriş işareti

Deney sırasında örnekleme periyodu 200 ms olarak uygulanmıştır. Bu şekilde 156 adet giriş-çıkış verisi elde edilmiştir. Deneyde kullanılan S7-200 PLC cihazı ile ilgili bilgi, cihazın programlanması ve deneyin teknik ayrıntıları EK-A'da verilmiştir.

Sistemin çıkış işareti ise Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 Çift Tank için sistem tanıma deneyi çıkış işareti

Sisteme uygulanan giriş ve okunan çıkış işaretine ait 156'şar adet veri, En Küçük Kareler Yönteminde kullanılacak matrislerin oluşturulması için önce Excel'de düzenlenmiş, daha sonra işlemlerin yapılması için Matlab ortamına aktarılmıştır. Hesaplama kullanılan matrisler ve Matlab işlemleri EK-B'de verilmiştir. Yapılan

hesap sonucu önerilen modelin (2.26) parametreleri bulunmuş, sonuç olarak aşağıdaki yapı sistem modeli olarak ortaya çıkmıştır:

$$y(k) = -0.0186u(k-1) + 0.0205u(k-2) + 0.7354y(k-1) + 0.2582y(k-2) \quad (2.27)$$

Ayrık fark denklemi şeklindeki bu yapıdan, transfer fonksiyonu formuna geçilsin. Fark denklemi şu şekilde de yazılabilir:

$$y(k) - 0.7354y(k-1) - 0.2582y(k-2) = -0.0186u(k-1) + 0.0205u(k-2) \quad (2.28)$$

Buradan,

$$G(z) = \frac{0.0205z^{-2} - 0.0186z^{-1}}{1 - 0.7354z^{-1} - 0.2583z^{-2}} \quad (2.29)$$

şeklinde olduğu çıkar. Pay ve payda  $z^2$  ile çarpılarak:

$$G(z) = \frac{-0.0186z + 0.0205}{z^2 - 0.7354z - 0.2583} \quad (2.30)$$

bulunur. Kutup-sıfır gösterimine geçilirse aşağıdaki yapı bulunur:

$$G(z) = \frac{(z - 1.1021)}{(z - 0.9950)(z + 0.2596)} \quad (2.31)$$

Bu şekilde Çift Sıvı Tankı Sistemi için En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak bir model elde edilmiş oldu. Ancak Bölüm 2.2.1’de anlatıldığı gibi modelin sistemi ne kadar yaklaşıklıkla temsil ettiği iyi irdelenmelidir. Sistemin karmaşıklığı arttıkça tek bir model yapısının sistemi tarif edemeyeceği açıktır. İleri durumda, sistem üzerindeki önsel bilgilere dayanılarak farklı çalışma noktaları için farklı model yapılarının elde edilmesi gerekebilir. Bu halde her bir model, geçerli olduğu koşullar gerçekleştiğinde seçilip kullanılır. Sistem tanıma oldukça geniş bir konu olduğu için bu ileri düzey işlemler burada anlatılmayacaktır.

### 3. SIVI TANKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ

#### 3.1 ÇEŞİTLİ KONTROLÖR TİPLERİ VE ALGORİTMALARI

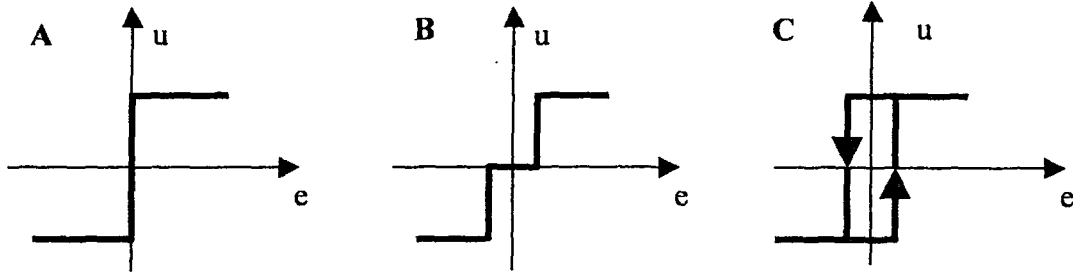
En çok kullanılan kontrol algoritması PID Kontrolördür. Çoğu geribesleme çevrimi bu algoritma veya onun küçük değişikliklerle oluşturulmuş türevleriyle kontrol edilir. PID Kontrolöre birkaç temel kuralla çalışan bir cihaz olarak bakılabileceği gibi, analitik olarak da yaklaşılabılır.

Tüm Kapalı Çevrim Kontrol Sistemlerinde olduğu gibi, PID Kontrolörde de basit olduğu kadar kullanışlı olan geri besleme fikri geçerlidir. Geri beslemenin temel ilkesi, “süreç çıkışı referans değerden küçükse girişi artır, büyükse girişi azalt” şeklinde verilebilir. Bu ilke çerçevesinde en basit geri besleme düzeneği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

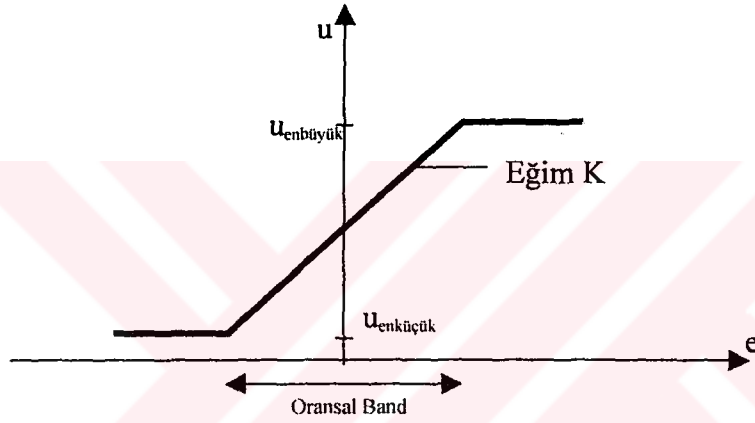
$$u = \begin{cases} u_{\text{enbüyük}} & e > 0 \\ u_{\text{enküçük}} & e < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada  $e$ , sistem çıkışının alması istenen değer, referans ile sistem çıkışının ölçülen değeri arasındaki fark, yani kontrol hata terimidir. Bu tip geri beslemeye aç-kapa kontrol adı verilmektedir. Bir fırın sıcaklığının kontrolü buna örnek verilebilir. Fırın sıcaklığı, istenilen değer altına düştüğünde ısıtıcı çalıştırılır, sıcaklık istenilen değeri aştığında ise ısıtıcı kapatılır.

Aç-kapa kontrol, sistem çıkışını referans değer civarında tutma işleminde genellikle başarılı olur. Ancak çıkışın sürekli olarak dalgalanmasına neden olacaktır. Fırın örneğinde, fırın sıcaklığının yükselmesi, ısıtıcının kapatılmasına neden olacak, ancak sıcaklık bir süre daha yükselmeye devam edecektir, çünkü ısıtıcı direnci üzerindeki akım kesilse de direnç bir süre daha etrafa ısı yaymaya devam edecektir. Aç-kapa kontrol, üzerinde birkaç değişiklik yapılarak daha verimli olarak kullanılabilir. Kontrolör karakteristikleri Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. İdeal Aç-kapa kontrol karakteristiği (A), ölü bölgeli Aç-kapa kontrol (B), histerisis yapıli Aç-kapa kontrol (C)



Şekil 3.2. Oransal Kontrolör karakteristiği. Giriş hata işareti e, çıkış kontrol işareti u.

Aç-kapa kontrolün dalgalanmaya yol açmasının nedeni, hata işareti büyük olsun küçük olsun sisteme hep aynı girişi uygulamasıdır. Bu eksiklik, hatanın büyüklüğü ile orantılı kontrol işareti üreten oransal kontrolör ile çözülür. Oransal kontrolörün karakteristiği Şekil 3.2’de görülmektedir. Büyük hata değerleri için oransal kontrolörün aç-kapa kontrolör şeklinde davranacağı şekilden de anlaşılmaktadır.

Pratikte kullanılan kontrol algoritmaları genellikle oransal kontrolörden daha karmaşık yapıdadır. PID kontrolörün uygulamada oldukça kullanışlı yapıda olduğu deneysel olarak anlaşılmıştır. Genel olarak PID kontrolör algoritması şu şekilde tarif edilebilir:

$$u(t) = K \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.2)$$

Bu gösterime standart gösterim adı verilir. Bu ifadede  $u(t)$ , kontrol işareti;  $e(t)$ , hata işareti;  $K$ , kazanç;  $T_i$ , integral zamanı;  $T_d$ , türev zamanıdır. (3.2) denkleminde de anlaşıldığı gibi, PID kontrolör, hata işareti ile beraber, hatanın zamanla değişimini de içerir.

(3.2) ifadesi aynı zamanda:

$$u(t) = Ke(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Burada  $K_i=K/T_i$ ,  $K_d=KT_d$  'dir. Bu tip yapı, PID kontrolörün paralel olarak ifadesi adını alır.

Eğer (3.2) ve (3.3) ifadelerinin Laplace Dönüşümleri alınırsa, ifadeler sırayla:

$$G(s) = K(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d) \quad (3.4)$$

ve

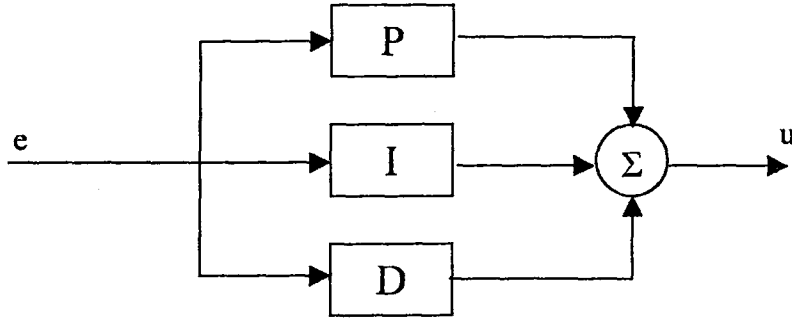
$$G(s) = K + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad (3.5)$$

formuna gelir. Standart ve paralel halde PID Kontrolörün blok diyagramı Şekil 3.3'de görülmektedir.

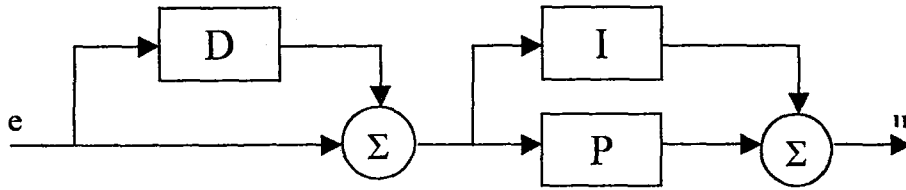
Ancak ticari kontrolörlerin çoğunda bu yapıların biraz daha değişiki kullanılır:

$$G'(s) = K'(1 + \frac{1}{sT'_i})(1 + sT'_d) \quad (3.6)$$

Bu kontrol yapısının blok diyagramı ise Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.3. PID Kontrolörün blok diyagramı (standart yapı)



Şekil 3.4. PID Kontrolörün seri olarak gerçekleştirilmesi

Bu yapıya seri gerçekleştirme adı verilir. Seri olarak gerçekleştirilen bir PID Kontrolör her zaman katsayıları aşağıdaki gibi olan standart yapıda bir PID Kontrolör olarak gösterilebilir:

$$K = K' \frac{T_i' + T_d'}{T_i'} \quad (3.7)$$

$$T_i = T_i' + T_d'$$

$$T_d = \frac{T_i' \cdot T_d'}{T_i' + T_d'}$$

Ancak bunun tersi bir işlem sadece  $T_i \geq 4T_d$  ise mümkündür. Bu halde:

$$K' = \frac{K}{2} (1 + \sqrt{1 - 4T_d / T_i}) \quad (3.8)$$

$$T_i' = \frac{T_i}{2} (1 + \sqrt{1 - 4T_d / T_i})$$

$$T_d' = \frac{T_i}{2} (1 - \sqrt{1 - 4T_d / T_i})$$

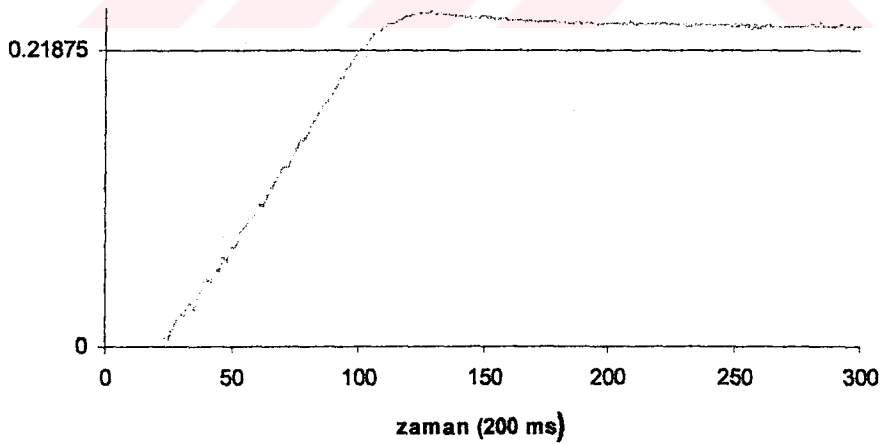
şeklinde bir dönüşüm yapılır.

Üç kontrolör yapısı da (Seri gerçekleştirme çoğunlukta olmak üzere) üreticiler tarafından tercih edilmektedir. Standart forma kimi zaman ISA algoritması veya ideal algoritma da denilmektedir.

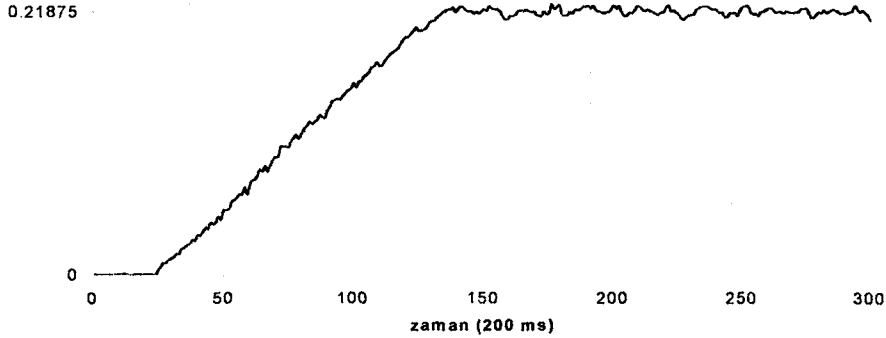
Seri yapının tercih edilmesi biraz da tarihsel bir nedene dayanmaktadır. Kontrolör üreticileri, önceleri pnömatik kontrolörler üretiyorlardı. Bu tip kontrolörlere bu yapı çok iyi uyuyordu. Sonra zamanla analog ve sayısal elektrik teknolojisi gelişti, ancak yapı değişmeden kaldı.

### 3.1.1 AÇ-KAPA KONTROLÖRÜN GERÇEKLENMESİ

Bu yapı akla gelebilecek en basit kontrol algoritmasıdır. Tank sisteminde su yüksekliği referans değerin altındaysa kontrolör vanayı sonuna kadar açar, üstündeyse sonuna kadar kapar. Bozuculu ve bozucusuz durumda aç-kapa kontrolün başarımı Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Bozuculu halde referans etrafındaki küçük salınımlar dışında oldukça iyi bir başarımla görülmektedir. Ancak bozucusuz durumda sistemin yapısı gereği negatif kontrol işareti uygulanamadığından, aşım ve sürekli hal hatası oluşmaktadır.



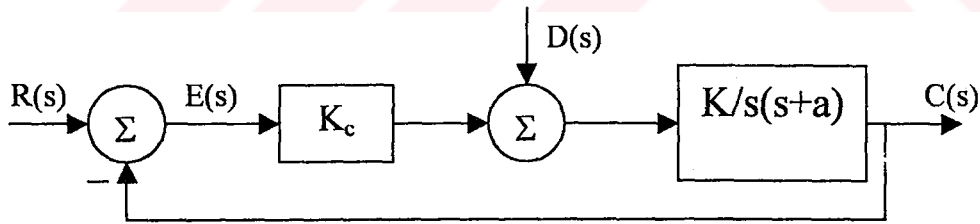
Şekil 3.5 Bozucusuz durumda Aç-Kapa Kontrollü sistem yanıtı



Şekil 3.6 Bozuculu durumda Aç-Kapa Kontrollü sistem yanıtı

### 3.1.2 ORANSAL TİP (P) KONTROLÖRÜN GERÇEKLENMESİ

$G(s)=K/s(s+a)$  yapısındaki çift tank sistemi, “ $K_c$ ” kazancıyla tanımlanan oransal kontrolörle çalıştırıldığında Şekil 3.7’deki blok diyagramla gösterilebilir. Bozucu yok kabul edilerek düşünüldüğünde  $s=0$ ’da kutba sahip bu sistemin birim basamak giriş uygulandığında sürekli hal hatası  $e_{ss}=0$  olacağı gösterilebilir. Oysa bozucu da göz önüne alınarak hesap yapıldığında sürekli hal hatasının sıfırdan farklı olduğu görülür.



Şekil 3.7 Sistemin Oransal Kontrol uygulandığında blok diyagramı

Sürekli hal hatası:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \{s.E(s)\} \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanır. Sistem  $R(s)$  ve  $D(s)$  olmak üzere iki girişe sahiptir. İlk durumda  $R(s)=1/s$  ve  $D(s)=0$  alınarak:

$$C_R(s) = \frac{K_c K}{s(s+a) + K_c K} \cdot R(s) \quad (3.10)$$

İkinci halde ise  $R(s)=0$  ve  $D(s)=D/s$  alınarak (bozucunun  $d(t)=D$  gibi bir sabit olduğu kabulüyle):

$$C_D(s) = \frac{K}{s(s+a) + K_c K} \cdot D(s) \quad (3.11)$$

$C(s)=C_R(s)+C_D(s)$  şeklinde yazılıp,  $R(s)=1/s$  (  $r(t)$  birim basamak) ve  $D(s)=D/s$  (  $d(t)$  sabit) yerlerine konulursa:

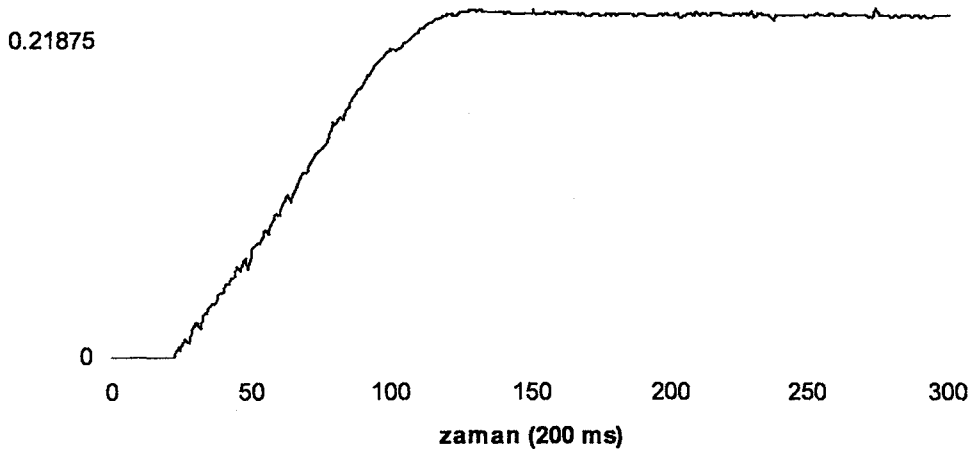
$$C(s) = \frac{K_c K + KD}{s^3 + s^2 \cdot a + s \cdot K_c K} \quad (3.12)$$

şeklinde bulunur.  $R(s)=1/s$  olmak üzere  $E(s)=R(s)-C(s)$  yazılıp no ifadesine göre sürekli hal hatası hesaplanırsa:

$$e_{ss} = -\frac{D}{K_c} \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Gerçekten de oransal kontrol sistem üzerine uygulandığında sürekli hal hatasının mevcut olduğu görülmüştür. Şekil 3.8'de sistem yanıtı görülmektedir.

Oluşan sürekli hal hatası kontrolöre integral teriminin eklenmesiyle (PI tipi kontrolör) giderilebilir. PI tipi kontrolör, bir sıfır ve  $s=0$ 'da bir adet kutup getirir. Bu ise Çift tank sisteminin  $G(s)=K/s(s+a)$  şeklindeki yapısı nedeniyle kapalı çevrim kutuplarının sağ yarı düzleme geçmesine ve sistemin kararsız hale gelmesine neden olur. Bu sorun, sol yarı düzleme bir sıfır eklenerek köklerin yer eğrisine ait kolların çekilmesi ile düzelecektir. Bu tip iki adet sıfır ve  $s=0$ 'da bir kutbu olan kontrolör ise PID kontrolördür.



Şekil 3.8 Sisteme oransal kontrol uygulandığında oluşan sürekli hal hatası

### 3.1.3 PID KONTROLÖRÜN GERÇEKLENMESİ

Sayısal bir bilgisayar üzerinde PID Kontrolörü gerçeklemek için kontrolör algoritmasının Ayrık Fark Denklemi formuna getirilmesi gerekir. Bu yapıdan yararlanarak PID algoritması sayısallaştırılmış olur. Bu şekilde integral ve türev işlemleri rahatça programlanabilir.

Hesapta, oransal, integral ve türev terimleri ayrı ayrı hesaplanıp sonra toplanarak  $u(t)$  işareti elde edilebilir:

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \quad (3.14)$$

ve

$$\begin{aligned} u_p(k) &= K_c e(k) \\ u_d(k) &= K_d \frac{[e(k) - e(k-1)]}{T} \end{aligned} \quad (3.15)$$

olarak hesaplanabilir. İntegral terimi  $u_i(k)$  ise dikdörtgen veya yamuk yaklaşımına göre elde edilir:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i T e(k-1) \quad (3.16)$$

Yamuk yaklaşımı ile yapılırsa:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i T \frac{e(k) - e(k-1)}{2} \quad (3.17)$$

şeklinde hesaplanır.

Fark denklemi olarak elde edilen (3.15) ve (3.17) ifadeleri, içgüdüsel olarak göze hoş görünse de kazanç ve türev terimlerindeki  $e(k)$  hata işareti nedeniyle uygulamada sorun yaratabilir. Çünkü  $e(k)$ , içinde referans işareti taşımaktadır. Bu da referanstaki ani bir değişimin kontrol işaretinde istenmeyen değişimlere neden olması sonucunu doğurur. Böyle bir değişim en çok türev teriminde etkisini göstereceğinden, bunu önlemek için, türev terimindeki  $e(k)$ 'lar yerine  $y(k)$  yazmak uygun olacaktır.

Türev teriminde yapılan bu değişikliğin, (3.15) ve (3.17)'deki gibi programlanan kontrolörlerde yapılması kontrolör başarımı açısından çok iyi sonuçlar verecektir. PID kontrolör de kendi başına ayrı bir sistem olduğundan, tasarım sırasında kontrolör transfer fonksiyonunda yerleşme zamanı artacak şekilde değişiklikler yapılırsa, referans işaretin ani değişimlerinde çıkışta görülen istenmeyen değişimler önlenabilir.

Bir kontrol sistemi çoğu durumda doğrusal ifadelerle tanımlanabilse de bazı doğrusal olmayan durumları hesaba katmak gerekli olabilir. Örneğin uygulamada her zaman bir motorun ulaşabileceği bir sınır hız değeri, yada bir vananın akıtılabileceği bir sınır debi değeri vardır, hiçbir gerçek sistemden fiziksel yapısından daha fazla şey beklenemez. Çoğu kontrol sistemi için geniş bir çalışma aralığında kontrol işareti bu sınır değerlere ulaşabilir. Bu durumda geri besleme çevrimi devreden çıkar ve sistem sanki açık çevrim çalışıyormuş gibi olur. Çünkü cihaz (motor, vana vb.) sınır değere ulaştığından, sistem çıkışından bağımsız olarak hep aynı değeri korur. Eğer integral kontrol kullanılıyorsa, bu sırada hata terimi  $e(t)$  integre edilmeye devam ettiğinden kontrolör çıkışı aşırı büyüklükte değerlere ulaşır, uçar gider. Bu halde hata işaretinin herşey normale dönene kadar uzun bir süre, pozitif değere sahip olmasına ihtiyaç vardır.

Bu sorunu önlemek için çok çeşitli metotlar vardır. Üretici firmalar ürünlerinde çeşitli yollar kullanmalarına rağmen bunları bir imalat sırrı olarak saklamaktadırlar. Sorunu önlemenin bilinen en kolay yolu, kontrolör çıkışını sınırlandırmaktır, öyle ki kontrol işareti asla cihazın (motor vb.) sınır giriş değerini aşmamalıdır. Diğer bir

metot ise kontrol işaretinin sürekli artıp doymaya ulaşması durumunda integral işlemini durdurmaktır. Çeşitli koşullara bağlı olarak integral işleminin devreye alınıp çıkarılmasını temel alan birçok farklı metot bulunmaktadır.

Tank Sistemi üzerinde çalışılırken öncelikle (3.15) ve (3.17) ifadeleri temel alınarak kontrolör programlanmıştır. Algoritmada türev teriminde hata “e(k)” yerine çıkış “y(k)” kullanılmıştır. Kontrolöre ait PLC programı EK-C’de verilmiştir.

İntegral yığılması sorunu, çıkışın sınır değerleri aştığı anlarda integral terimine müdahale edilip, sanki P, I ve D terimlerinin toplamı çıkışın mümkün olan en büyük değerini almış gibi yapılarak çözülmüştür.

Kontrol algoritması, PLC üzerinde [0,1] aralığına normalleştirilmiş değerlerle çalıştığından, hatanın pozitif veya negatif yönde büyük olduğu durumlarda, 1’den büyük veya 0’dan küçük u(k) değerleri elde edilebilir. Bu halde integral terimi işlev dışı kalır, çünkü hatanın büyük olduğu anlara ait integral toplamını içerir. Artık hata sifıra yaklaşırsa bile, çıkış sürekli 1 veya 0 değerinde olacaktır, bu nedenle u(k)’nın [0,1] aralığını aştığı anda integral teriminde düzeltme işlemi yapılmalıdır. Bu düzeltme şu şekilde yapılmıştır:

$$u_i(k-1) = \begin{cases} 1 - (u_p(k) + u_d(k)), u(k) > 1 \\ -(u_p(k) + u_d(k)), u(k) < 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

Dikkat edilirse, bu atama işlemi integral terimine, üç terimin de toplamı 1 veya hata işareti ters işaretliyse 0 olacak şekilde bir değer atamaktadır. Bu şekilde bir sonraki örnek anında hesap yapılırken, bir önceki paragrafta anlatılan sorunla karşılaşılmayacaktır.

#### 3.1.4 PID KONTROLÖRÜN PARAMETRELERİNİN TESPİTİ

PID Kontrolörün yapıları ve programlanması hakkında gerekli bilgiler verildikten sonra, artık sıra kontrolörün sisteme uygunluğunu ve başarımını ortaya çıkaracak parametreleri tespit etmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, PID’lerin programlanması ve yapıları çok farklılık göstermez, bunların standart hale getirildiği bile söylenebilir. PID hangi tip yapıda olursa olsun, üzerinde çalışılan sisteme uygun kontrol parametrelerini belirlemek her zaman en hassas nokta olmaktadır.

Parametrelerin tespiti için çeşitli yollar mevcuttur. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı Ziegler-Nichols metotları olarak anılan 1942 yılından kalma iki yöntemdir. Metot, kontrolör parametrelerini çok basit formüllere dayanarak hesaplamaya imkan verdiği için uygulamada oldukça sık kullanılmaktadır. Ancak bu hesap kolaylığı, metodun her zaman en uygun çözümü vereceğini göstermez. Metot yine de, parametreler hakkında kabaca bir önfikir edinmek için kullanılabilir.

Ziegler-Nichols Metodu denilince ilk olarak anlaşılan Ziegler-Nichols Basamak Yanıt Metodudur. Sistemin basamak yanıtından ölü zaman “L” ve yanıtın eğimi K olmak üzere  $K=a/L$  şeklinde “a” parametresi tespit edilir. Daha sonra aşağıdaki Tablo 1’deki gibi kontrolör parametreleri belirlenir.

Tablo 3.1 Ziegler-Nichols Yöntemine göre kontrolör parametrelerinin tespiti

| Kontrolör Tipi | K       | Ti   | Td    |
|----------------|---------|------|-------|
| P              | $1/a$   | -    | -     |
| PI             | $0.9/a$ | $3L$ | -     |
| PID            | $1.2/a$ | $2L$ | $L/2$ |

Ziegler-Nichols diye adlandırılan metotlardan ikincisi ise Frekans Yanıt Metodu’dur. Sistem oransal kontrolör kullanılarak kapalı çevrim çalıştırılır. Bu halde oransal kontrolör parametresi “K” sürekli artırılarak çıkış gözlenir. Sistem çıkışının osilasyon yapmaya başladığı ana ait “K” değeri “ $K_u$ ”, bu osilasyonun periyodu ise “ $T_u$ ” olarak tanımlanır. Tanımlanan değer Tablo 2’deki yerine konulur ve kontrolör parametreleri hesaplanır.

Tablo 3.2 Ziegler-Nichols Frekans Yanıt Metoduna göre kontrolör parametrelerinin tespiti

| Kontrolör Tipi | K        | Ti       | Td         |
|----------------|----------|----------|------------|
| P              | $0.5K_u$ | -        | -          |
| PI             | $0.4K_u$ | $0.8T_u$ | -          |
| PID            | $0.6K_u$ | $0.5T_u$ | $0.125T_u$ |

Tek ve çift tank sistemlerinin Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’deki basamak yanıtlarından ilgili a ve L değerleri sırayla (0.025;0.8) ve (0.0475;3.9) okunmuştur. Buna göre Ziegler-

Nichols basamak yanıt metodu kullanılarak belirlenen parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen parametre değerleri sistem üzerinde denendiğinde sonuçların istenilen başarıyı sağlayamadığı görülmüştür.

Tablo 3.3 Ziegler-Nichols Basamak Yanıt Metoduna göre kontrolör parametreleri

| Kontrolör Tipi | Tek Tank (PI) |      | Çift Tank (PID) |    |      |
|----------------|---------------|------|-----------------|----|------|
|                | K             | Ki   | K               | Kd | Ki   |
| Değer          | 5.6           | 12.4 | 120             | 36 | 1500 |

PID kontrolör parametrelerin tespitinde Ziegler-Nichols benzeri daha birçok metot bulunmaktadır. Burada bunlar üzerinde durmaktansa, sistem ve kontrolör modelini kullanarak matematiksel yolla parametreleri tespit etmek daha yerinde olacaktır.

Çift tank sistemini göz önüne alınsın. Sistemin (2.12) ifadesinde verilen transfer fonksiyonu, kutup-sıfır gösterimine çevrilirse:

$$G(s) = \frac{0.0016}{s(s + 1.28)} \quad (3.19)$$

şeklinde olduğu görülür. Buna göre sisteminin  $s=0$  ve  $s=-1.28$ 'de birer adet kutbu bulunmaktadır. PID kontrolör ise bir kutup ve iki sıfır içermektedir. PID'nin kutubu  $s=0$ 'da bulunmakta, sıfırları ise kontrolör parametrelerine göre yerleşmektedir. Bunlara göre sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu üç kutup ve iki sıfır içerecektir.

PID kontrolörün "-a" ve "-b"de bulunan sıfırlarının yerleştirilmesi tasarımın en önemli kısmıdır. Kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_c(s) = \frac{K_c(s + a)(s + b)}{s} \quad (3.20)$$

Parametreler cinsinden ise PID Kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$G_c(s) = \frac{K_d(s^2 + \frac{K}{K_d}s + \frac{K_i}{K_d})}{s} \quad (3.21)$$

Sıfırlar yerleştirilip, istenilen aşım vb. kriterleri sağlayacak " $K_c$ " değeri tespit edildikten sonra (3.20) ifadesi açılıp (3.21)'e eşitlenir, böylece kontrolör parametreleri bulunmuş olur. Aşım değeri şu şekilde hesaplanır:

$$Aşım = e^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \pi} \quad (3.22)$$

Bu ifadeden, aşımın sıfıra yakın olması için " $\xi$ " değerinin 1'e olabildiğince yakın seçilmesi gerektiği görülmektedir.

Sisteme ait köklerin yer eğrisi çizildiğinde, PID'nin sıfırlarının konumunun çok hassas bir şekilde ayarlanması gerektiği görülür. Bu aşamada MATLAB yazılımına ait "rltool" arabirimi yardımıyla tasarım yapılmıştır. Sisteme uygulanabilecek düzeyde kazanç veren bir çözüm kontrolör sıfırlarının  $s=-4$  ve  $s=-0.15$  olacak şekilde ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Bu tip bir yerleşimde, kazanç "5" yapıldığında  $\xi=0.63$  ve kapalı çevrim kutupları  $s_{1,2}=-0.131 \pm 0.163i$  olmaktadır. Buradaki kazancın (3.20) ve (3.21)'in eşitlenmesinden  $K_d$ 'ye eşit olduğu görülmektedir. Diğer kontrolör parametreleri ise (3.20) ve (3.21)'in eşitlenmesinden şu şekilde elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} K_d &= 5.0 \\ K / K_d &= 4.15 \Rightarrow K = 20.7 \\ K_i / K_d &= 0.6 \Rightarrow K_i = 3.0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Parametrelerin tespiti için kullanılabilecek bir diğer matematiksel yol, sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonundan elde edilen karakteristik denklemlerle çalışmaktır. Karakteristik denklem  $1+G_c(s)G_p(s)=0$  olarak gösterilir. (2.12)'de verilen Çift Tank Sistemine ait transfer fonksiyonu ve (3.4)'de verilen kontrolör yapısı kullanılıp, " $K$ " kontrolör kazancı ve " $K_p$ " sistem kazancı olmak üzere karakteristik denklem hesaplanırsa:

$$s^3 + s^2 \left( \frac{KK_p T_i T_d + T_i}{T} \right) + s \left( \frac{T_i KK_p}{T} \right) + \left( \frac{KK_p}{T} \right) = 0 \quad (3.24)$$

elde edilir.

Genel olarak üçüncü mertebeden bir sisteme uygun bir karakteristik denklem:

$$(s + \alpha \omega_n)(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2) = 0 \quad (3.25)$$

şeklinde olabilir. (3.25) yapısı, “ $\xi$ ” ve “ $\omega_n$ ” ile tanımlanan iki baskın kutup ve  $-\alpha \omega_n$ ’de bir gerçel kutup içerir.

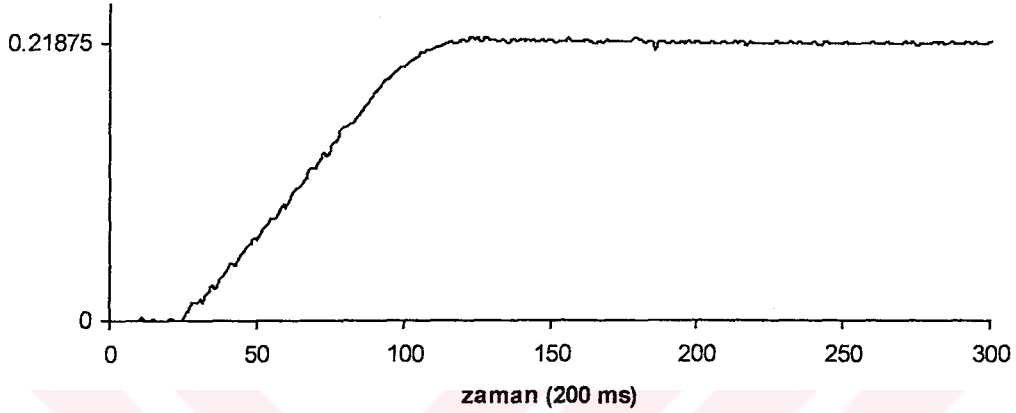
Yapılacak işlem öncelikle aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı vb. kriterlerle “ $\xi$ ” ve “ $\omega_n$ ” değerlerini tespit etmektir.  $-\alpha \omega_n$ ’de bulunan kutup, belirlenen kutupların davranışını bozmayacak şekilde yeterli uzaklıkta (en az 5, 10 veya 20 kat) konumlandırılır ve buradan “ $\alpha$ ” belirlenir. Böylece (3.25)’in katsayıları bulunmuş olur. Bu denklem sistemin sahip olması istenen denklemdir. Daha sonra (3.24) ve (3.25) ifadeleri eşitlenip, aranan  $K$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  parametreleri hesaplanır.

Aşım 0.02 (%2) ve yerleşme zamanı 15 sn. alınarak hesap yapıldığında  $K=75$ ,  $K_i=16$  ve  $K_d=56$  bulunmuştur. Bu değerler sisteme uygulanabilecek kazanç sınırı dışında kaldığı için uygulanabilir değildir.  $-\alpha \omega_n$ ’de bulunan kutbun yeri ile oynanarak uygun değerler elde edilebilir.

### 3.1.5 SONUÇLARIN İRDELENMESİ

PID kontrolör parametrelerinin tespiti için kullanılabilecek birkaç metot bir önceki bölümde anlatılmıştı. Ziegler-Nichols yöntemi ve benzer metotlar, parametreleri birkaç basit formülle belirlemelerine karşın, verdikleri sonuçlar ‘kaba’ olarak nitelendirilebilir. Daha hassas bir hesap için, sistem ve kontrolör transfer fonksiyonları kullanılarak, analitik tasarım yapmak gereklidir. Bu tür hesap için ilk olarak kutup-sıfır yerleştirilmesi yolu izlendi, daha sonra da karakteristik denklem kullanıldı. Ziegler-Nichols yaklaşımı zaten yapısı gereği sadece yaklaşık sonuçlar vermektedir. Karakteristik denklem kullanılarak elde edilen parametreler ise kıyaslama olanağı vermeyecek kadar kötü bir sonuç ortaya çıkarmıştır.

Kutup-sıfır tasarımı gibi metotlar sistemin transfer fonksiyonuna ihtiyaç duyduğundan, transfer fonksiyonunun eldesindeki modelleme hataları sonuca doğrudan etki etmektedir. Modellemede hata olmasa bile, sistem üzerindeki doğrusal olmayan elemanlar hesaplanan parametrelerin gerçek sonucu vermesini engellemektedir. Tank sisteminde vana en büyük sorundur. İlk bölümde anlatıldığı



Şekil 3.9 PID parametreleri  $(K_p, K_i, K_d)=(20.7, 3, 5)$  yapıldığında sistem yanıtı

gibi histerisis şeklindeki vana davranışı, yapılan hesapların doğru sonuç vermesini engeller. Sonuç olarak, hangi tip metot kullanılırsa kullanılsın, parametreleri teker teker sistem üzerinde deneyerek karar vermek en doğrusu olacaktır. Bunun için aşım vb kriterlere göre ideal bir sistem cevabı belirlenip, elde edilen sonuçlardaki bu cevaba göre oluşan hatalar karesel ortalamaya veya başka bir kritere göre kıyaslanır, ideale en yakın sonuç veren değerler seçilir. Bu işlemler yazılacak bir program yardımıyla anında hesaplanarak hızlandırılabilir. Kutup-sıfır yerleştirme metodundan elde edilen  $(K_p, K_i, K_d)=(20.7, 3, 5)$  değerlerinin sistem üzerinde çeşitli parametre grupları kullanılarak yapılan testlerde en başarılı sonucu verdiği görülmüştür. Bu testte referans değer kelime olarak "6000", normalleştirilmiş olarak "0.21875" olarak alınmıştır. Teste ait sonuç Şekil 3.8'de verilmiştir. Sonuçta, hesaplanandan farklı olarak  $\xi > 0.63$  şeklinde daha tatmin edici bir yanıt alındığı görülmektedir.

Üzerinde çalışılan sistemin doğrusal olmaması, zamanla değişmesi, bozucu etkiler, ölçme hataları vb. birçok etken hem sistemin modellenmesinde hem de kontrolör parametrelerinin tespitinde az yada çok bir miktar hatanın oluşmasına neden olur. Bu tip etkileri en aza indirmek için değişik modellenme metotları ve farklı tipte

dayanıklılığı artırılmış kontrolörlerle çalışmak olasıdır. Buna örnek olarak sistem modeline ihtiyaç duymayan Bulanık Kontrol verilebilir. Çift Tank Sistemi üzerinde yapılan Bulanık Kontrol uygulaması bir sonraki bölümde anlatılmaktadır. Buna ek olarak adaptif ve dayanıklı kontrolör çalışmaları da yapılabilir.

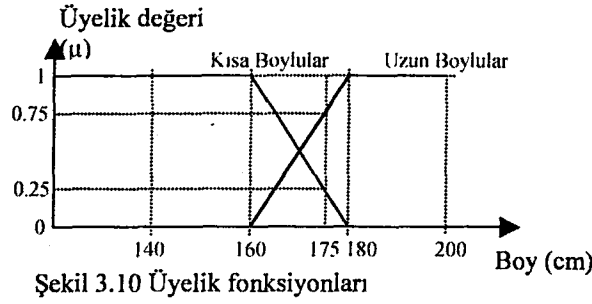
## 3.2 BULANIK KONTROL

### 3.2.1 BULANIK MANTIK

Bilindiği üzere klasik mantık kuralları “doğru” yada “yanlış”, “var” yada “yok” gibi kesin ifadeler üzerine kurulmuştur. Burada başına “Klasik” sözcüğünü ekleyerek tanımlanacak olan Kümeler Kuramı da bu şekilde işlemektedir. Bir eleman bir kümenin ya üyesidir, yada değildir, bu klasik mantıkta ya “1” yada “0” şeklinde gösterilir. Bulanık Mantık ise daha az keskin bir belirlemeyi mümkün kılar. Artık sadece “1” ve “0” değil, “1” ile “0” arasında tanımlı sayılar vardır. Bulanık Küme Teorisinde, bir elemanın bir kümeye üyelik durumu,  $[0,1]$  aralığında bir sayıyla gösterilen üyelik değeri ile belirtilir.

Kurulacak basketbol takımına boy uzunluğu ölçüt alınmak üzere oyuncu seçilecek olsun. Takıma, oyuna daha uygun oldukları için uzun boylu oyuncular alınmak isteniyor. Klasik yaklaşımla, “boyu 180 cm’den fazla olanlar uzun boyludur” diye kesin bir ifade kullanarak “Takım” kümesinin elemanları tanımlanabilir. Bulanık yaklaşımda ise, her boy uzunluğu için bir üyelik değeri belirlenir. Bu belirlemeyi “Boyu 175-180 arası olanlar 0.9 uzun boyludur” gibi ayrık biçimde yapabileceğimiz gibi, tanım kümesi boy uzunluğu, değer kümesi ise  $[0,1]$  arasında değişen bir fonksiyon kullanarak da yapabiliriz. Bu tip bir fonksiyon “Üyelik fonksiyonu” adını alır.

Verilen örnekte kullanılan uzun boylular fonksiyonu Şekil 3.10’daki gibi olabilir. Tüm Üyelik fonksiyonları gibi bu fonksiyon da birçok farklı çeşitte tanımlanabilir. Klasik yaklaşımla “boyu 180 cm’den fazla olanlar uzun boyludur” diyerek yapılan tanım da aslında basamak tip bir üyelik fonksiyonudur.



Şekil 3.10 Üyelik fonksiyonları

Şekil 3.9'da uzun boylulara ek olarak kısa boylular fonksiyonu da tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlara göre örneğin 175 cm boyundaki biri 0.75 uzun, 0.25 kısa şeklinde değerlendirilir.

Bulanık kümelere birçok örnek vermek mümkündür. Özellikle gerçek hayattaki kesin olmayan kavramları açıklamak için Bulanık Kümeleri kullanmak uygun olur.

Örneğin hava sıcaklığı için çeşitli üyelik fonksiyonları tanımlanabilir. Aynı uzun boylular fonksiyonunu tanımladığımız gibi, burada da çok sıcak, sıcak, ılık, serin, soğuk, çok soğuk gibi fonksiyonlar tanımlayabiliriz. Dikkat edilirse bu ifadeler sözle anlaşılacak şekilde yapılmaktadır.

Klasik mantıktaki gibi Bulanık mantıkta da “ve”, “veya” ve “değil” işlemlerini yapmak mümkündür. Sözle tanımlanmış iki değişkene ait (örneğin sıcak ve serin),  $f_A(x)$  ve  $f_B(x)$  gibi iki üyelik fonksiyonu olsun. Bu iki üyelik fonksiyonuna ait temel mantıksal işlemler aşağıdaki gibi tanımlanır:

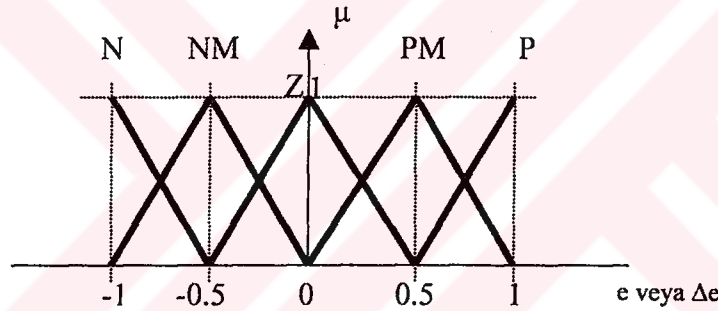
$$\begin{aligned} f_{A \text{ ve } B} &= \min(f_A(x), f_B(x)) \\ f_{A \text{ veya } B} &= \max(f_A(x), f_B(x)) \\ f_{A \text{ değil}} &= 1 - f_A(x) \end{aligned} \quad (3.26)$$

### 3.2.2 BULANIK KONTROLÖRÜN YAPISI

Bulanık kontrolörün çok çeşitli yapıları olabilir. Ne tür olursa olsun, kontrolöre “Bulanık” takısını veren şey hepsinde ortaktır: üretilecek kontrol işaretine karar veren mekanizma Bulanık Mantık ile çalışmaktadır. Bu mekanizma ise kontrolör giriş işaretlerinin üyelik fonksiyonlarına uygulanarak bulanıklaştırılması, elde edilen değerlerin yazılan kurallara uygulanarak bir sonuç elde edilmesi ve sonucun

tekrardan sürekli değerlere dönüştürülerek (durulaştırma) sisteme uygulanması şeklinde üç temel kısımda incelenebilir.

Bulanık Kontrolrlere genelde hata ve hatanın türevi giriş olarak gelir. Hata “e”, hatanın türevi ise “ $\Delta e$ ” ile gösterilsin. Kontrol çıkışında ise kontrol işareti “u” veya kontrol işaretinin değişimi “ $\Delta u$ ” üretilir. Eğer “u” üretilip doğrudan sisteme uygulanıyorsa bu tür kontrolöre F\_PD, “ $\Delta u$ ” üretilip, toplama işleminin ardından sisteme uygulanıyorsa “F\_PI” adı verilir. Kontrolrlerde yelik fonksiyonları genelde üçgen yapıda seçilir. Bu tip bir fonksiyon sol ve sağ kenarının oturduğu nokta ve tepe noktası olmak üzere üç parametre ile belirlenir. Tank sistemi için öncelikle F\_PI tipi kontrolör yazılmıştır. Kontrolöre ait üyelik fonksiyonları şekil 3.11’de gösterildiği gibi negatif anlamında “N”, orta-negatif anlamında “NM”, sıfır anlamında “Z”, orta-pozitif anlamında “PM” ve pozitif anlamında “P” şeklinde seçilmiştir.



şekil 3.11 Bulanık Kontrolör için üyelik fonksiyonları

Hata ve hatanın türevi, şekil 3.11’de verilen üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklaştırılır ve bunun sonucu her bir fonksiyonda  $[0,1]$  aralığında değer alır. Sıradaki işlem kuralların uygulanmasıdır.

Her bir değişken için 5’er adet üyelik fonksiyonu kullanıldığı için  $5 \times 5 = 25$  adet kurala ihtiyaç vardır. Bu kurallar sözle ifade edilebileceği gibi tablo olarak da verilebilir. Kurallar Tablo 3.1’de verilmiştir. Sözle ifadeye örnek olarak ilk kural “Eğer hata (e) negatif (N) ve hatanın türevi ( $\Delta e$ ) negatif (N) ise  $c=-1$ ’dir” şeklinde okunabilir. Yazılan kurallarda çıkış (c) ayrıık olarak ifade edilmiştir. Burada “c” kontrol işaretinde yapılacak değişimi göstermektedir. Kullanılan bütün değerler normalleştirilmiş olduğundan,  $c=-1$  değeri o anki kontrol işaretinin sıfıra çekilmesi gerektiğini gösterir. İleri seviyede yazılacak bulanık kontrolörler için burada bir

üyelik fonksiyonu veya üyelik fonksiyonlarının fonksiyonu da kullanılabilir. Ancak bunlar yapılırken, yazılacak kontrolör programının karmaşıklığı da gözönüne alınmalıdır.

Tablo 3.4 Bulanık Kontrolör Kural Tablosu

| e<br>$\Delta e$ | N    | NM   | Z    | PM   | P   |
|-----------------|------|------|------|------|-----|
| N               | -1   | -1   | -1   | -0.3 | 0   |
| NM              | -1   | -0.8 | -0.2 | 0    | 0.3 |
| Z               | -1   | -0.2 | 0    | 0.2  | 1   |
| PZ              | -0.3 | 0    | 0.2  | 0.8  | 1   |
| P               | 0    | 0.3  | 1    | 1    | 1   |

Kurallar sisteme ait gözlem ve tecrübelerle dayanılarak belirlenmiştir. Bunu bir örnek ile açıklamak uygun olur. Hata negatif (N) olsun. Bu halde tanktaki sıvı seviyesi referans değerin oldukça üzerinde bulunmaktadır. Hatanın türevi de negatif (N) olsun. Bu sıvı yüksekliğinin artmaya devam ettiğini gösterir. Bu halde sistemden beklenen şey vanayı tamamen kapatarak, tanka sıvı girişini durdurmaaktır. Vananın tamamen kapatılması kontrol işaretinin sıfıra çekilmesi demek olduğundan tabloda kuralın çıkışı olarak “-1” yazılmıştır.

Dikkat edilirse kurallar yazılırken “ve” işlemi kullanılmıştır. Öyleyse bir önceki bölümde anlatıldığı üzere  $\min(\text{hatanın üyelik değeri}, \text{hatanın türevinin üyelik değeri})$  şeklinde çıkarım uygulanmalıdır. Elde edilen değer o kuralın ateş gücü ( $w$ ) olarak tanımlanır. Diyelim ki hata 0.375 ve hatanın türevi 0.25 olsun. Bu durumda Şekil 3.11’e göre, hata için  $PM(0.375)=0.75$ ,  $Z(0.375)=0.25$  ve hatanın türevi için  $PM(0.25)=0.5$ ,  $Z(0.25)=0.5$  olduğu görülür. Diğer üyelik fonksiyonları ilgili değerler

için “0” olmaktadır. Bu durumda tabloda her iki değişkene ait PM ve Z fonksiyonlarının kesiştiği 4 adet kural geçerli haldedir. Çıkarımı açıklamak için türevin Z, hatanın PM olduğu kural seçilsin. Kuralın ateş gücü şu şekilde bulunur:

$$w = \min\{PM(0.375), Z(0.25)\} = \min(0.75, 0.5) = 0.5 \quad (3.27)$$

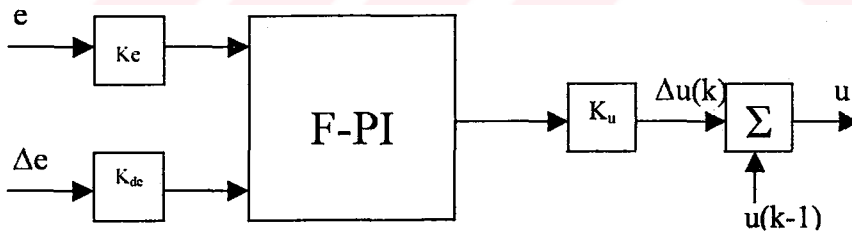
Daha sonra her bir kuralın ateş gücü, o kurala ait “c” değeriyle çarpılır ve elde edilen değerler toplanır. Sonuç ateş güçleri toplamına bölünür:

$$w = \frac{w_1 c_1 + \dots + w_{25} c_{25}}{w_1 + \dots + w_{25}} \quad (3.28)$$

Böylece Bulanık Mantık Mekanizması’nın 3. aşaması da tamamlanmış olur. Sonuçta Bulanık Mantık kullanılarak hata ve hatanın türevine göre bir kontrol işareti üretilmiş oldu.

### 3.2.3 BULANIK KONTROLÖRÜN PROGRAMLANMASI

Sistem için Şekil 3.12’de gösterilen kontrol yapısı programlanmıştır. Hatanın türevi, (3.15)’deki gibi bir önceki hata değeriyle fark alınarak hesaplanmıştır. Kontrolörün giriş ve çıkışları üzerinde ölçekleme çarpanı olarak tanımlanan kazanç elemanları



Şekil 3.12 Bulanık Kontrolörün yapısı

kullanılmıştır. Bu sayede, işaretlerin ölçek aralığı değiştirilerek kontrolörün ayarlanması sağlanır. Örneğin normalleştirilmiş hata işareti yaklaşık  $[-0.25, 0.25]$  aralığında değerler alabildiğinden,  $K_e$  kazancı 3 veya 4 yapılarak bu aralığın  $[-1, 1]$  ölçeğine genişletilmesi sağlanabilir. Böylece hata işareti tüm üyelik fonksiyonları ile değerlendirilebilir.

F-PI şeklinde ifade edilen Bulanık Mantık yapısı, hata ve türeve göre kontrol işaretinde yapılacak değişimi çıkış olarak vermektedir (c). Bu değer  $K_u$  ölçekleme

çarpanı ile çarpılarak  $\Delta u$  elde edilir. Sonraki aşamada ise  $\Delta u$ , üretilmekte olan kontrol işareti ( $u$ ) ile toplanır ve sisteme verilir. Bu işlem kontrolörün integral kısmını oluşturur.

Üyelik fonksiyonları için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır. Üçgen yapılı olanlar sağ-sol (R ve L) şeklinde ikiye ayrılmış, gelen işaretin değerine göre karşılaştırma yapılarak uygun olan fonksiyon seçilmiştir:

$$\begin{aligned}
 \mu_N &= N(e) = -2e - 1 \\
 \mu_{NML} &= NML(e) = 2e + 2 \\
 \mu_{NMR} &= NMR(e) = -2e \\
 \mu_{ZL} &= ZL(e) = 2e + 1 \\
 \mu_{ZR} &= ZR(e) = -2e + 1 \\
 \mu_{PML} &= PML(e) = 2e \\
 \mu_{PMR} &= PMR(e) = -2e + 2 \\
 \mu_P &= P(e) = 2e - 1
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Bulanık kontrolör programı EK-D'e verilmiştir.

Bulanık kontrolörde programlama işlemi tamamlanıp, kontrolör sisteme uygulandıktan sonra sıra kontrolörün istenilen başarımlar ölçütlerine göre ayarlanmasına gelir. Bir kontrolörün sistem üzerindeki başarımlar, aşım yüzdesi, yükselme zamanı ve salınım yüzdesi baz alınarak gösterilebilir. Yükselme zamanı, sistem çıkışının 0'dan sürekli hal değerinin %90'nına ulaştığı ana kadar geçen süredir. Aşım ise sistem yanıtının ilk tepesinin genliğinin referans işarete göre yüzde (%) değeridir. Salınım yüzdesi ise ikinci tepenin referansa göre yüzdesi olarak tanımlanabilir. Bunlara ek olarak sürekli hal hatası da kullanışlı bir başarımlar ölçütüdür.

Başarımların istenilen düzeye getirilmesi için bulanık kontrolörde başlıca şu ayarlar yapılabilir:

- Üyelik fonksiyonlarının (üçgen) her üç parametresini de değiştirmek
- Üyelik fonksiyonlarının sadece bir parametresinin değiştirmek
- Kuralları değiştirmek

- Ölçekleme çarpanlarını değiştirmek

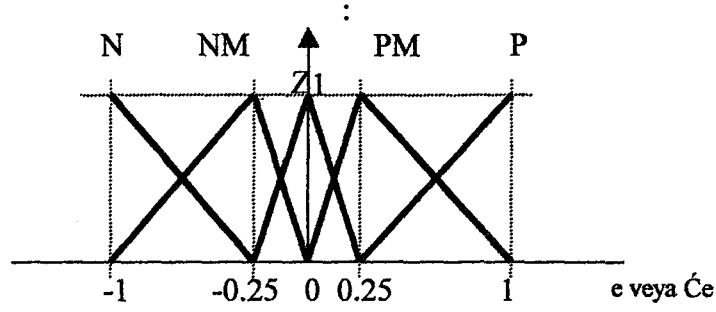
Bu yöntemlerden en kolayı ve en çok kullanılanı ölçekleme çarpanlarını değiştirmektir.  $F_{PI}$  için bunlar  $K_e$ ,  $K_{de}$  ve  $K_u$ 'dur. Bu yol kolay olduğu kadar da etkili bir yoldur. Temelde bu tip bir ayar için iki kural verilebilir:

1. Sistem yanıtı istenilenden yavaşsa hatanın etkisini artır ( $K_e$ )
2. Aşım ve salınım yüzdesi istenilenden fazlaysa hatanın türevinin etkisini artır ( $K_{de}$ )

Eğer ölçekleme çarpanları değiştirilerek istenilen başarımlar elde edilemiyorsa diğer ayarlamalara geçilir. Çift Tank Sistemi için  $F_{PI}$  kontrolör için ölçekleme çarpanlarının değiştirilmesi ile istenilen kalitede başarımlar elde edilememiş, bu nedenle kural tablosu değiştirilmiştir. Ayrıca sistem yanıtının sürekli halde referans işaret civarında %10 düzeyini geçmeyen salınımlar şeklinde olduğu görüldüğünden, üyelik fonksiyonlarında sıfıra yakın kısımlarda değişiklik yapılması uygun bulunmuştur. Yeni kural tablosu Tablo 3.2'de, üyelik fonksiyonları ise Şekil 3.13'de görülmektedir.

Tablo 2.5 Yeni kural tablosu

| e          |      |      |      |      |     |
|------------|------|------|------|------|-----|
| $\Delta e$ | N    | NM   | Z    | PM   | P   |
| N          | -1   | -1   | -0.7 | -0.1 | 0   |
| NM         | -1   | -0.8 | -0.3 | 0    | 0.1 |
| Z          | -1   | -0.5 | 0    | 0.5  | 1   |
| PZ         | -0.1 | 0    | 0.3  | 0.8  | 1   |
| P          | 0    | 0.1  | 0.7  | 1    | 1   |

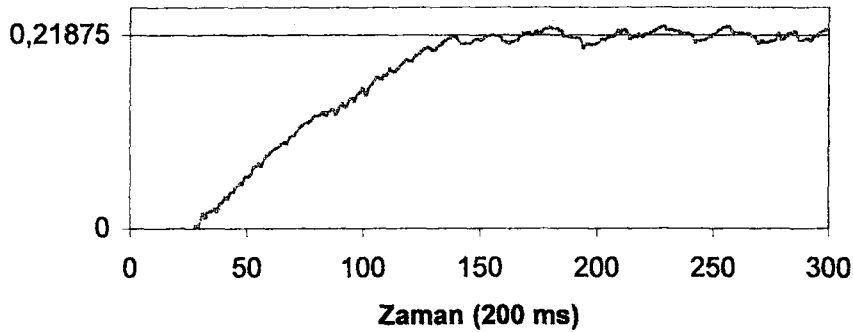


Şekil 3.13 Bulanık Kontrolör için yeni üyelik fonksiyonları

Yeni üyelik fonksiyonlarının programlamada kullanılan denklemleri ise şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
 \mu_N &= N(e) = -1.34e - 0.34 \\
 \mu_{NML} &= NML(e) = 1.34e + 1.34 \\
 \mu_{NMR} &= NMR(e) = -4e \\
 \mu_{ZL} &= ZL(e) = 4e + 1 \\
 \mu_{ZR} &= ZR(e) = -4e + 1 \\
 \mu_{PML} &= PML(e) = 4e \\
 \mu_{PMR} &= PMR(e) = -1.34e + 1.34 \\
 \mu_P &= P(e) = 1.34e - 0.34
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

F\_PI tipi kontrolörde yapılan değişiklik sonrası tekrardan ölçekleme çarpanları ayarlanarak başarımlar artırılmaya çalışılmıştır. Sonuçta  $(K_e, K_{de}, K_u) = (4.4, 1, 5.7)$  yapıldığında Şekil 3.14'deki sistem cevabı elde edilmiştir.



Şekil 3.14 Bulanık kontrolör kullanıldığında sistem yanıtı

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Çift Tanklı Sıvı Sistemi'nde yapılması hedeflenen seviye kontrolü başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Gerçek bir sistem üzerinde yapılan uygulamalı bir çalışma, kağıt üzerinde yapılan teorik çalışmalar ve sanal bilgisayar benzetimlerinden tamamen farklı bir yapı gösterir. Teorik çalışma yapmadan, matematik kullanmadan mühendislik olmaz. Ancak gerçek sistemler hiçbir zaman ideal olmadığından, çalışma sırasında çoğunlukla hesapta olmayan sorunlarla karşılaşılır. Örneğin, bir sistemi oluşturan elemanlar ideal değildir ve belli sınırlar dahilinde çalışır, bu da kağıt üstünde doğru yapılan hesabın pratikte yanlış çıkmasına neden olabilir. Bu bağlamda çalışma, Çift Tank Sistemi hakkında ilk göz temasının gerçekleştiği sıfır anından, kontrol işleminin başarılı olarak gerçekleştirilmesine kadar bütün olarak bir uygulama örneği oluşturmaktadır.

Bir sistemi kağıt üzerinde ifade edebilmek için o sisteme ait bir modele ihtiyaç vardır. Ancak modelin eldesinden sonra sistem üzerinde teorik hesaplar yapılabilir. Ancak sistem ne kadar iyi modellenirse modellensin, kağıt üzerinde görülen yapının gerçek sistemi ancak belli bir oranda doğru olarak temsil edeceği akıldan çıkarılmamalıdır. Üstelik sistemdeki en ufak değişiklik bile modelin değişmesine neden olacaktır. Örneğin Tank Sistemi'nde vanaların konumlarının değiştirilmesi, sisteme ait besleme basıncının değişmesi, kullanılan sıvının niteliği, hava basıncı ve sıcaklığı gibi etmenler sistem yapısını etkiler. Ayrıca modelin eldesi için sisteme ait bazı verilerin ölçülmesi de gerekeceğinden, ölçüm sırasında oluşacak bir takım hatalar da sistem modelini değiştirecektir. Bu durumda, temel amaç seviye kontrolü olduğu için bu tip değişikliklere dayanıklı kontrolör tasarımı üzerinde durulmalıdır.

Sistemin kontrolü için öncelikle uygulanan Aç-Kapa kontrolün yeterli düzeyde başarımlı sağladığı görülmüştür. Ancak vananın sürekli açılıp kapanması, kompresör havasını bitirmektedir. Kontrolör başarımlı oldukça iyidir, bu nedenle olumsuz yön olarak ancak maliyet artışından söz edilebilir. İkinci aşamada ise bir endüstriyel

standart haline gelmiş olan PID tip kontrolör kullanılmıştır. Burada sorun, PID kontrolörün parametrelerinin nasıl doğru olarak elde edilebileceğidir. Sistem modelinden yararlanılarak birkaç farklı yolla parametreler tespit edilmiştir. Ancak sonuçta, PID kontrolör için en uygun parametre grubu deneysel yolla bulunabilmiştir.

Sisteme, ikinci bir kontrol yapısı olarak matematiksel bir sistem modeli gerektirmeyen Bulanık Kontrol uygulanmıştır. Bulanık Kontrolörden istenilen hassasiyette bir sonuç elde etmek için, PID'den farklı olarak, ayar parametrelerinin doğru tespiti yanında doğru kontrolör yapısının da seçilmesi gerekmektedir. Bu açıdan Bulanık Kontrolörde PID kontrolör kadar başarımlı sağlanamamıştır.

Çalışmada kullanılan Sistem Tanıma ve Bulanık Kontrolör Tasarımı gibi konular başlı başına birer çalışma alanıdır. Bu nedenle, bu çalışma sadece bir uygulama örneği durumundadır. Sistemi birçok farklı metotla modellemek hatta farklı çalışma noktaları için birden fazla model kullanmak bile mümkündür. Kontrol aşamasında ise farklı kontrolör yapıları ve tasarım metotları gündeme gelebilir. Kontrolör parametrelerini sistemden elde edilen verilere göre anlık olarak değiştiren adaptif yapılar da kullanılabilir. Ayrıca Bulanık Kontrolörün farklı tasarımları, hatta yapay sinir ağları ve PID ile kurulan melez yapılarla da çalışmak mümkündür.

## **KAYNAKLAR**

- Åström, K., Hägglund T.**, 1995. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America, New York
- Harold, W. L. III**, 1997. The Foundations of Fuzzy Control, Plenum Press, Newyork
- Işık, C.**, 1997. Sayısal Analiz Ders Notları
- Kurtulan, S.**, 1999. PLC ile Endüstriyel Otomasyon, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Kurtulan, S.**, 2001. PLC ile Endüstriyel Otomasyon, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Ogata, K.**, 1987. Discrete-Time Control Systems, pp. 856-867, Prentice Hall, London
- Özcan, F., Işıl, Ş., Kırıcı A.**, 1986. Pnömatik Akışkan Gücü, Mert Eğitim Yayınları, İstanbul
- Söderström, T., Stoica, P.**, 1989. System Identification, Prentice Hall, New York.
- Tanaka, K.**, 1997. An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications, Springer-Verlag, New York.

## EK-A

Programlanırlı Lojik K ntrol r (Programmable Logic Controller: PLC), endüstriyel otomasyon sistemlerinin kumanda ve kontrol devrelerini gerçeklemeye uygun yapıda giriş-çıkış birimleri ve iletişim arabirimleri ile donatılmış, kontrol yapısına uygun bir sistem programı altında çalışan endüstriyel bir bilgisayardır. Bu tez bünyesinde, Siemens firmasının Simatic S7-200 CPU 214 PLC cihazı kullanılmıştır. Tank Sistemi ile bağlantı EM 235 Analog giriş-çıkış birimi üzerinden sağlanmıştır.

S7-200 cihazının programlanma işlemi için bir kişisel bilgisayar üzerinde  alışan Step 7 – Microwin 3.0 programından yararlanılmıştır.

Belirli bir periyotla  rnekleyerek, sisteme işaret uygulama ve sistem çıkışını okuma işlemi için 5-255 ms aralıkla çalışabilen zamana bağlı kesme özelliği kullanılmıştır. Bu  rnek anlarında sisteme uygulanan giriş değerleri ve sistemden okunan değerler işaretçiler kullanılarak cihazın RAM belleğine kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler, Step 7 yazılımı üzerinden okunmuş, tablo haline getirilip uygun şekilde formatlanarak Microsoft Excel'e aktarılmıştır.

Bölüm 2.2.4.3'de anlatılan sistem tanıma deneyindeki sinüs işaretleri, sinüsün seriye açılmış halinden yararlanılarak üretilmiştir:

$$\sin\left(x \cdot \frac{\pi}{t_{son}}\right) = x \cdot \frac{\pi}{t_{son}} - \frac{1}{6} \left(x \cdot \frac{\pi}{t_{son}}\right)^3 + \frac{1}{120} \left(x \cdot \frac{\pi}{t_{son}}\right)^5 - \frac{1}{5040} \left(x \cdot \frac{\pi}{t_{son}}\right)^7, x \in (0, \pi) \quad (A.1)$$

İfadede  $t_{son}$  sinüsün yarı periyot değeridir,  $x \in (0, \pi)$  durumunda  $\pi$ 'ye karşı gelir. (A.1) açılımı sadece sinüsün ilk yarı periyodu için geçerli olduğundan, işaretin negatif hale geldiği ikinci periyodun üretilmesi için ilk periyodun tersi alınmıştır. Ayrıca, sisteme uygulanan giriş hiçbir zaman negatif olamayacağından (vananın girişi), sinüsün negatif değerlerinin yok edilmesi için işaretin sabit bir sayıyla toplanması gerekmiştir.

Sistem tanıma deneyi ve tek-çift tank sistemi için basamak yanıtların elde edilmesi için PLC'de yazılan program aşağıda verilmiştir.

Sistem tanıma deneyi programı:

```
//ANA PROGRAM
LD  I0.1
EU

MOVB 200, SMB34
ATCH 0, 10
ENI

MOVD +0, VD0

MOV  +0, VD4
MOV  +0, VD8
MOV  +0, VD12
MOV  +0, VD16
MOV  +0, VD20
MOV  +0, VD24

FILL +0, VW100, 200
```

MOVD &VB100, VD96 //VD96  
// AIW0'IN ISARETCISI

MOVD &VB3000, VD2996  
//BELLEKTEKİ SINUSUN ISARETCISI

MOVD &VB2000, VD1996  
//SINUSLER TOPLAMININ KAYIT  
ISARETCISI  
LD I0.5  
R Q0.0, 1  
MOVW +3200, AQW0  
DISI  
//KESME ALT PROG

NETWORK 1  
LDD= VD0, +8000 //TSON/4  
ZAMANI  
FILL +0, VW0, 12  
MOVD +200, VD0

LD SM0.0  
DTR VD0, VD0  
DTR VD4, VD4  
DTR VD8, VD8  
DTR VD12, VD12  
DTR VD16, VD16  
DTR VD20, VD20  
DTR VD24, VD24

MOVR VD0, VD4  
\*R 3.142, VD4  
/R 8000.0, VD4 //TSON/4  
ZAMANI  
\*R 8000.0, VD4

MOVR VD0, VD8  
\*R 3.142, VD8  
/R 8000.0, VD8 //TSON/4  
ZAMANI  
MOVR VD8, VD20  
\*R VD8, VD20  
\*R VD8, VD20  
MOVR VD20, VD8  
/R 6.0, VD8  
\*R 8000.0, VD8

MOVR VD0, VD12  
\*R 3.142, VD12  
/R 8000.0, VD12 //TSON/4  
ZAMANI  
MOVR VD12, VD20  
\*R VD12, VD20  
\*R VD12, VD20  
\*R VD12, VD20  
\*R VD12, VD20  
MOVR VD20, VD12  
/R 120.0, VD12  
\*R 8000.0, VD12

MOVR VD0, VD16  
\*R 3.142, VD16  
/R 8000.0, VD16 //TSON/4  
ZAMANI

MOVR VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
\*R VD16, VD20  
MOVR VD20, VD16  
/R 5040.0, VD16  
\*R 8000.0, VD16

-R VD8, VD4  
+R VD12, VD4  
-R VD16, VD4

//SINUS BINDIRILIYOR:  
+R 8000.0, VD4

//TSON/2'DEN SONRA SINÜS ÇUKURU:  
LD Q0.0  
\*R -1.0, VD4  
+R 16000.0, VD4

LD SM0.0  
TRUNC VD0, VD0  
TRUNC VD4, VD4  
TRUNC VD8, VD8  
TRUNC VD12, VD12  
TRUNC VD16, VD16  
TRUNC VD20, VD20  
TRUNC VD24, VD24

LDD= VD0, +7900  
S Q0.0, 1

LD SM0.0  
+D +100, VD0

//SİSTEM ÇIKISININ ALINMASI:  
//MOVW VW6, AQW0  
//"SİSTEMİN GİRİŞ İŞARETİ"  
//MOVW AIW0, \*VD96  
//INCD VD96  
//INCD VD96

//İKİ SINUSUN TOPLANIP ÇIKIŞA  
VERİLMESİ(BİRİ ONLINE ÜRETİLİYOR,  
DİĞERİ BELLEKTEN)  
+I \*VD2996, VW6  
MOVW VW6, AQW0

//AIW0 KAYDEDİLİYOR:  
MOVW AIW0, \*VD96  
INCD VD96  
INCD VD96

//2.SINUSUN BİR SONRAKİ OKUMASI  
İÇİN İSARETCİ İLERLETİLİYOR:  
INCD VD2996  
INCD VD2996

//SINUSLER TOPLAMININ  
KAYDEDİLMESİ  
MOVW VW6, \*VD1996  
INCD VD1996  
INCD VD1996

Sistemlerin basamak yanıtlarına ilişkin

program:

//ANA PROGRAM

NETWORK 1  
LD I0.1  
EU

MOVW +32000, AQW0  
//BİRİM BASAMAK GENLİĞİ  
MOVB 200, SMB34  
ATCH 0, 10  
ENI  
FILL +0, VW100, 200  
MOVD &VB100, VD96  
LD I0.5  
MOVW +3200, AQW0

//KESME ALT PROG

NETWORK 1  
LD SM0.0  
MOVW AIW0, \*VD96  
INCD VD96  
INCD VD96

## EK-B

En Küçük Kareler Yönteminin uygulanması için sistem giriş-çıkış değerlerini içeren bir takım matrislerin yazılması gereklidir. Bu matrisler, sistem çıkış matrisi  $y(k)$  ve seçilen modele göre giriş-çıkış değerlerini içeren katsayılar matrisidir (2.2.4.1) bölümünde “A” matrisi olarak ifade edilmişti). Önerilen model yapısı:

$$y(k) = b_1 \cdot u(k-1) + b_2 \cdot u(k-2) + a_1 \cdot y(k-1) - a_2 \cdot y(k-2) \quad (B.1)$$

şeklinde olduğundan, katsayılar matrisinin sütunları da sırayla  $u(k-1)$ ,  $u(k-2)$ ,  $y(k-1)$  ve  $y(k-2)$ 'yi içeren değerler olacaktır. Sistem üzerine uygulanan deney, matematiksel olarak  $k=0$  anında başladığından, bu an için matrise yazılması gereken  $(k-1)$  ve  $(k-2)$ 'inci giriş-çıkış değerleri tanımsız olmaktadır. İlk koşullar sıfır kabul edilirse, bu değerler sıfır olarak da alınabilir. Ancak burada hesap işlemini  $k=2$  anından başlatarak matematiksel olarak sorun yaratmamak daha uygun olacaktır. Bu nedenle matrisler 156 yerine 154 satır olarak kullanılmıştır.

Matrisleri oluşturacak veriler, önce Excel'de düzenlenmiş, daha sonra Matlab ortamına aktarılmıştır. Katsayılar matrisi A,  $154 \times 4$ ; çıkış vektörü Y,  $154 \times 1$  ve parametreler vektörü  $4 \times 1$  boyutunda olmak üzere Matlab'da sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılmıştır:

1.  $A' * A \rightarrow A$  matrisinin satırlarıyla sütunlarını yer değiştirip (transpoze), oluşan matrisi tekrar A ile çarp.
2.  $inv(ans) \rightarrow$  Bir önceki işlemin sonucunda oluşan matrisin tersini al.
3.  $ans * A' \rightarrow$  Bir önceki işlemin sonucu ile A'nın transpozisini çarp.
4.  $ans * Y \rightarrow$  Bir önceki işlem sonucu ile Y matrisini çarp.

Son işlemten sonra oluşan sonuç aradığımız parametreler vektörüdür. Yapılan işlemler toplu olarak aşağıdaki gibi de ifade edilebilir:

$$inv(A' * A) * A' * Y \quad (B.2)$$

İşlemler hesap sonuçlarının daha hassas olması beklentisiyle normalleştirilmemiş değerler üzerinden yapılmıştır.

Sistem üzerinde yapılan deney sonucu elde edilmiş olan ve daha sonra yukarıdaki hesaplarda kullanılan katsayılar matrisi, çıkış vektörü ve sonuçta elde edilen parametreler vektörüne ait ilk 10 değer örnek olması açısından aşağıda Tablo B.1'de verilmiştir. Sistem tanıma deneyinde normalize değerler yerine doğrudan kelime

karşılıkları kullanılmıştır. Matrisleri oluşturan değerler aynı zamanda Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'yi oluşturan değerlerdir.

Tablo B.1 Sistem tanıma deneyinde kullanılan matrisler

| Katsayılar Matrisi (A) |          |          |          | Çıkış Vektörü |
|------------------------|----------|----------|----------|---------------|
| $u(k-1)$               | $u(k-2)$ | $y(k-1)$ | $y(k-2)$ | $y(k)$        |
| 16941                  | 16000    | 3168     | 3168     | 3168          |
| 17878                  | 16941    | 3176     | 3168     | 3176          |
| 18807                  | 17878    | 3168     | 3176     | 3168          |
| 19723                  | 18807    | 3176     | 3168     | 3176          |
| 20621                  | 19723    | 3160     | 3176     | 3160          |
| 21499                  | 20621    | 3192     | 3160     | 3192          |
| 22351                  | 21499    | 3184     | 3192     | 3184          |
| 23174                  | 22351    | 3104     | 3184     | 3104          |
| 23965                  | 23174    | 3176     | 3104     | 3176          |
| 24718                  | 23965    | 3184     | 3176     | 3184          |

## EK C

Burada (3.15) ifadesindeki gibi P, I ve D yapılarının ayrı ayrı hesaplanıp, sonradan toplandığı yapıda yazılan PID kontrolör programı açıklamalarıyla verilmiştir. Program yazılırken, türev (D) teriminde hata  $e(k)$  terimi yerine çıkış  $y(k)$  kullanılmıştır. Çıkış işareti de 14000-32000 aralığına ölçeklenerek sisteme verilmiştir. Tüm değerler önce  $[0,1]$  aralığına normalleştirilmiş, hesaplar bu şekilde yapılmıştır. Programda kullanılan semboller ve karşılıkları aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo C.1: Kontrolör programında kullanılan semboller ve karşılıkları

| Sembol   | Karşılığı       | Bellek Alanı | Açıklama                                                  |
|----------|-----------------|--------------|-----------------------------------------------------------|
| UKN      | -               | VD100        | $[0,1]$ normalize $u(k)$ değeri                           |
| UK1      | $u(k-1)$        | VD104        | -                                                         |
| YK       | $y(k)$          | VD108        | AIW0'dan okunan sistem çıkışı, geri besleme ifadesi       |
| YK1      | $y(k-1)$        | VD112        | -                                                         |
| YK2      | $y(k-2)$        | VD116        | -                                                         |
| EK       | $e(k)$          | VD120        | $[0,1]$ normalize Hata işareti                            |
| EK1      | $e(k-1)$        | VD124        | -                                                         |
| K        | K               | VD128        | Oransal Kontrol parametresi                               |
| KI       | $K_i$           | VD132        | İntegral Kontrol parametresi                              |
| KD       | $K_d$           | VD136        | Türev Kontrol parametresi                                 |
| T        | T               | VD140        | Örnekleme periyodu (200 ms)                               |
| ACC0     | -               | VD144        | Yapay akümülatör                                          |
| ACC1     | -               | VD148        | Yapay akümülatör                                          |
| ACC2     | -               | VD152        | Yapay akümülatör                                          |
| YREF     | $Y_{ref}$       | VD156        | Referans sıvı yüksekliği değeri                           |
| YKN      | -               | VD160        | $[0,1]$ normalize sistem çıkışı                           |
| YREFN    | -               | VD164        | $[0,1]$ normalize referans değeri                         |
| UP       | $u_p(k)$        | VD168        | -                                                         |
| UI       | $u_i(k)$        | VD172        | -                                                         |
| UD       | $u_d(k)$        | VD176        | -                                                         |
| UI1      | $u_i(k-1)$      | VD180        | Önceki anlara ait integral terimlerinin toplamı           |
| YKN1     | -               | VD184        | $[0,1]$ normalize bir önceki ana ait sistem çıkışı        |
| UPARTIUD | $u_p(k)+u_d(k)$ | VD188        | İntegral düzeltmesi için kullanılmaktadır                 |
| UK       | $u(k)$          | VD192        | Çift Kelime (DW) halinde sistem çıkışı (reel sayı değil)  |
| UKW      | -               | VW194        | UK'nın çıkışı verilmesi için ikinci kelimesi kullanılıyor |
| ACC0W    | -               | VW146        | -                                                         |
| ACC1W    | -               | VW150        | -                                                         |

//ANA PROGRAM

LD SM0.1  
CALL 0

LD I1.5 // 11.5, acil durumlarda su akışının kesilmesi içindir.  
EU  
MOVW +0 AQW0  
DISI  
LD I0.1 // 10.1, su akışına dışardan müdahale edilmesini  
EU //sağlamaktadır.  
MOVW +32000 AQW0

// 0 NOLU ALT PROGRAM SBR0

LD SM0.0 // Burada 200 ms periyotlu zaman kesmesi tanımlanıyor  
MOVB 200 SMB34  
ATCH 0 10

FILL +0 VW100 50// Programda kullanılacak bellek aralığı sıfırlanıyor

MOVR 20.0 "K" // K, Ki, Kd PID parametreleri, referans su yüksekliği  
MOVR 3.0 "KI" // ilk değeri ve örnekleme periyodu değeri yükleniyor.  
MOVR 5.0 "KD"  
MOVR 6000.0 "YREF"  
MOVR 0.2 "T"

MOVR "YREF" "YREFN" // [0,1] normalleştirilmesi yapılıyor  
/R 800.0 "YREFN"  
/R 16.0 "YREFN"  
-R 0.25 "YREFN"

LD SM0.0 // Zaman kesmesi aktif hale getiriliyor  
ENI

// 0 NOLU ZAMANA BAĞLI KESME ALT PROGRAMI

LD SM0.0 // Hesap için bellek gözleri sıfırlanıyor  
XORD "ACC0" "ACC0"  
XORD "ACC1" "ACC1"  
XORD "ACC2" "ACC2"  
XORD "UPARTIUD" "UPARTIUD"  
XORD "UP" "UP"  
XORD "UI" "UI"  
XORD "UD" "UD"  
XORD "EK" "EK"  
XORD "YKN" "YKN"  
XORD "YK" "YK"  
XORD "UKN" "UKN"  
XORD "UK" "UK"

MOVW AIW0 "ACC0W" // Y(k) değeri okunuyor (AIW0 analog girişinden)  
DTR "ACC0" "YK" // ve normalleştiriliyor  
MOVR "YK" "YKN"  
/R 800.0 "YKN"  
/R 16.0 "YKN"  
-R 0.25 "YKN"

MOVR "YREFN" "EK" // Hata işareti e(k) elde ediliyor  
-R "YKN" "EK"

```

MOVR "EK" "UP"           //  $u_p(k)$  elde ediliyor
*R "K" "UP"

MOVR "YKN" "UD"          //  $u_d(k)$  elde ediliyor
-R "YKN1" "UD"
*R "KD" "UD"
/R "T" "UD"

MOVR "EK" "UI"           //  $u_i(k)$  elde ediliyor
+R "EK1" "UI"
/R 2.0 "UI"
*R "KI" "UI"
*R "T" "UI"
+R "UI1" "UI"
MOVR "UI" "UI1"

MOVR "EK" "EK1"          // Hata ve çıkış bir sonraki hesapta kullanılmak için saklanıyor
MOVR "YKN" "YKN1"

+R "UP" "UKN"             //  $u(k)$  elde ediliyor
+R "UI" "UKN"
+R "UD" "UKN"

LDR>= "UKN" 1.0           // Integral Yığılması tespit edilip, önleniyor
MOVW +32000 AQW0
//
+R "UP" "UPARTIUD"
+R "UD" "UPARTIUD"
//
MOVR 1.0 "UI1"
-R "UPARTIUD" "UI1"
JMP 1

LDR<= "UKN" 0.0           // Integral Yığılması tespit edilip, önleniyor
MOVW +0 AQW0
//
+R "UP" "UPARTIUD"
+R "UD" "UPARTIUD"
//
*R -1.0 "UPARTIUD"
MOVR "UPARTIUD" "UI1"
JMP 1

LD SM0.0                  //  $u(k)$  14000-32000 aralığına ölçeklenerek çıkışa veriliyor
DTR "UK" "UK"
MOVR "UKN" "UK"
*R 32000.0 "UK"
*R 0.5625 "UK"
+R 14000.0 "UK"
TRUNC "UK" "UK"
MOVW "UKW" AQW0

LBL 1

```

## EK D

Bulanık kontrolöre ait PLC programı aşağıda verilmiştir. Aynı program küçük bir değişiklikle hem F\_PI hem de F\_PD tipi kontrolör için kullanılabilir. Bu fark sadece kontrolör çıkışının bir önceki kontrol işareti ile toplanması durumudur. F\_PD’de toplama yapılmaz, işaret doğrudan sistem girişine uygulanır.

### //ANA PROGRAM

```
LD SM0.1
CALL 0
```

```
LD I1.5
EU
MOVW +0, AQW0
DISI
LD IO.1
EU
MOVW +32000, AQW0
```

### //SBR 0 ----- 0 NOLU ALT PROGRAM

```
////// 200 ms ZAMAN KESMESİ:
LD SM0.0
MOVB 200, SMB34
ATCH 0, 10
```

```
////// VD 996 SİSTEM ÇIKIŞININ KAYDI
//////İÇİN İŞARETÇİ OLARAK
//////KULLANILIYOR:
LD SM0.0
MOVD &VB1000, VD996
```

```
LD SM0.0
FILL +0, VW100, 50
```

### ////// PARAMETRELER YÜKLENİYOR:

```
LD SM0.0
MOVR 3.0, "SCLFACP"
MOVR 1.0, "SCLFACI"
MOVR 2.0, "SCLFACD"
MOVR 6000.0, "YREF"
MOVR 0.2, "T"
```

### ////// KESMELELER SERBEST HALE

### //////GETİRİLİYOR:

```
LD SM0.0
ENI
```

### //INT 0 ----- 0 NOLU KESME ALT PROGRAMI

### ////// XORD İLE SIFIRLAMA İŞLEMİ:

```
LD SM0.0
XORD "ACC0", "ACC0"
XORD "ACC1", "ACC1"
XORD "UPARTIUDN", "UPARTIUDN"
XORD "EKNSCL", "EKNSCL"
XORD "UIN", "UIN"
XORD "EKDNSCL", "EKDNSCL"
XORD "EKN", "EKN"
XORD "YKN", "YKN"
XORD "YK", "YK"
XORD "UKN", "UKN"
XORD "UK", "UK"
XORD "WTOP", "WTOP"
XORD "WCTOP", "WCTOP"
```

### ////// SİSTEM ÇIKIŞI KAYDEDİLİYOR:

```
LD SM0.0
MOVW AIW0, *VD996
INCD VD996
INCD VD996
```

### ////// NORMALİZE SİSTEM ÇIKIŞI:

```
LD SM0.0
MOVW AIW0, "ACC0W"
DTR "ACC0", "YK"
MOVR "YK", "YKN"
/R 800.0, "YKN"
/R 16.0, "YKN"
-R 0.25, "YKN"
```

### ////// REFERANS İŞARET NORMALİZE:

```
LD SM0.0
MOVR "YREF", "YREFN"
/R 800.0, "YREFN"
/R 16.0, "YREFN"
-R 0.25, "YREFN"
```

### ////// HATANIN ELDE EDİLMESİ:

```
LD SM0.0
MOVR "YREFN", "EKN"
```

-R "YKN", "EKN"

////// "K<sub>e</sub>" ÖLÇEKLEMESİ:

LD SM0.0

MOVR "EKN", "EKNSCL"

\*R "SCLFACP", "EKNSCL"

////// "K<sub>de</sub>" ÖLÇEKLEMESİ:

LD SM0.0

MOVR "EKN", "EKDNSCL"

-R "EKN1", "EKDNSCL"

\*R "SCLFACD", "EKDNSCL"

/R "T", "EKDNSCL"

//HATAYA AIT ÜYELİK DEĞERLERİ  
HESAPLANIYOR:

LDR<= "EKNSCL", 1.0

AR>= "EKNSCL", 0.5

//

MOVR "EKNSCL", "MUE\_P"

\*R 2.0, "MUE\_P"

+R -1.0, "MUE\_P"

//

MOVR "EKNSCL", "MUE\_PM"

\*R -2.0, "MUE\_PM"

+R 2.0, "MUE\_PM"

//

MOVR 0.0, "MUE\_Z"

MOVR 0.0, "MUE\_NM"

MOVR 0.0, "MUE\_N"

//

JMP 1

//////////

LDR<= "EKNSCL", 0.5

AR>= "EKNSCL", 0.0

MOVR "EKNSCL", "MUE\_PM"

\*R 2.0, "MUE\_PM"

MOVR "EKNSCL", "MUE\_Z"

\*R -2.0, "MUE\_Z"

+R 1.0, "MUE\_Z"

MOVR 0.0, "MUE\_P"

MOVR 0.0, "MUE\_NM"

MOVR 0.0, "MUE\_N"

JMP 1

//////////

LDR<= "EKNSCL", 0.0

AR>= "EKNSCL", -0.5

MOVR "EKNSCL", "MUE\_Z"

\*R 2.0, "MUE\_Z"

+R 2.0, "MUE\_Z"

MOVR "EKNSCL", "MUE\_NM"

\*R -2.0, "MUE\_NM"

MOVR 0.0, "MUE\_P"

MOVR 0.0, "MUE\_PM"

MOVR 0.0, "MUE\_N"

JMP 1

//////////

LDR<= "EKNSCL", -0.5

AR>= "EKNSCL", -1.0

MOVR "EKNSCL", "MUE\_NM"

\*R -2.0, "MUE\_NM"

+R 2.0, "MUE\_NM"

MOVR "EKNSCL", "MUE\_N"

\*R -2.0, "MUE\_N"

+R -1.0, "MUE\_N"

JMP 1

////// EĞER HATA [-1,1] ARALIĞI

////// DISINDAYS:

//Burada: "hata<-1 ise sadece MUE\_N=1

//diğerlerini sıfır yap, hata>1 ise

//MUE\_P=1 diğerlerini sıfır yap"

//algoritmali bir program parçası vardır.

////////// HATA İÇİN YAPILAN

///YUKARIDAKI ÜYELİK FONKS.

///HESABI BENZER ŞEKİLDE HATANIN

///TÜREVİ İÇİN DE YAPILIR. O KISIM

///BURAYA ALINMAMIŞTIR.

////// KURALLAR, ATEŞ GÜÇLERİ

////// HESAPLANIYOR:

////// ÖRNEK OLMASI AÇISINDAN

////// SADECE //// KURAL1 VERİLMİŞTİR:

////// KURAL 1

LDR<= "MUE\_N", "MUED\_N"

MOVR "MUE\_N", "W1"

LDR<= "MUED\_N", "MUE\_N"

MOVR "MUED\_N", "W1"

+R "W1", "WTOP" //W'LER

///TOPLANARAK WTOPLAM ELDE

///EDİLECEK

\*R -1.0, "W1" //W, C İLE

///CARPILIYOR

+R "W1", "WCTOP" //WxC

///CARPIMLARI TOPLANIYOR

////////// DİĞER KURALLAR.....25

ADET

////////// BURAYA ALINMAMIŞTIR.

LD SM0.0

MOVR "WCTOP", "UKN\_FARK"

/R "WTOP", "UKN\_FARK"

MOVR "UKN\_FARK", "UKN\_FARKSCL"

\*R "SCLFACI", "UKN\_FARKSCL"

LD SM0.0

MOVR "UKN1", "UKN"

+R "UKN\_FARKSCL", "UKN"

+R "UKN\_FARK", "UKN" //PD

İLE ////PI FARKI BU SATIRDA

LDR>= "UKN", 1.0

MOVW +32000, AQW0

MOVR 1.0, "UKN"

JMP 5

LDR<= "UKN", 0.0

MOVW +9600, AQW0

MOVR 0.0, "UKN"

JMP 5

```
LD SM0.0
DTR "UK", "UK"
MOVR "UKN", "UK"
///// 14000-32000 NORMALLEŞTİRMESİ
*R 32000.0, "UK"
*R 0.5625, "UK"
+R 14000.0, "UK"
TRUNC "UK", "UK"
////////// KONTROL İŞARETİ ÇIKIŞA
////////// VERİLİYOR:
MOVW "UKW", AQW0
LBL 5
LD SM0.0
MOVR "EKN", "EKN1"
MOVR "YKN", "YKN1"
MOVR "UKN", "UKN1"
```



## ÖZGEÇMİŞ

Ali Özgür Emekli, 1978 yılında Bursa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'da tamamladıktan sonra, 1996 yılında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümüne girdi. 2000 yılında adı geçen bölümde lisans öğrenimini tamamlayıp, yine aynı yıl İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programında Yüksek Lisans çalışmasına başladı.

