

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİRLEŞTİRİLMİŞ SIVI TANK SİSTEMİNİN FARKLI METODLARLA  
DENETLENMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali Murat DEĞİRMENCİ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nusret TAN**

**AĞUSTOS 2023**

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİRLEŞTİRİLMİŞ SIVI TANK SİSTEMİNİN FARKLI METODLARLA  
DENETLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali Murat DEĞİRMENCI  
36193615062**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nusret TAN**

**AĞUSTOS 2023**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aŐamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nusret Tan'a, ayrıca kontrol sistemleri alanındaki bilgi ve tecrübelerini aktararak gelişmemi sağlayan Prof. Dr. Yorgo İstefanopulos'a, Prof. Dr. Celaleddin Yeroğlu'na, Doç. Dr. Abdullah AteŐ'e ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Sefer'e

alıŐmalarımда ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıŐmalarım süresince debenden her türlü desteğini esirgemeyen annem Hülya Değirmenci'ye ve arkadaşlarım Osman Şakir Kapor'a, Nur Bağnu Polat'a, Zehranur Mutlu'ya, Ece Yener Koyun'a, ve Elifcan Zengin Şatıroğlu'na

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Birleştirilmiş Sıvı Tank Sisteminin Farklı Metodlarla Denetlenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dışecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ali Murat DEĞİRMENCİ



## İÇİNDEKİLER

|   |           |
|---|-----------|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....   | i         |
| ONUR SÖZÜ .....   | ii        |
| İÇİNDEKİLER.....  | iii       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....  | v         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | vi        |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....  | x         |
| ÖZET .....  | xi        |
| ABSTRACT .....  | xii       |
| <b>1.GİRİŞ.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Tezin Amacı .....   | 5         |
| 1.2 Tezin Kapsamı.....  | 5         |
| <b>2. BİRLEŞTİRİLMİŞ DENEYSEL TANK SİSTEMİNİN TANITILMASI VE MATEMATİKSEL MODELLERİN ELDE EDİLMESİ .....</b>            | <b>6</b>  |
| 2.1 Birleştirilmiş Deneysel Tank Sisteminin Tanıtımı .....  | 6         |
| 2.2 Sistemin Matematiksel Modeli.....   | 8         |
| 2.2.1 İki Tanklı Sistemin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modeli.....   | 9         |
| 2.2.2 Tank (1) ve Tank (2) Sistemi İçin Laplace Uzayında Doğrusal Matematiksel Modeli.....                              | 10        |
| <b>3. PI/PID DENETLEYİCİ VE DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN AYARLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....</b>                   | <b>15</b> |
| 3.1 PI/PID Denetleyici.....   | 15        |
| 3.2 Birleştirilmiş Tank Sistemi için Denetleyici Tasarımında Kullanılan Yöntemler                                       | 18        |
| 3.2.1 Ziegler Nichols Yöntemi Kullanarak Tasarım .....  | 18        |
| 3.2.2 Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi Kullanarak PI Denetleyici Tasarımı .....  | 28        |
| 3.2.3 Genetik Algoritma Yöntemiyle PI/PID Denetleyici Tasarımı .....  | 34        |
| <b>4. FAZ GERİLEMELİ KONTROLÖR VE KONTROLÖR PARAMETRELERİN AYARLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....</b>                 | <b>39</b> |
| 4.1. Kök Yer Eğrisi Yöntemi Kullanarak Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı .....  | 40        |
| 4.2 Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı .....   | 45        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>   | <b>50</b> |
| 5.1 Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan Denetleyicinin Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafikleri .....            | 50        |
| 5.2 Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicinin Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafikleri ..... | 55        |
| 5.3 Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan Denetleyicilerin Gerçek Zamanlı Tepkileri ve Benzetim Grafikleri.....       | 57        |
| 5.4 Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolörün Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafiği .....    | 60        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.5 Kök Yer Eğrisi (Root Locus) Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolörün Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafiği..... | 62        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>ZGEMIŐ.....</b>   | <b>69</b> |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Çizelge 2.2.1.1:</b> İkili Tank Sisteminin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modelini Temsil Eden Parametrelerin Açıklaması .....   | <b>10</b> |
| <b>Çizelge 3.1.1:</b> PID Denetleyicinin Parametrelerinin Açıklaması.....  | <b>16</b> |
| <b>Çizelge 3.1.2:</b> Birim Basamak Tepkisinde PID Denetleyici Parametrelerinin Sistem Üzerinde Etkisi .....                       | <b>17</b> |
| <b>Çizelge 3.2.1.1:</b> Ziegler-Nichols Yöntem 1 İçin P, PI, PID Denetleyici Parametrelerinin Hesaplama Kullanılacak Çizelge ..... | <b>19</b> |
| <b>Çizelge 3.2.1.2:</b> Ziegler-Nichols Yöntem 2 İçin P, PI, PID Denetleyici Parametrelerinin Hesabında Kullanılacak Çizelge.....  | <b>22</b> |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1.1: Geri Besleme Döngüsüne Sahip Sıvı Tank Sisteminin Blok Diyagramı .....  | 6  |
| Şekil 2.1.2: Feedback Instruments 33-041S Tank Sistemi .....   | 7  |
| Şekil 2.1.3: Tank Sisteminin Şematik Gösterimi .....   | 7  |
| Şekil 2.1 4: Sıvı Tank Sisteminin Mekanik ve Elektronik Parçalarıyla İlişkisi.....   | 8  |
| Şekil 2.2.1.1: İkili Sıvı Tank Sisteminin Modeli .....   | 9  |
| Şekil 2.2.1.2: SISO Tank (1) veya Tank (2) Sisteminin Blok Diyagramı .....   | 10 |
| Şekil 2.2.2.1: Tank (1) ve Tank (2) için Model Tanımlama Deneyi İçin MATLAB/SIMULINK Arayüzü.....  | 11 |
| Şekil 2.2.2.2: Sistem Tanımlama Aracı Arayüzü.....   | 11 |
| Şekil 2.2.2.3: Sistemin Laplace Uzayında Matematiksel Modelinin Kutup ve Sıfırlarının Belirlenmesi.....  | 12 |
| Şekil 2.2.2.4: Tank (1) İçin Tasarlanan ve Ölçülen Model Çıktısı .....   | 13 |
| Şekil 2.2.2.5: Tank (2) İçin İlk Tasarlanan ve Ölçülen Model Çıktısı.....  | 14 |
| Şekil 3.1.1: PID Denetleyicinin Blok Diyagramı .....   | 15 |
| Şekil 3.2.1.1: Örnek (1) İçin Sistemin Açık Çevrim Tepkisi.....  | 19 |
| Şekil 3.2.1.2: Örnek (1) İçin Negatif Birim Geri Beslemeli Sistemin Blok Diyagramı ....  | 20 |
| Şekil 3.2.1.3: Ziegler-Nichols Açık Çevrim Yönteminin (Yöntem 1) Örnek (1) Üzerinde Uygulanması ve Denetleyicilerin Sistem Üzerinde Gösterdiği Etkisi .....                | 21 |
| Şekil (3.2.1.4): Örnek 2 İçin Verilen Sistemin Blok Diyagramı.....   | 22 |
| Şekil 3.2.1.5: Örnek (2)' de Gösterilen Sistemin ( $G(s)$ ) Kök Yer Eğrisi .....   | 23 |
| Şekil 3.2.1.6: Örnek (2)' de Gösterilen Sistemin Kritik Kazançlı Birim Basamak Tepkisi   | 23 |
| Şekil 3.2.1.7: Ziegler-Nichols Kapalı Çevrim Yönteminin (Yöntem 2) Örnek (2) Üzerinde Uygulanması ve Denetleyicilerin Sistem Üzerinde Gösterdiği Etkisi .....              | 24 |
| Şekil 3.2.1.8: Denklem (2.2.2.2)' de İfade Edilen Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi ....  | 25 |
| Şekil 3.2.1.9: Tank (1) ve Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi Grafiği.....   | 25 |
| Şekil 3.2.1.10: Negatif Birim Geri Beslemeli Tank (1) ve Tank (2) Sisteminin Kritik Kazanç Değerlerine Göre Birim Basamak Tepkisi .....                                    | 26 |
| Şekil 3.2.1.11: Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P, PI, PID Denetleyicilere Sahip Tank (1) Sistemi İçin Birim Basamak Girişine Göre Benzetimi.....                    | 27 |
| Şekil 3.2.1.12: Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P, PI, PID Denetleyicilere Sahip Tank (2) Sistemi İçin Birim Basamak Girişine Göre Benzetimi.....                    | 28 |
| Şekil 3.2.2.1: Örnek (3) Kapsamında Verilen Sistemin Kararlılık Sınır Eğrisi.....  | 30 |
| Şekil 3.2.2.2: Örnek (3) Kapsamında Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicinin Farklı Parametre Değerlerine Göre Sistemin Birim Basamak Tepkisi ..... | 31 |
| Şekil 3.2.2.3: Tank (1) Sistemi İçin Elde Edilen Kararlılık Sınır Eğrisi.....  | 32 |
| Şekil 3.2.2.4: $K_p$ - $K_i$ Değerlerine Göre Tank (1) Sisteminin Birim Basamak Cevabı .....   | 32 |
| Şekil 3.2.2.5: Tank (2) Sistemi İçin Elde Edilen Kararlılık Sınır Eğrisi.....  | 33 |
| Şekil 3.2.2.6: $K_p$ - $K_i$ Değerlerine Göre Tank (2) Sisteminin Birim Basamak Cevabı .....   | 33 |



|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.2.3.1: Genetik Algoritma İçin MATLAB/SIMULINK' te Bulunan En İyileme (Optimizasyon) Araç Kutusu.....  | 36 |
| Şekil 3.2.3.2: MATLAB/SIMULINK Ortamında ITAE Performans İndeksi Kullanarak Tank (1) veya Tank (2) Sistemini Temsil Eden Blok Diyagram.....   | 36 |
| Şekil 3.2.3.3: Genetik Algoritma Kullanarak Tank 1 Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi " $K_p=2.046$ " ve " $K_i=1$ " .....                                    | 37 |
| Şekil 3.2.3.4: Genetik Algoritma Kullanarak Tank 1 Sistemi İçin PID Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi " $K_p=3.015$ ", " $K_i=0.54$ " ve " $K_d=-1,061$ " .....              | 37 |
| Şekil 3.2.3.5: Genetik Algoritma Kullanarak Tank 2 Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi " $K_p=1$ " ve " $K_i=0.104$ " .....                                    | 38 |
| Şekil 3.2.3.6: Genetik Algoritma Kullanarak Tank 2 Sistemi İçin PID Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi " $K_p=682.4171$ ", " $K_i=307.1308$ " ve " $K_d=916.1077$ " .....     | 38 |
| Şekil 4.1.1: Tank (1) Sisteminin Kök Yer Eğrisi .....   | 42 |
| Şekil 4.1.2: Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tank (1) Sistemi İçin Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi .....  | 43 |
| Şekil 4.1.3: Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi .....   | 44 |
| Şekil 4.1.4: Kök Yer Eğrisi Yöntemi Kullanarak Tank (2) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi (a): $\hat{K}_c = 1$ ve (b): $\hat{K}_c = 3$ .....       | 44 |
| Şekil 4.1.5: Faz Gerilemeli Kontrolör Eklenmiş Tank (1) Sisteminin Kök Yer Eğrisi .....   | 45 |
| Şekil 4.1.6: Faz Gerilemeli Kontrolör Eklenmiş Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi .....   | 45 |
| Şekil 4.2.1: Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı için Tank (1) sisteminin Bode Diyagramı .....  | 47 |
| Şekil 4.2.2: Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı için Tank (2) sisteminin Bode Diyagramı .....  | 47 |
| Şekil 4.2.3: Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Tank (1) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi .....  | 49 |
| Şekil 4.2.4: Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Tank (2) Sistemi İçin Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi .....  | 49 |
| Şekil 5.1.1: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI (Oransal-Tümlevsel) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği " $K_p=0.8325$ " ve " $K_i \cong 0.3$ " .....                        | 50 |
| Şekil 5.1.2: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI (Oransal-Tümlevsel) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi " $K_p=0.8325$ " ve " $K_i \cong 0.3$ " .....                  | 51 |
| Şekil 5.1.3: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği " $K_p=0.925$ " .....   | 51 |
| Şekil 5.1.4: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği " $K_p=3.175$ " .....   | 51 |
| Şekil 5.1.5: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi " $K_p=3.175$ " .....   | 52 |
| Şekil 5.1.6: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID (Oransal-Tümlevsel-Türevsel) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği " $K_p=3.81$ ", " $K_i = 1.016$ " ve " $K_d=3.572$ " ..... | 52 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 5.1.7: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID (Oransal-Tümlevsel-Türevsel) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3.81$ ”, “ $K_i =1.016$ ” ve “ $K_d=3.572$ ” .....                                      | 52 |
| Şekil 5.1.8: Negatif Türevsel Kazanç Değerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyiciye Sahip Tank 1 Sisteminin Birim Basamak Tepkisi “ $K_p=1.11$ ”, “ $K_i=0.64$ ” ve “ $K_d=-0.5$ ” .....                             | 53 |
| Şekil 5.1.9: Negatif Türevsel Kazanç Değerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyiciye Sahip Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=1.11$ ”, “ $K_i=0.64$ ” ve “ $K_d=-0.5$ ” .....                                  | 53 |
| Şekil 5.1.10: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Birim Basamak Tepkisi (a): Yeni Kazanç Değerleri “ $K_p=2$ ” ve “ $K_i=0.1$ ” (b) Eski Kazanç Değerleri “ $K_p=2.8575$ ” ve “ $K_i=0.4572$ ” ..... | 54 |
| Şekil 5.1.11: Yeni Parametre Değerlerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyiciye Sahip Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=2$ ” ve “ $K_i=1$ ” .....   | 54 |
| Şekil 5.2.1: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ” .....   | 55 |
| Şekil 5.2.2: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ” .....   | 55 |
| Şekil 5.2.3: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=0.7$ ” ve “ $K_i=0.008$ ” .....   | 56 |
| Şekil 5.2.4: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=0.7$ ” ve “ $K_i=0.008$ ” .....   | 56 |
| Şekil 5.3.1: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyicili Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=2.046$ ” ve “ $K_i=1$ ” .....  | 57 |
| Şekil 5.3.2: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=2.046$ ” ve “ $K_i=1$ ” .....  | 57 |
| Şekil 5.3.3: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3.015$ ”, “ $K_i=0.54$ ” ve “ $K_d=-1.061$ ” .....   | 57 |
| Şekil 5.3.4: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3.015$ ”, “ $K_i=0.54$ ” ve “ $K_d=-1.061$ ” .....   | 58 |
| Şekil 5.3.5: Farklı Referans Girişine Göre Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ” .....   | 58 |
| Şekil 5.3.6: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ” .....   | 59 |
| Şekil 5.3.7: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=682.4171$ ”, “ $K_i=307.1308$ ” ve “ $K_d=916.1077$ ” .....  | 59 |
| Şekil 5.4.1: Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği $\left( G_{c-1_{Bode}}(s) = 1.825 \frac{s+0.15}{s+0.0075} \right)$ .....   | 60 |
| Şekil 5.4.2: Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi $\left( G_{c-1_{Bode}}(s) = 1.825 \frac{s+0.15}{s+0.0075} \right)$ .....                                       | 60 |

**Şekil 5.4.3:** Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Farklı Referans Sinyallerine Göre Benzetim Grafiği  
 $\left( G_{c-2_{Bode}}(s) = 1.612 \frac{s+0.02}{s+0.0116} \right)$  ..... 61

**Şekil 5.4.4:** Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi  $\left( G_{c-2_{Bode}}(s) = 1.612 \frac{s+0.02}{s+0.0116} \right)$  ..... 61

**Şekil 5.5.1:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(1) Sisteminin Benzetim Grafiği  $\left( G_{c1_{Root-Locus}}(s) = 1.15232 \frac{s+0.5}{s+0.02} \right)$  ..... 62

**Şekil 5.5.2:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi  $\left( G_{c1_{Root-Locus}}(s) = 1.15232 \frac{s+0.5}{s+0.02} \right)$  ..... 62

**Şekil 5.5.3:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Farklı Referans Sinyallerine Göre Benzetim Grafiği  
 $\left( G_{c-2_{Root-Locus}}(s) = 3 \frac{s+0.0115}{s+0.0081} \right)$  ..... 63

**Şekil 5.5.4:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi  $\left( G_{c-2_{Root-Locus}}(s) = 3 \frac{s+0.0115}{s+0.0081} \right)$  ..... 63

**Şekil 5.5.5:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Kontrolör Kazancı "1" Olduğunda Sistemin Benzetim Grafiği  
 $\left( G_{c-2_{Root-Locus}}(s) = 1 \frac{s+0.0115}{s+0.0081} \right)$  ..... 63

**Şekil 5.5.6:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank  
(2) Sisteminin Kontrolör Kazancı "1" Olduğunda Sistemin Gerçek Zamanlı Tepkisi  
 $\left( G_{c-2_{Root-Locus}}(s) = 1 \frac{s+0.0115}{s+0.0081} \right)$  ..... 64

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>P:</b>       | Oransal   |
| <b>PI:</b>      | Oransal-Tümlevsel                                     |
| <b>PID:</b>     | Oransal-Tümlevsel-Türevsel                            |
| <b>ZN:</b>      | Ziegler-Nichols                                       |
| <b>AH:</b>      | Astrom-Hagglund                                       |
| <b>SISO:</b>    | Tek Girişli-Tek Çıkışlı                               |
| <b>TITO:</b>    | İki Girişli-İki Çıkışlı                               |
| <b>MIMO:</b>    | Çok Girişli-Çok Çıkışlı                               |
| <b>LQR:</b>     | Doğrusal Kuadratik Düzenleyici                        |
| <b>ISF:</b>     | Tümlevsel Durum Geri Besleme                          |
| <b>FOISF:</b>   | Kesir Dereceli ISF                                    |
| <b>PSO:</b>     | Parçacık Sürü Optimizasyonu                           |
| <b>GA:</b>      | Genetik Algoritma                                     |
| <b>2DOF-PI:</b> | 2 Serbestlik Dereceli-PI                              |
| <b>3DOF-PI:</b> | 3 Serbestlik Dereceli-PI                              |
| <b>FOPI:</b>    | Kesir Dereceli PI                                     |
| <b>FOPID:</b>   | Kesir Dereceli PID                                    |
| <b>FLC:</b>     | Bulanık Mantık Kontrol                                |
| <b>BSMC:</b>    | Geri Adımlı Kayan Kip Denetleyici                     |
| <b>BSMPIC:</b>  | Geri Adımlı Kayan Kipli Oransal-Tümlevsel Denetleyici |
| <b>YSA:</b>     | Yapay Sinir Ağları                                    |
| <b>ISE:</b>     | Tümlevsel Kare Hatası                                 |
| <b>IAE:</b>     | Tümlevsel Mutlak Hata                                 |
| <b>ITAE:</b>    | Tümlevsel Zaman Mutlak Hatası                         |
| <b>ITSE:</b>    | Tümlevsel Zaman Karesel Hata                          |

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## BİRLEŞTİRİLMİŞ SIVI TANK SİSTEMİNİN FARKLI METODLARLA DENETLENMESİ

Ali Murat DEĞİRMENCI

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

69+XIIsayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Nusret TAN

Birleştirilmiş tank sistemi, süreç kontrolünde sıklıkla kullanılan tank sistemlerinin modelini temsil etmektedir. Sıvı seviye denetimi, ısıtıcı kazanlar, atık arıtma sistemleri, enerji üretim santralleri, süzgeçleme, petrol rafineri gibi birçok endüstriyel alanlarda karşımıza çıkan önemli bir kontrol problemidir. Bu nedenle sıvı seviye denetimini sağlamak oldukça zor ve maliyeti yüksek bir işlemdir. Maliyet, zorluk, güvenlik vb. nedenlerden dolayı Feedback Instruments Ltd. tarafından üretilen 33-041S deney düzeneği modeli kullanılmıştır. 33-041S deney düzeneği modeli, içerisinde birbirine borularla bağlı olan beş tanktan oluşmaktadır. En altta rezervuar tankı, rezervuar tankının içinde ise iki adet dalgıç pompa bulunmaktadır. Dalgıç pompa ve boruların yardımıyla diğer tanklara sıvı akışı sağlanmaktadır. Sıvıların seviyesini ölçmek için ise diğer dört tankın tabanına sıvı seviye duyarğaçları (sensörleri) konumlandırılmıştır. Sıvı seviye denetimini sağlamak için genellikle süzgeç görevi gören denetleyiciler kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, PI (Oransal-Tümlevsel) kontrolör, PID (Oransal-Tümlevsel-Türevsel) kontrolör, faz gerilemeli kontrolör (Phase Lag Controller) gibi denetleyiciler farklı yöntemler kullanılarak tasarlanmıştır. Çalışma Tank (1) ve Tank (2)' de bulunan sıvı seviye denetimi için uygulanmıştır. Çalışmaya Tank (1) ve Tank (2)' nin ayrı ayrı Laplace uzayında doğrusal matematiksel modeli elde edilerek başlanmıştır. Elde edilen matematiksel modellerden yola çıkarak denetleyici tasarımı yapılmıştır. PI ve PID kontrolörlerin parametrelerini belirlemek için klasik bir yöntem olan Ziegler-Nichols (ZN) yöntemi, grafiksel bir yöntem olan Kararlılık Sınır Eğrisi yöntemi, modern ve algoritmaya dayanan bir en iyileme yöntemi olan Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Faz gerilemeli kontrolörün parametrelerinin tasarımında ise klasik bir yöntem olan grafiksel olarak incelememize olanak sağlayan kök yer eğrisi (Root Locus) yöntemi ve Bode diyagramı yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Tasarım sonuçları benzetim ve gerçek zamanlı olarak MATLAB/SIMULINK ortamında elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelenerek kuramsal çalışma desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PI-PID Kontrolör, Faz Gerilemeli Kontrolör, Genetik Algoritma, Ziegler-Nichols, Kararlılık Sınır Eğrisi, Bode Diyagramı, Köklerin Yer Eğrisi

# ABSTRACT

Master Thesis

Control of Coupled Liquid Tank System Using Different Methods

Ali Murat DEĞİRMENÇİ

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

69+XII sayfa

2023

Supervisor: Prof. Dr. Nusret TAN

The model of tank systems frequently used in the process control is represented by the coupled tank system. Controlling liquid levels is a significant control issue that arises in a variety of industrial applications, including heating boilers, waste treatment systems, power plants, filtration and oil refineries. For this reason, implementing liquid level control is very difficult and costly process. The coupled tank experimental set that produced by the Feedback Instruments Ltd. 33-041S model has been preferred to use due to cost, difficulty, security etc. The 33-041S model consists of five tanks connected to each other by pipes. Reservoir tank has been located at the bottom of the coupled tanks system and it has two submersible pumps. Submersible pumps and pipelines are utilized for supplying fluid flow. The fluid level is measured by four sensors that are located at the bottom of the other four tanks. Controllers that act as strainers are generally used to provide liquid level control.

The scope of this study, controllers such as PI (Proportional-Integral) controller, PID (Proportional-Integral-Derivative) controller, phase lag controller, parameter values have been determined that using various methods for control of the liquid level. In this way controllers have been designed. The study has been applied separately to each of the Tank (1) and Tank (2) system. First of all, for both the Tank (1) and Tank (2) systems, linear mathematical models in the Laplace domain have been constructed. Mathematical models have been utilized to construct the designs for the controllers. The Stability Boundary Locus technique, a graphical approach; the Ziegler-Nichols (ZN) technique, a conventional method; and the Genetic Algorithm (GA), a contemporary algorithm-based optimization method, have all been utilized to find the parameters of PI and PID controllers. The root locus technique and Bode diagram techniques, which are conventional methods that enable us to observe them graphically, have been applied in the design of the phase lag controller.

The design results have been obtained in simulation and real time in MATLAB/SIMULINK software. The theoretical study has been supported by examining the results obtained.

**Keywords:** PI-PID Controller, Phase Lag Controller, Genetic Algorithm, Ziegler-Nichols, Stability Boundary Locus, Bode Diagram, Root Locus

## 1.GİRİŞ

Sıvı seviye sistemlerinin kontrolü milattan önceki yıllara dayanmaktadır. M.Ö. 200' lü yıllarda Ktesibios' un su saati geri beslemeli kontrol sistemlerinin de başlangıcı olarak varsayılmaktadır [1-2]. Yunanlı Ktesibios su saatinde tankta bulunan suyu sabit tutmak amacıyla bir şamandıra regülatörü tasarladı. Böylelikle suyun denetimini saatinde kullanmış oldu [2]. Bir lambanın yağ seviyesini sabit tutmak adına Bizanslı Philon bir şamandıra regülatörünü kullandı [2].

Milattan önce başlayan ve teknolojinin gelişmesiyle ilerleyen sıvı seviye denetimi günümüzde birçok süreç endüstrisinde varlığını sürdürmektedir. Bunun için genellikle biriktirmek ve iletmek için kullanılan sıvı tank sistemleri kullanılır. Sıvı tank sistemleri; petrol, gaz vb. yakıtların denetiminin sağlandığı enerji endüstrisinde, uçak yakıtlarının depolanması ve taşınması için havacılık ve uzay endüstrisinde, kimya endüstrisinde, enerji santrallerinde, atık arıtma tesislerinde, ısıtıcı kazanlarda, süzgeçleme vb. alanlarda kullanılmaktadır. Sıvı tank sistemleri genellikle rezervuar tanklarının bulunduğu, rezervuarda bulunan sıvının diğer tanklara borular ile aktarıldığı çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output-MIMO) sistemlerdir. Borulara bağlı vanalar yardımıyla farklı yapılandırmalara olanak sağlayan bu sistem için sıvının seviyesinin ölçülmesi duyargaçlar yardımıyla yapılmaktadır. Sistemin kendi karmaşık yapısından dolayı, sıvı seviyesi denetimi önemli bir kontrol sistemi problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kontrol sistemleri, genellikle en az bir geri besleme döngüsüne dayanan sistemlerdir [3]. Kontrol sistemlerinde temel amaç sisteme verilen referans sinyalini sistemin çıkışında da gözlemleyebilmektir. Sistemin girişi ve çıkışı arasındaki fark bize hata sinyalini vermektedir. Sistemin çıkışı yani kontrol edilen büyüklük, hataya bağlıdır ve sistem tarafından denetlenir, gerekirse değiştirilir [3]. Bir sistemin istenen referans sinyaline göre takip edilmesini sağlayabilmek için hata sinyali mümkün olduğunca sıfıra gitmelidir. Bu durumu sağlayabilmek için genellikle süzgeçleme görevi yapan kontrolörlerden yararlanılmaktadır. Endüstriyel uygulama alanlarında yaygın olarak PI kontrolör, PID kontrolör, faz gerilemeli-ilerlemeli kontrolör gibi denetleyiciler kullanılmaktadır [4]. Kolaylığı, düşük maliyeti ve etkili performansından dolayı geleneksel denetleyicilerden PI kontrolörler ve PID kontrolörler endüstride tercih sebebiyken, faz gerilemeli, faz ilerlemeli ve faz gerilemeli-ilerlemeli kontrolörler PID kontrolör veya türevlerine nazaran daha az sıklıkla kullanılmaktadır. Buna rağmen faz gerilemeli, faz ilerlemeli ve faz gerilemeli-

ilerlemeli kontrolörler hassasiyet gerektiren bazı kontrol uygulamalarında sıklıkla tercih edilebilmektedir.

Sıvı tank sistemleri üzerinde sıvı seviye denetimini sağlamak için kontrolör tasarımı, kontrolörün sistem üzerindeki karşılaştırmalı performans etkileri vb. çalışmalar literatür çalışmalarında yer almaktadır. Basil M. Al-Hadithi ve diğerleri [5] yaptığı çalışmada, sıvı seviye sisteminin denetimi için, kutup atama yöntemiyle bir bulanık denetleyici tasarımını çalışmasında sunmuştur. Çalışma, pompadan tanka gelen sıvının akış oranını ayarlayarak, seviye ayar noktasındaki değişikliği denetlemeye yönelik bir çalışmadır. M. Aktaş ve diğerleri [6] sunduğu çalışma kapsamında, genellikle doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerin denetimi için geribesleme yöntemine dayanan doğrusal kuadratik düzenleyici (Linear Quadratic Regulator-LQR) birleştirilmiş tank sisteminde sıvı seviye ve sıcaklık denetimi için tasarlanmış ve sistemin benzetim tepkisini çalışmalarında sunmuşlardır. Çalışma [7] kapsamında Hur Abbas ve diğerleri, denetlenen sistemin hata verilerini gösteren kayan bir yüzey oluşturmaya dayalı ve bu yüzeydeki hata sinyalini sıfıra götürmeyi amaçlayan Kayan Kip Kontrol (Sliding Mode Control-SMC) tasarımını, birleşik tank sisteminin sıvı seviye denetimi için uygulamışlardır. Sisteme referans girişi olarak, basamak sinyali, testere dişli dalga ve kare dalga gibi farklı sinyaller uygulayarak sistemin verdiği tepkiyi gözlemlemiştirlerdir. Sistemin referans sinyali izleme performansını, Ziegler-Nichols yöntemiyle tasarlanan PID kontrolör ile karşılaştırmak için bir hata değerlendirme ölçütü olan zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE-Integral of time weighted absolute error) ile performans karşılaştırmasını çalışma kapsamında yapmıştır. Roy ve diğerleri [8] çalışmasında, sistemde bulunan belirsizliklere ve çevresel sebeplerden kaynaklı bozucu etkilere karşı dayanıklı aynı zamanda üstün bir verim sağlama kabiliyeti olan denetleyici türlerinden tümlevsel durum geri beslemeli kontrol (Integral State Feedback Control- ISF) ve kesir dereceli tümlevsel durum geri beslemeli kontrolü (Fractional Order Integral State Feedback Control – FOISF) iki tanklı bir sistemin sıvı seviye denetimi için uygulamışlardır. Çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan modeller elde etmiş ve doğrusal modelden yola çıkarak kutup yerleştirme yöntemiyle bir ISF kontrolör tasarımı yapılırken, doğrusal olmayan modelden yararlanılarak bir eniyileme yöntemi olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemiyle FOISF kontrolör tasarımını çalışmalarında gerçekleştirmişlerdir. Tank sisteminin sıvı seviye denetimi için ISF ve FOISF kontrolörleri karşılaştırarak, FOISF denetleyicisinin daha iyi bir başarımlı sergilediğini çalışmaları kapsamında gözlemlemiştirlerdir. Tank sistemi için yaptığı başka bir çalışmada [9] geleneksel PI ve PID



kontrolör, iki serbestlik dereceli oransal tümlevsel kontrolör (Two degrees of freedom proportional integral, 2DOF-PI) ve üç serbestlik dereceli oransal tümlevsel kontrolör (3DOF-PI) ile kesir dereceli oransal tümlevsel kontrolörün (Fractional Order Proportional Integral- FOPI) performans etkilerini karşılaştıran bir çalışma sunmuştur. M. Khalid Khan ve Sarah K. Spurgeon tarafından [10], birleştirilmiş sıvı tank sisteminin denetimini sağlamak adına, SMC kontrolörün gelişmiş bir uyarlaması olan ve SMC kontrolöre kıyasla daha kapsamlı bir hata aralığında çalışarak etkili bir özellik sergileyen ikinci dereceden kayan kip kontrolör algoritması geliştirmişlerdir. Algoritma kayan değişkenin türevini gerektirmeyen bir yeniliği içinde barındırarak dinamik bir kontrol üretme özelliğine sahip olarak geliştirilmiştir. Tank sisteminde istenen sıvı seviyesini sağlamak için bir akıllı denetleyici olan bulanık mantık kontrolör (Fuzzy Logic Controller-FLC) tasarımı H. Gupta ve diğerleri [11] tarafından gerçekleştirerek benzetim sonuçlarını çalışmasında sunmuşlardır. A. Kumar, M. Vashishth ve L. Rai tank sistemi için yaptığı çalışmada [12], PID kontrolörün gelişmiş bir uyarlaması olan ve PID kontrolörde bulunan tümlevsel ve türevsel kısımları tam sayı yerine kesir dereceli olarak düzenlenen kesir dereceli oransal, tümlevsel, türevsel (Fractional Order Proportional Integral Derivative-FOPID) denetleyici tasarımı yapmışlardır. Tasarım için ayrıca PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması için klasik bir yöntem olan Ziegler-Nichols (ZN) ve Astrom-Hagglund (AH) yönteminden yararlanmışlardır. Çalışmalarında öncelikle sistemin faz payı belirlenmiştir daha sonra ZN yöntemi kullanılarak denetleyicinin oransal ve tümlevsel terimlerinin değerleri belirlenir. Doğrusal olmayan denklemleri elde etmek için C. Yeroğlu ve diğerleri [13] tarafından geliştirilen FOPID kontrolör ayarlama yönteminden yararlanmışlardır. Türevsel kısmın başlangıç değeri için AH yönteminden yararlanarak çalışmalarını sürdürmüşlerdir. MIMO tank sistemi üzerinde yapılan başka bir çalışma kapsamında [14], PI kontrolör, SMC kontrolör, geri adım denetim yöntemi ve SMC denetim yönteminin birleşiminden oluşan geri adımlı kayan kip kontrolör (BSMC), ve BSMC kontrolör ile PI kontrolörü birleştirerek geri adımlı kayan kipli oransal tümlevsel kontrolör (BSMPIC) tasarımları gerçekleştirerek sistem üzerinde uygulanmıştır. Sonuçlar araştırmacılar tarafından incelenmiş ve verimliliği tartışılmıştır. Ramli ve diğerleri [15] bağlantılı tank sistemi üzerinde akıllı bir en iyileme yöntemleri olan PSO ve Yapay Sinir Ağları (YSA) birleşiminden oluşan hibrit bir PI kontrolör tasarımını yapıp sistem üzerinde uygulamışlardır. Klasik PI kontrolörden farklı olarak geliştirilen hibrit PI kontrolör ile standart YSA tabanlı PID kontrolör sistem üzerinde karşılaştırarak, yaptıkları tasarımının daha iyi bir verimlilikte çalıştığı kanısına varmışlardır. Referans [16] kapsamında, SMC denetleyicinin çeşitlerinden olan statik SMC ve dinamik SMC kontrolörü tank sistemi için

uygulamışlardır. Statik SMC kontrolörün temelinde en büyük avantajı sistemde oluşan belirsizliklere ve bozucu etmenlere iyi bir çözüm sunması olurken yüksek frekanslarda olumsuz etkilenmektedir. Dinamik SMC kontrolör ise yüksek frekanslarda daha etkili olabilmektedir. Almutairi ve Zribi [16] uyguladığı çalışmada statik SMC kontrolörü sistemin sıvı seviyesi denetimi için kullanırken, iki dinamik SMC kontrolör ise statik SMC denetleyicinin eksik kaldığı durumlar için kullanmıştır. M. Saad ve diğerleri [17] model referansına dayalı adaptif kontrol ile klasik PI kontrolörün performanslarını tank sisteminde incelemiştir. Genetik algoritma yöntemini kullanarak doğrusal olmayan tank sisteminin fiziksel parametre değerlerinin tahmin edildiği ve bu sistemin doğrusallaştırılarak PI kontrolör tasarımının yapıp sistem üzerinde deneyler yapıldığı çalışma Mohamed G. Stohy ve diğerleri [18] tarafından önerilmiştir. Bhambhani V. ve diğerleri [19] daha önceden geliştirdikleri FOPI kontrolörün parametrelerini ayarlama yöntemini tek girişli tek çıkışlı tank sisteminin sıvı seviye kontrolü için uygulamışlardır. Çalışmaya tank sisteminin matematiksel modelini elde ederek başlamıştır ve çalışma sonuçlarını ZN yöntemi ve modifiye edilmiş ZN yöntemiyle kıyaslamışlardır. Sekban H.T ve diğerleri [20], iki tanka sahip sistem için geri adımlamalı kontrol tasarımı gerçekleştirmiş ve bunu PI kontrolör ile kıyaslamışlardır. PI kontrolörün parametrelerini deneme yanılma yoluyla belirlemiştir. Sekban H.T. ve diğerleri [21] başka bir çalışmada, dörtlü tank sistemi için FOPI kontrolör ile sıvı seviye denetimi uygulamasını çalışmalarında sunmuşlardır.

Sıvının akışı ve seviyesinin denetlendiği çoğu endüstriyel alanlarda, sıvı seviye denetimi kullanılmaktadır [17]. Yukarıda da bahsedildiği gibi milattan önce başlayan ve günümüzde de birçok hassasiyet gerektiren alanlarda sıvı seviye denetimi, kontrol uygulamalarının büyük bir parçasını oluşturmaktadır. Sıvının istenen düzeyde olması veya sisteme giriş olarak verilen bir referans sinyalini en az hatayla izlemesi endüstriyel süreç uygulamalarında istenen bir durumdur. Literatür incelemelerinde de görüldüğü gibi bu durumun sağlanması için çeşitli denetleyici tasarımı sıvı tank sistemi üzerinde uygulanmıştır. Denetleyicinin sağladığı en büyük avantaj hiç şüphesiz minimum hatayla sıvı tank sisteminde bulunun sıvı seviyesinin denetimini sürdürebilmektir. Bu bilgiler ışığında, yüksek lisans tez çalışması için, Genetik Algoritma (GA), Kararlılık Sınır Eğrisi, Ziegler-Nichols ile geleneksel PI/PID denetleyici, Bode Diyagramı ve Root Locus ile Faz gerilemeli kontrolör farklı yöntemler kullanılarak tasarlanmış ve birleştirilmiş sıvı tank sisteminde sıvı seviyesinin denetimi için uygulanmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, endüstriyel süreçlerde sıklıkla kullanılan geleneksel PI/PID denetleyici ve Faz gerilemeli kontrolörün, sıvı seviyesinin denetlenmesi için farklı yöntemlerden yararlanarak tasarlamaktır. Feedback Instruments Ltd. tarafından üretilen 33-041S deneysel tank düzeneği üzerinde çalışma tek girişli tek çıkışlı olarak (SISO) Tank (1) ve Tank (2) sistemi için ayrı ayrı uygulanmıştır. Tank (1) ve Tank (2) sisteminde sıvı seviyesinin benzetim ve gerçek zamanlı sonuçları MATLAB/SIMULINK ortamında elde edilip incelenmiştir.

## 1.2 Tezin Kapsamı

Tez çalışması kapsamında, Tank (1) ve Tank (2) sisteminin, Laplace uzayında matematiksel modeli Matlab tanımlama aracı yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen matematiksel modellerden yararlanarak ve yukarıda bahsi geçen yöntemler yardımıyla kontrolör tasarımı yapılmıştır.

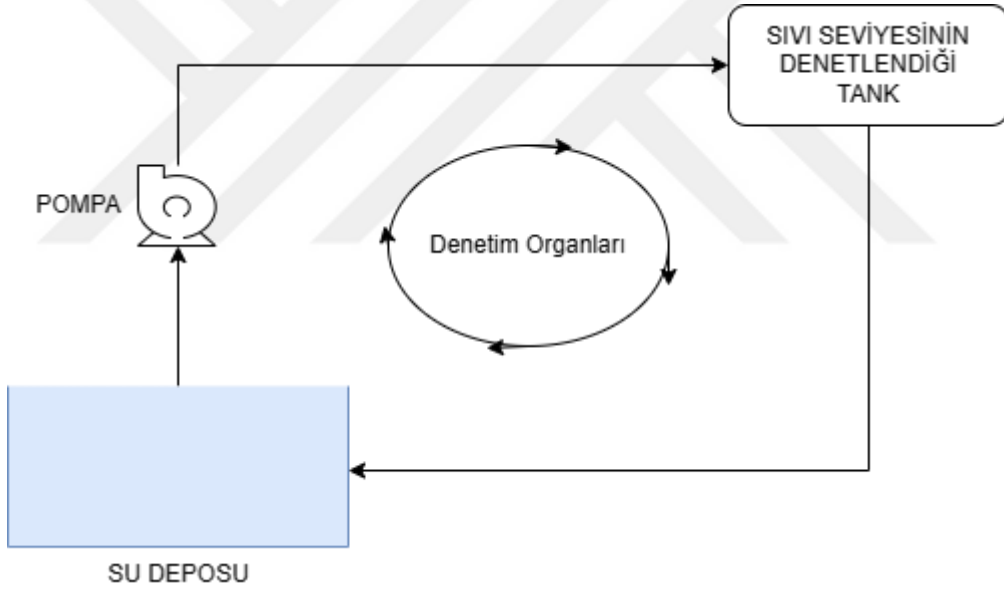
Bu tez aşağıda belirtilen beş bölüme ayrılmıştır. Bunlar:

- ❖ Birleştirilmiş Deneysel Tank Sisteminin Tanıtılması ve Matematiksel Modellerin Elde Edilmesi
- ❖ PI/PID Denetleyici ve Denetleyici Parametrelerinin Ayarlanmasında Kullanılan Yöntemler
- ❖ Faz Gerilemeli Kontrolör ve Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanmasında Kullanılan Yöntemler
- ❖ Sonuç ve Öneriler
- ❖ Kaynaklar

## 2. BİRLEŞTİRİLMİŞ DENEYSEL TANK SİSTEMİNİN TANITILMASI VE MATEMATİKSEL MODELLERİN ELDE EDİLMESİ

### 2.1 Birleştirilmiş Deneysel Tank Sisteminin Tanıtımı

Tank sistemlerinin kontrolünde genellikle sıvı seviyesinin istenen düzeyde denetimi ve aktarımı süreç endüstrisinde önem arz etmektedir. Tank sistemlerinin kullanım alanları daha önce belirtildiği gibi; enerji endüstrisinde, havacılık ve uzay endüstrisinde, kimya endüstrisinde, enerji santrallerinde, atık arıtma tesislerinde, ısıtıcı kazanlarda, süzgeçleme vb. alanlarda geniş bir faaliyet göstermektedir. Genellikle bu sistemler MIMO sistemlerdir. Sistem çalışması gereği giriş olarak kontrol gerilimi kullanırken çıkış olarak sıvı seviyesi ölçüt olarak değerlendirilmektedir. Şekil (2.1.1)' de gösterildiği gibi sıvı seviyesi denetimi, duyargaçlardan aldığı veriyi değerlendirerek istenen ayar noktasına getirmeyi amaçlayan geri besleme döngüsüne sahip bir kontrol sistemleri uygulamasıdır.

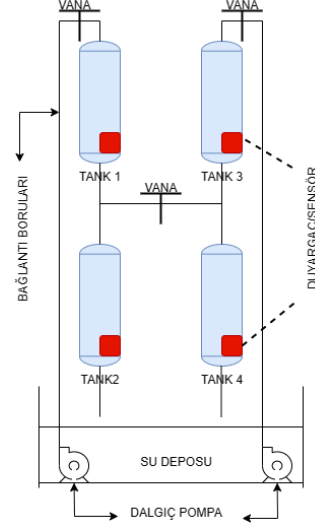


Şekil 2.1.1: Geri Besleme Döngüsüne Sahip Sıvı Tank Sisteminin Blok Diyagramı

Endüstriyel veya başka alanlarda kullanılan tank sistemlerinin denetimini sağlamak maaliyeti yüksek ve zorlu bir durumdur. Araştırmacılar genellikle çalışmalarını yaparken bu zorlukları göz ardı etmezler, bu nedenle sıvı tank sistemlerinin gerçeğe yakın deneysel model düzenekleriyle çalışmalarını sürdürmektedirler. Feedback Instruments Ltd. şirketinin tasarladığı birleştirilmiş sıvı tank sistemi, bu amaçla düzenlenmiş gerçekçi bir deneysel model düzeneğidir. Şekil (2.1.2)' de Feedback Instruments Ltd.' nin 33-041S deney düzeneği modeli ve Şekil (2.1.3)' te sistemde bulunan tankların konumlarını ve bağlantılarını gösteren şematik gösterim sunulmuştur.



**Şekil 2.1.2:** Feedback Instruments 33-041S  
Tank Sistemi

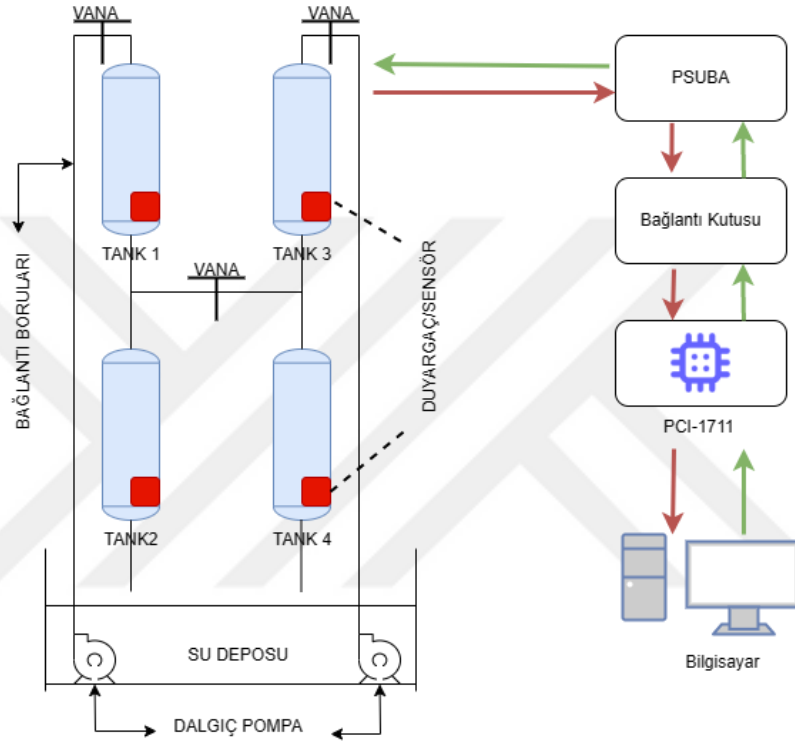


**Şekil 2.1.3:** Tank Sisteminin Şematik  
Gösterimi

Şekil (2.1.2) ve Şekil (2.1.3) incelenirse, sıvı seviye denetimi için kullanılan birleştirilmiş sıvı tank sisteminin deneysel set düzeneği birbirine borularla bağlanmış olan dört adet tank ve en altta ise suyu depolamak için kullanılan su deposu tankı (rezervuar) bulunmaktadır. Su deposunun en altında iki adet dalgıç pompa bulunmaktadır. Dalgıç pompalar, depoda bulunan suyu bağlantı boruları sayesinde Tank (1) ve Tank (3) aktarabilmektedir. Bu da sistemin MIMO veya iki girişli iki çıkışlı (TITO-Two Input Two Output) olduğunu göstermektedir. Sistemde bulunan borular üzerinde ise çeşitli düzenlemeler yaparak farklı deneyler yapmamıza yardımcı olan vanalar bulunmaktadır. Şekil (2.1.3)' te gösterilen dört tankın altında bulunan duyargaçlar, tanklarda bulunan sıvı seviyesinin hassas ölçülmesine olanak sağlayarak denetim düzeneğinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Birleştirilmiş sıvı tank sistemi, mekanik ve elektronik parçaları içinde barındıran bir sistemdir. Sistem içinde, su basıncı seviyesi sinyalini yükselten ve bunu PCI-1711 kartına analog bir işaret olarak ileten güç kaynağı ünitesi ve güç yükseltici olarak görev yapan PSUBA (Power Supply + Power Amplifier) birimi ile kablo bağlantı kutusu bulunmaktadır [22-23]. Sistemin çalışması için dalgıç pompalara bir kontrol sinyali bilgisayar tarafından üretilerek, elektronik kart olan PCI-1711 kartı ve PSUBA birimleri yardımıyla sinyal aktarımı pompalara sağlanmaktadır. Modern dünyada sayısal hesaplamalar dahil olmak üzere birçok kolaylık sağlayan bilgisayarlar yapısı gereği dijital işaretler üretebilirler; bu üretilen işaretin analog olarak iletilmesi için Analog-Dijital (AD) dönüştürücüler sıklıkla

kullanılmaktadır. Tam tersi durum için ise analog olarak elde edilen bir sinyalin dijital bir ortamda değerlendirilmesi durumunda ise Dijital-Analog (DA) dönüştürücüler kullanılmaktadır. Tank sistemimiz de bu durum PCI-1711 ve PSUBA birimi yardımlarıyla sağlanmaktadır. 0V-5V arasında olan kontrol sinyalleri, PSUBA biriminde 24V pwm sinyaline dönüştürülerek dalgıç pompalar çalıştırılır [23]. Birleştirilmiş sıvı tank sisteminin, mekanik ve elektronik donanımları ve bunlar arasındaki ilişkisi Şekil (2.1.4)' te gösterilmiştir.



**Şekil 2.1 4:** Sıvı Tank Sisteminin Mekanik ve Elektronik Parçaları İlişkisi

## 2.2 Sistemin Matematiksel Modeli

Kontrol sistemlerinin tasarlanması ve çözümlenmesi için sistemin fiziksel davranışlarından yola çıkarak, sistemin matematiksel modeli elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, belirli bir işin gerekliliklerine bağlı olarak önce bir fiziksel modelin tanımlanması gerekir ve bu fiziksel model davranışı, matematiksel çözümleme tekniklerini uygulayabilmek için matematiksel olarak tanımlanmalıdır [24].

Kontrol ve kumanda sistemlerinde kullanılan matematiksel modelleri oluşturmak için sistemin yapısı ve özelliklerine göre çeşitli teknikler kullanılabilir. Bir kontrol

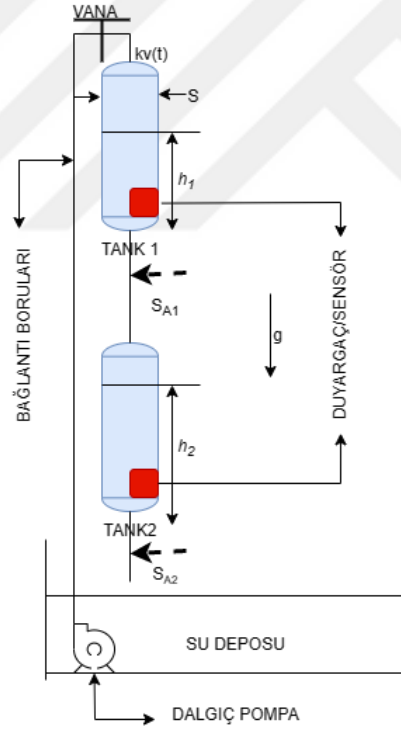
sisteminin çözümlenmesi ve denetiminin sağlanması için gerçeğe yakın düzgün bir matematiksel model elde edilmesi çok önemli bir durumdur.

Bu bölümde birleştirilmiş iki tanklı kontrol sisteminin doğrusal olmayan modeli [22-23] ve MATLAB/SIMULINK' de bulunan Sistem Tanımlama Aracı kullanılarak Laplace uzayında elde edilen doğrusal modelleri sunulmuştur.

### 2.2.1 İki Tanklı Sistemin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modeli

Birleştirilmiş ikili tank sistemi Şekil (2.2.1.1)' de gösterilmiştir. Gösterilen bu model doğrusal olmayan bir modeldir ve sıvı seviyesi ( $h$ ) veya sürücü akımı ( $i$ )' den en az birinin doğrusal olmadığı anlamı taşımaktadır [23].

Şekil (2.2.1.1)' de gösterilen ikili tank sisteminin en temel doğrusal olmayan modeli; dalgıç pompaya uygulanan gerilim ( $v$ ) ile Tank (1)' de bulunan sıvı seviyesi ( $h_1$ ) ve Tank (2)' de bulunan sıvı seviyesi ( $h_2$ ) arasındaki ilişkiden türetilebilir [22-23].



Şekil 2.2.1.1: İkili Sıvı Tank Sisteminin Modeli

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{S_{A1}}{S} \sqrt{2gh_1(t)} + kv(t) \quad (2.2.1.1)$$

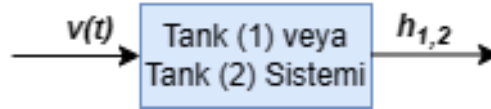
$$\frac{dh_2(t)}{dt} = -\frac{S_{A1}}{S} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{S_{A2}}{S} \sqrt{2gh_2(t)} \quad (2.2.1.2)$$

Şekil (2.2.1.1)' de sunulan ikili sıvı tank sisteminin doğrusal olmayan matematiksel modeli, Denklem (2.2.1.1) ve Denklem (2.2.1.2)' de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan matematiksel modelinde bulunan terimlerin açıklaması Çizelge (2.2.1.1)' de ifade edilmektedir.

**Çizelge 2.2.1.1:** İkili Tank Sisteminin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modelini Temsil Eden Parametrelerin Açıklaması

|       |   |          |                                      |
|-------|---|----------|--------------------------------------|
| $k$   | Gerilimle bağlantılı sabit              | $S_{A1}$ | Tank (1)'in çıkış borusu kesit alanı |
| $h_1$ | Tank (1)' de bulunan sıvının yüksekliği | $S_{A2}$ | Tank (2)'in çıkış borusu kesit alanı |
| $h_2$ | Tank (2)' de bulunan sıvının yüksekliği | $S$      | Tankların Kesit Alanı                |
| $g$   | Yerçekimi Sabiti                        |          |                                      |

Denklem (2.2.1.1) ve Denklem (2.2.1.2)' de gösterilen matematiksel model için Tank (1) ve Tank (2)' de bulunan sıvı seviyesi sistemin çıkışı olurken, sistemin girişi kontrol gerilim sinyalini ifade etmektedir. Kontrol gerilim sinyali (0V-5V) arasında olan bir sinyaldir. Tank (1) veya Tank (2)' de bulunan sıvı seviyesi denetimi SISO bir sistemi ifade etmektedir. Bu durumu ifade eden blok diyagram Şekil (2.2.1.2)'de sunulmuştur.



**Şekil 2.2.1.2:** SISO Tank (1) veya Tank (2) Sisteminin Blok Diyagramı

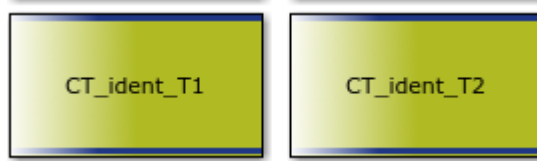
Kontrol sistemlerinde bir sistemin denetimi yapılırken genelde, sistemin doğrusal matematiksel modelinden yararlanmak tasarım ve matematiksel işlemlerde birçok kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle birçok mühendis ve araştırmacı çalışmalarında doğrusal matematiksel modelleri kullanmaktadırlar. Bölüm (2.2.2)' de Tank (1) ve Tank (2) sisteminin ayrı ayrı Laplace uzayında doğrusal matematiksel modelleri gösterilmiştir.

## 2.2.2 Tank (1) ve Tank (2) Sistemi İçin Laplace Uzayında Doğrusal Matematiksel Modeli

Gerçek sistemler genellikle doğrusal değildir bu nedenle doğrusal olmayan sistemlerde, sistemin matematiksel modeli elde edilirken doğrusallaştırma tekniklerinden yararlanır. Doğrusal olmayan bir sistem, bir denge noktasında çalışabiliyorsa, sistemi



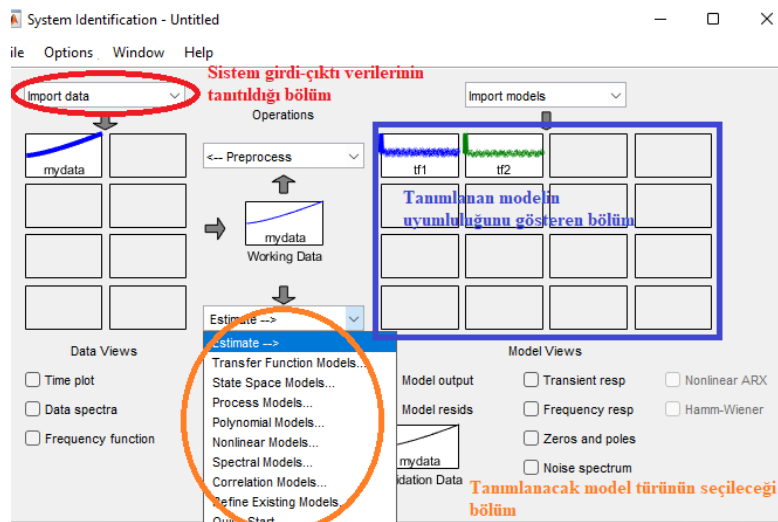
doğrusallaştırmak mümkün olabilir. Hiç şüphesiz doğrusallaştırma da en temel yöntem Taylor serilerinden yararlanmaktadır [25]. Feedback Instruments Ltd. tarafından tasarlanan birleştirilmiş sıvı tank sistemi bilgisayarla ve MATLAB/SIMULINK ile uyumlu çalışan bir sistemdir. MATLAB/SIMULINK ortamında, Tank (1) ve Tank (2) için ayrı ayrı model tanımlama çalışması yapmamız için Şekil (2.2.2.1)' de gösterilen arayüz kullanılır. Bu nedenle elde edilen matematiksel modeller, model tanımlama deneyi ile birlikte MATLAB/SIMULINK' de bulunan sistem tanımlama aracı kullanılarak elde edilmiştir.



**Şekil 2.2.2.1:** Tank (1) ve Tank (2) için Model Tanımlama Deneyi İçin MATLAB/SIMULINK Arayüzü

Sistem tanımlama aracı, ölçülmüş veriye dayalı dinamik bir sistemin matematiksel modelini oluşturmaya yarayan bir araçtır [26]. Bu matematiksel modeller, kontrol sistemlerinin tasarımında, analizinde ve diğer uygulama alanlarında kullanılabilir. Tank sistemimiz için transfer fonksiyonuna dayalı model tanımlama işlemi Şekil (2.2.2.1) kullanılarak bir giriş-çıkış sinyalleri veri kümesi yardımıyla yapılır.

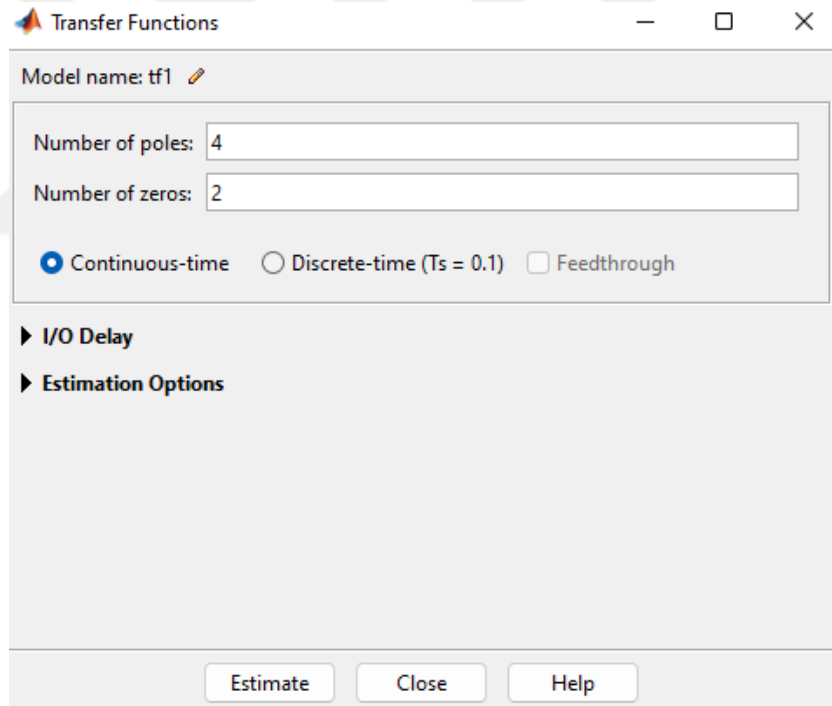
Sistemi en iyi tanımlayan modeli bulabilmek için sistem tanımlama deneyinde elde edilen sistemin giriş ve çıkış değerlerinin bulunduğu veri dizini, çalışma alanından uygulama alanına aktarılır. Şekil (2.2.2.2)'de gösterilen uygulama alanını açmak için "ident" komutu kullanılabilir. Bu komut sistem tanımlama aracı arayüzünü açacaktır.



**Şekil 2.2.2.2:** Sistem Tanımlama Aracı Arayüzü

Şekil (2.2.2.2) incelenirse sistemimiz için giriş ve çıkış verilerinin girildiği bölüm kırmızı ile gösterilmiştir. Turuncu olan kısım sistemimiz için seçeceğimiz modelleri göstermektedir. Mavi olan bölüm ise sistem tarafından tasarlanan modeli gösterir ve gerçek sistem ile uyumluluğunu grafiksel olarak tasarımcıya sunar.

Sistem tanımlama aracı çeşitli model tanımlamaları yapmamıza olanak sağlayan kullanıcı dostu bir araçtır. Tank (1) ve Tank (2) sistemimizin Laplace uzayında doğrusal matematiksel modeli elde etmek için Transfer Fonksiyonu Modeli (Transfer Function Models) seçilmesi gerekmektedir. Şekil (2.2.2.3)' te sistemin kutup sayısı ve sıfırları tahmini olarak seçildiği pencere gösterilmektedir ve tahmini olarak belirlenen sayılara göre sistem matematiksel modeli üretir. Sistemimiz için en uygun matematiksel model bulunana kadar bu işlem devam ettirilmelidir. Eğer sistem için uygun matematiksel model seçilmezse bu ilerleyen denetleyici tasarımında hatalara sebep olacaktır bu durum kontrol mühendisleri ve araştırmacılar için istenmeyen bir durumdur.



**Şekil 2.2.2.3:** Sistemin Laplace Uzayında Matematiksel Modelinin Kutup ve Sıfırlarının Belirlenmesi

Yukarıda bahsedilen bilgiler ışığında Tank (1)' in matematiksel modeli Denklem (2.2.2.1)' de gösterilmiştir. Tank (2) sistemi için denetleyici tasarımlarında kullanılan yöntemsel farklılıkların getirdiği bazı durumlar nedeniyle iki ayrı matematiksel model

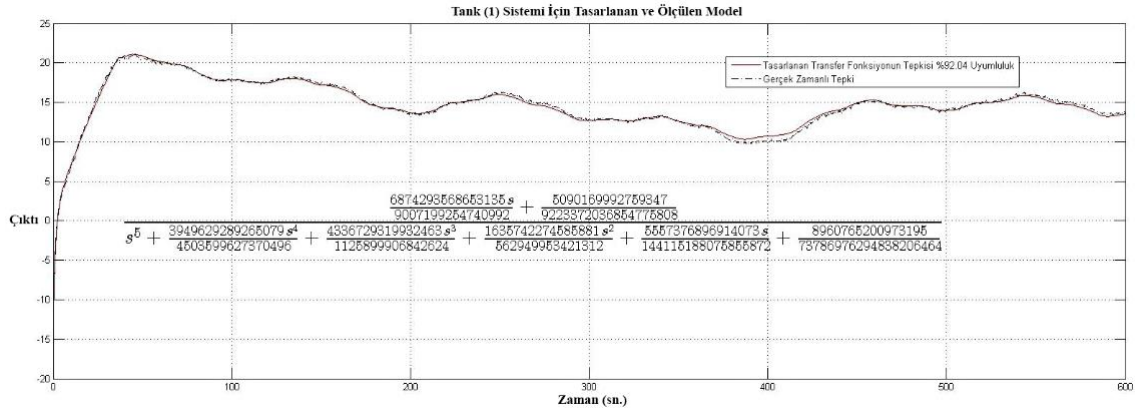
oluşturulmuştur. Tank (2) için elde edilen matematiksel modeller Denklem (2.2.2.2) ve Denklem (2.2.2.3)' te gösterilmiştir.

$$G_{1-1}(s) = \frac{0.7632s + (5.52).10^{-4}}{s^5 + 0.877s^4 + 3.8518s^3 + 3s^2 + 0.0385s + (1.214).10^{-4}} \quad (2.2.2.1)$$

$$G_{2-1}(s) = \frac{43.8s^2 + 42.87s + 25.43}{s^4 + 3.401s^3 + 6.431s^2 + 5.219s + 5.86} \quad (2.2.2.2)$$

$$G_{2-2}(s) = \frac{0.08025s^3 + 0.05212s^2 + 0.005315s + (8.97).10^{-4}}{s^5 + 0.4857s^4 + 0.2553s^3 + 0.02276s^2 + 0.003971s + (1.247).10^{-5}} \quad (2.2.2.3)$$

Tank (1) sistemini ifade eden Denklem (2.2.2.1) sistem tanımlama aracı tarafından gerçek sistem ile uyumluluğu, %92.04 olarak belirlenmiştir. Şekil (2.2.2.4)' te kırmızı olan eğri tasarlanan sistemi gösterirken siyah olan eğri gerçek sistemi ifade etmektedir.

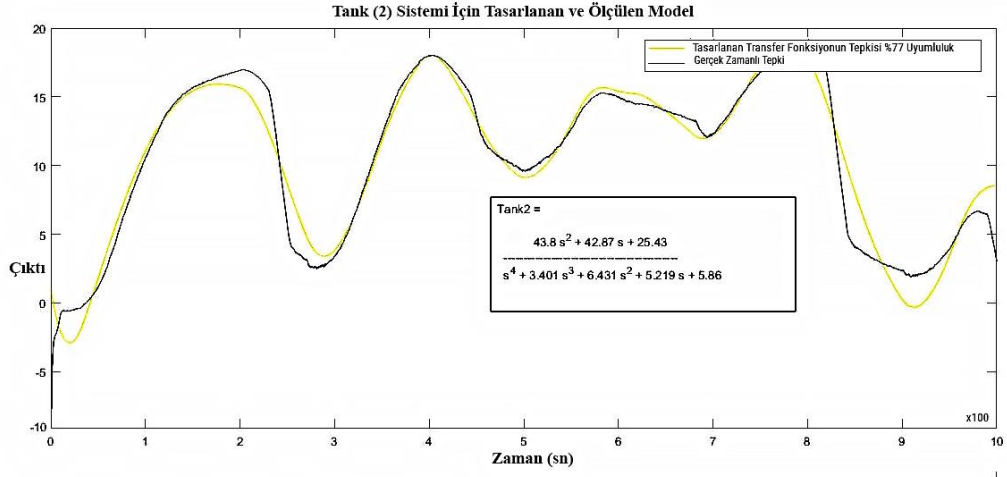


**Şekil 2.2.2.4:** Tank (1) İçin Tasarlanan ve Ölçülen Model Çıktısı

**Kırmızı:** Tasarlanan Model

**Siyah:** Gerçek Model

Denklem (2.2.2.2), Tank (2) sistemimiz için tasarlanan ilk modeli temsil etmektedir. Bu matematiksel modelin uyumluluğu Şekil (2.2.2.5)'te gösterilmiştir. Şekil (2.2.2.5) incelenirse sistemde siyah gerçek sistemi sarı tasarlanan model eğrisini göstermektedir ve sistemin uyumluluğu, %77 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 2.2.2.5:** Tank (2) İçin İlk Tasarlanan ve Ölçülen Model Çıktısı

**Sarı:** Tasarlanan Model

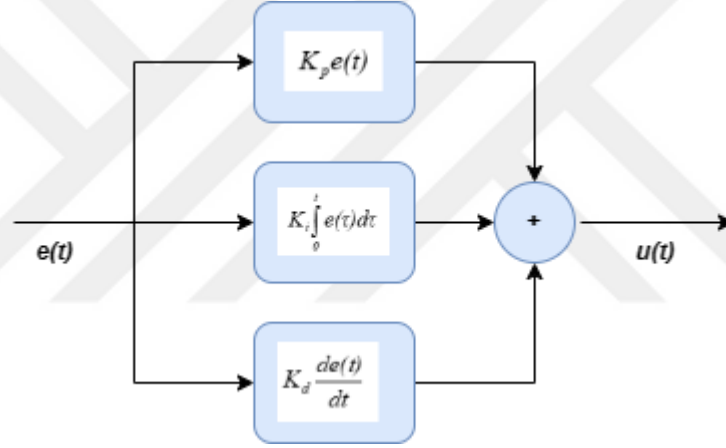
**Siyah:** Gerçek Model

### 3. PI/PID DENETLEYİCİ VE DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN AYARLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

#### 3.1 PI/PID Denetleyici

PID denetleyiciler süreç endüstrisinde en çok kullanılan denetleyicidir. PID, İngilizce “Proportional+Integral+Derivative” kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Türkçe 'ye “Oransal+Tümlevsel+Türevsel” denetleyici olarak çevrilebilir.

PID denetleyiciler kolay ayarlanabilir oluşundan, istenen referans sinyaline iyi bir tepki verebilmesinden ve farklı sistemlere çok rahat bir şekilde uygulanabildiğinden otomatik kontrol sistemlerinde ve endüstriyel alanlarda en çok tercih edilen denetleyici türüdür.



Şekil 3.1.1: PID Denetleyicinin Blok Diyagramı

PID denetleyicinin temsili blok diyagramı Şekil (3.1.1)' de gösterilmiştir. Blok diyagrama bağlı olarak matematiksel modeli Denklem (3.1.1) ile ifade edilebilir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1.1)$$

PID denetleyicinin Laplace uzayında matematiksel modelini bulmak için Denklem (3.1.1)'de gösterilen ifadenin Laplace dönüşümü öncelikle alınmalıdır. Daha sonra sistemin çıkışının sistemin girişine oranı ile transfer fonksiyonu elde edilir. Denklem (3.1.2) ve Denklem (3.1.3)' te gösterildiği üzere, elde edilen transfer fonksiyonu PID denetleyicisinin Laplace uzayında matematiksel ifadesini belirtmektedir.

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad (3.1.2)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.1.3)$$

Denklem (3.1.3)' te gösterilenden farklı olarak literatürde PID denetleyici zaman sabitleri türünden de ifade edilebilir. Bunun için Denklem (3.1.3)' de “ $K_i=K_p/T_i$ ” ve “ $K_d=K_p T_d$ ” yazarsak PID denetleyicinin zaman sabitleri türünden matematiksel ifadesi Denklem (3.1.4)' te gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$G_{PID}(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (3.1.4)$$

Denklem (3.1.3) ve Denklem (3.1.4)' te sunulan matematiksel terimlerin açıklaması Çizelge (3.1.1)' de ifade edilmiştir.

**Çizelge 3.1.1: PID Denetleyicinin Parametrelerinin Açıklaması**

|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| $K_p$ : | Oransal Kazanç                    |
| $K_i$ : | Tümlevsel (İntegral) Kazanç       |
| $K_d$ : | Türevsel Kazanç                   |
| $T_i$ : | Tümlevsel (İntegral) Zaman Sabiti |
| $T_d$ : | Türevsel Zaman Sabiti             |

Şekil (3.1.1)' de gösterildiği gibi; hata sinyali PID denetleyici tarafından değerlendirilir. Hata sinyali verileri, denetleyici tarafından belirli bir oransal değerde, zamanın integrali ve türeviyle toplanarak çıkışı hesaplar. Denetleyicinin düzgün ve verimli çalışması bu üç bileşene bağlıdır. PID denetleyicinin üç bileşeninin (Oransal Bileşen, Tümlevsel Bileşen ve Türevsel Bileşen), sistem üzerinde etkileri şu şekilde ifade edilebilir:

- **Oransal Bileşen (P):** Oransal bileşen, hata sinyalinin anlık değerine göre çıkışı ayarlar. Oransal bileşen sistemin kararlılığını arttırmada etkilidir fakat sistemde aşırı yükselmeye sebep olabilir.
- **Tümlevsel Bileşen (I):** Tümlevsel bileşen, hatayı zaman içinde birikmesini sağlayarak hesaplamasını gerçekleştirir ve yavaş tepkili bir sistemde hatanın sıfıra doğru ilerlemesinde etkili olur.
- **Türevsel Bileşen (D):** Türevsel bileşen hata sinyalinin hızını tespit ederek sistemin denetimini sağlar. Kontrol edilen değişkenin hızındaki değişime göre çıkış sinyalini ayarlayan bir yapıya sahiptir.

PID denetleyicinin özel durumları ise PI ve PD denetleyicilerdir. Denklem (3.1.3)' te ifade edilen PID denetleyicinin matematiksel modelinde türevsel kazanç " $K_d=0$ " olması durumunda denetleyici PI (Oransal+Tümlevsel) denetleyiciyi ifade ederken tümlevsel kazanç " $K_i=0$ " olması durumunda PD (Oransal+Türevsel) denetleyici ifade etmektedir. PI denetleyicinin matematiksel ifadesi Denklem (3.1.5)' te, PD denetleyicinin matematiksel ifadesi Denklem (3.1.6)' da gösterilmiştir.

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.1.5)$$

$$G_{PD}(s) = K_p + K_d s \quad (3.1.6)$$

PID denetleyicinin kazanç parametreleri ( $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$ ) arttırmanın birim basamak tepkisi üzerindeki etkileri Çizelge (3.1.2)' de gösterilmiştir [1].

**Çizelge 3.1.2:** Birim Basamak Tepkisinde PID Denetleyici Parametrelerinin Sistem Üzerinde Etkisi

| <b>PID Kazanç Parametreleri</b> | <b>Yüzde Aşım</b> | <b>Yatışma Zamanı</b> | <b>Kalıcı Hâl Hatası</b> |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| $K_p \uparrow$ (Arttırma)       | Arttırır          | Etkisi azdır          | Azaltır                  |
| $K_i \uparrow$ (Arttırma)       | Arttırır          | Arttırır              | Azaltır                  |
| $K_d \uparrow$ (Arttırma)       | Azaltır           | Azaltır               | Etkisi olmaz             |

PID denetleyiciyi tasarlamak için oransal kazanç, tümlevsel kazanç ve türevsel kazanç parametrelerinin ayarlanması gerekir, benzer şekilde PI denetleyici için oransal ve tümlevsel kazanç parametrelerinin ayarlanması gerekir. Yukarıda verilen bilgiler ışığında ve Çizelge (3.1.2)' de özet olarak belirtildiği üzere parametrelerin sistem üzerinde çeşitli etkileri olmaktadır. Bu nedenle denetleyici parametrelerinin ayarlanması önemli bir durumdur. Denetleyici parametrelerinin ayarlanması için çeşitli yöntemler vardır. Ayarlama konusunda en yaygın yaklaşım, deneme yanılma yöntemiyle analitik olmayan elle ayarlama yöntemidir [1]. Fakat bu yöntem zaman alabilir ve düzgün bir sonuç vermeyebilir. Bu nedenle araştırmacılar daha çok analitik, son zamanlarda akıllı algoritmaların hâkim olduğu metasezgisel yöntemler veya her ikisinin katışımı olan melez yöntemler kullanılmaya başlamıştır.

Bu tez kapsamında, birleştirilmiş tank sisteminin minimum hata ile denetimini sağlamak amacıyla PI/PID denetleyicinin parametreleri aşağıda belirtilen üç yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler:

- Ziegler-Nichols Yöntemi
- Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi
- Genetik Algoritma Yöntemi

## 3.2 Birleştirilmiş Tank Sistemi için Denetleyici Tasarımında Kullanılan Yöntemler

### 3.2.1 Ziegler Nichols Yöntemi Kullanarak Tasarım

Bir kontrol sisteminin denetimini sağlamak için, PID denetleyicinin parametrelerinin en iyi şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle Ziegler ve Nichols kendi adlarında bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem Ziegler-Nichols yöntemi olarak anılmaktadır.

Ziegler-Nichols ile PID denetleyici tasarımı için genelde iki yöntem kullanılır [25]:

- *Yöntem Bir (Açık Çevrim Sistem Tepkisi Kullanarak Ziegler-Nichols PID Ayarlama Yöntemi):*

Birinci yöntem açık çevrim sistem tepkisi kullanarak Ziegler-Nichols PID ayarlama yöntemi olarak da bilinir. Bu yöntem de açık çevrim bir sisteme deneysel olarak birim basamak girişi verilir ve sistem girişine karşı çıkışı “S” şeklinde genel bir görünümle tepki veriyor ise uygulanabilir. Sistemin tepkisi eğer “S” eğrisi biçiminde genel bir görünüme sahip değilse bu yöntem uygulanamaz. Açık çevrim Ziegler-Nichols yöntemiyle PID denetleyici ayarlamak için, sistem cevabının büyüklüğünü temsil eden “M”, tepki oranı “R”, zaman sabiti “T” ve son olarak gecikme zamanı “L” parametreleri kullanılır.

“M, T ve L” parametrelerini belirlemek sistemin açık çevrim birim basamak tepkisi grafiği gözlemlenmelidir. Tepki oranı “R” Denklem (3.2.1.1) kullanılarak hesaplanır ve bu parametreler yardımıyla, P denetleyici, PI denetleyici ve PID denetleyici parametreleri hesaplanabilir. Açık çevrim sistem tepkisi kullanarak Ziegler-Nichols ayarlama yöntemiyle denetleyici parametrelerinin hesaplanması Çizelge (3.2.1.1) kullanılarak elde edilir [1,25].

$$R = \frac{M}{T} \quad (3.2.1.1)$$



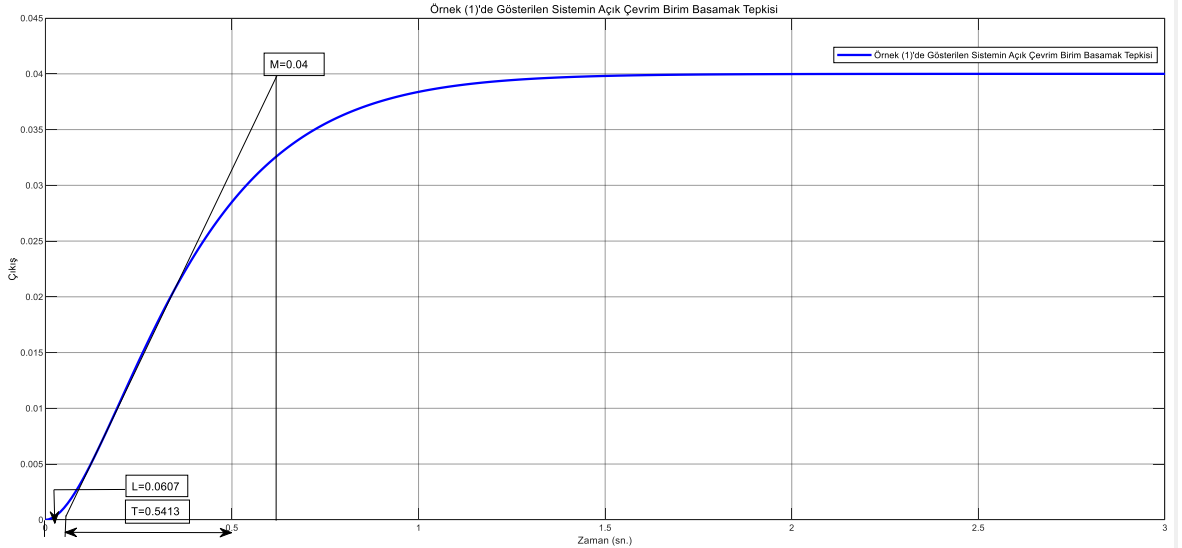
**Çizelge 3.2.1.1:** Ziegler-Nichols Yöntem 1 İçin P, PI, PID Denetleyici Parametrelerinin Hesaplamada Kullanılacak Çizelge

| Denetleyici Türü | $K_p$            | $K_i$               | $K_d$           |
|------------------|------------------|---------------------|-----------------|
| P Denetleyici    | $\frac{1}{RL}$   | Yok                 | Yok             |
| PI Denetleyici   | $\frac{0.9}{RL}$ | $\frac{0.27}{RL^2}$ | Yok             |
| PID Denetleyici  | $\frac{1.2}{RL}$ | $\frac{0.6}{RL^2}$  | $\frac{0.6}{R}$ |

Açık çevrim sistem tepkisi kullanılarak Ziegler-Nichols PID ayarlama yönteminin (Yöntem 1) anlaşılması adına basit bir örnek gösterilmiştir.

### Örnek 1:

Örnek (1) için, sistemimizin Laplace uzayında matematiksel modeli  $G(s) = 1/(s^2 + 10s + 25)$  olarak seçilmiştir. Sisteme MATLAB/SIMULINK uygulaması yardımıyla elde edilen açık çevrim birim basamak tepkisi Şekil (3.2.1.1)'de gösterildiği gibi "S" şeklinde bir eğridir ve bu yöntemi uygulamak için idealdir.



**Şekil 3.2.1.1:** Örnek (1) İçin Sistemin Açık Çevrim Tepkisi

Şekil (3.2.1.1) incelenirse " $M=0.04$ ", " $L=0.0607$ " ve " $T=0.5413$ " olarak belirlenir. Daha sonra Denklem (3.2.1.1) kullanılarak tepki oranı " $R=0.074$ " olarak hesaplanmıştır. P,

PI ve PID denetleyicilerin parametrelerini belirlemek için Çizelge (3.2.1.1) yardımıyla şu şekilde hesaplanır:

- P Denetleyici

$$K_p = \frac{1}{RL} = \frac{1}{(0.074)(0.0607)} = 222.63$$

- PI Denetleyici

$$K_p = \frac{0.9}{RL} = \frac{0.9}{(0.074)(0.0607)} = 200.37$$

$$K_i = \frac{0.27}{RL^2} = \frac{0.27}{(0.074)(0.0607)^2} = 990.272$$

- PID Denetleyici

$$K_p = \frac{1.2}{RL} = \frac{1.2}{(0.074)(0.0607)} = 267.153$$

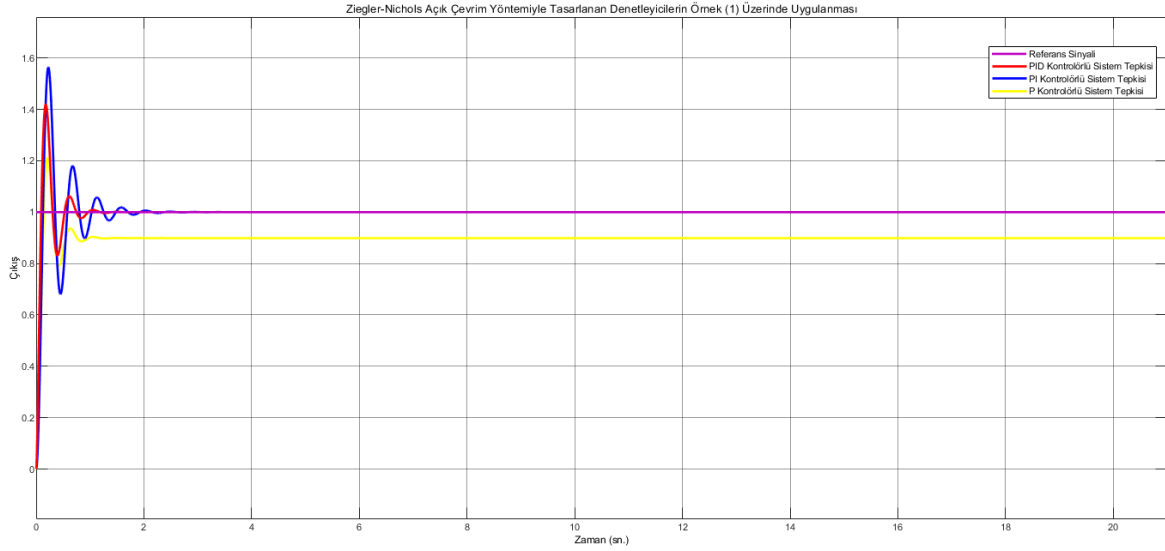
$$K_i = \frac{0.6}{RL^2} = \frac{0.6}{(0.074)(0.0607)^2} = 2200.61$$

$$K_d = \frac{0.6}{R} = \frac{0.6}{0.074} = 8.11$$

Örnek (1) için sistemin negatif birim geri beslemeli blok diyagramı Şekil (3.2.1.2)' de gösterilmiştir ve denetleyicilerin negatif birim geri beslemeli birim basamak tepkisine karşı verdiği tepki Şekil (3.2.1.3)' de sunulmuştur. Bu sistem için P denetleyici yetersiz kalmış ve kalıcı hâl hata ile sonuçlanmıştır fakat PI ve PID denetleyici kullanıldığında sistem referans sinyalini takip etmiştir. PID denetleyici PI denetleyiciye oranla referans sinyalini daha hızlı yakaladığı Şekil (3.2.1.3)' de görülmektedir.



Şekil 3.2.1.2: Örnek (1) İçin Negatif Birim Geri Beslemeli Sistemin Blok Diyagramı



**Şekil 3.2.1.3:** Ziegler-Nichols Açık Çevrim Yönteminin (Yöntem 1) Örnek (1) Üzerinde Uygulanması ve Denetleyicilerin Sistem Üzerinde Gösterdiği Etkisi

- *Yöntem İki (Kapalı Çevrim Sistem Tepkisi Kullanılarak Ziegler-Nichols PID Ayarlama Yöntemi):*

Kapalı çevrim sistem tepkisi kullanarak Ziegler-Nichols PID ayarlama yönteminde öncelikle sistemin integral kazancı ( $K_i$ ) ve türev kazancı ( $K_d$ ) sıfır olarak kabul edilir ve oransal kazanç ( $K_p$ ) parametresi üzerinde değişiklikler yaparak sistemi kritik kararlı yapacak değer belirlemeye yönelik bir çalışma yapılmalıdır.

Sistemi kritik kararlı yapacak kazanç değerini bulmak için çeşitli yöntemler vardır. Sistemi kritik kararlı yapacak kazanç değeri en kolay şekilde, sistemin kök yer eğrisi elde edilerek bulunabilir. Kök yer eğrisinde sanal ekseni kesen ( $j\omega$ -ekseni) kazanç değeri kritik kazanç değerini vermektedir. Kök yer eğrisinden bulunan kritik kazanç değeri kapalı çevrim bir sistemde P denetleyicinin parametresi olarak seçilirse sistem tepkisinde salınım olacaktır ve bu durum sistemin kritik kararlı olarak çalıştığını göstermektedir. Salınlı olan sistem tepkisinden yararlanarak kritik periyot belirlenebilir. Kritik periyot, salınlı olan sistem tepkisinde iki tepe arasında kalan zaman olarak ifade edilebilir.

Kapalı çevrim sistem tepkisi kullanarak Ziegler-Nichols PID ayarlama yönteminde (Yöntem 2), P, PI ve PID denetleyicilerin parametrelerini hesaplamak için Çizelge (3.2.1.2) kullanılabilir [1].

**Çizelge 3.2.1.2:** Ziegler-Nichols Yöntem 2 İçin P, PI, PID Denetleyici Parametrelerinin Hesabında Kullanılacak Çizelge

| Denetleyici Türü | $K_p$        | $K_i$                       | $K_d$                       |
|------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| P Denetleyici    | $0.5K_{cr}$  | Yok                         | Yok                         |
| PI Denetleyici   | $0.45K_{cr}$ | $\frac{0.54K_{cr}}{P_{cr}}$ | Yok                         |
| PID Denetleyici  | $0.6K_{cr}$  | $\frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}}$  | $\frac{0.6K_{cr}P_{cr}}{8}$ |

Çizelge (3.2.1.2)' de gösterilen " $K_{cr}$ " kritik kazanç ifade ederken, " $P_{cr}$ " kritik periyot değerini temsil etmektedir.

Kapalı çevrim sistem tepkisi kullanarak Ziegler-Nichols ayarlama yönteminin uygulanması Örnek (2)' de gösterilmiştir.

### Örnek 2:

Şekil (3.2.1.4)' te negatif birim geri beslemeli blok diyagramı verilen sistem ele alınmıştır. Sistemin Laplace uzayında matematiksel modeli  $G(s) = 1/(s^3 + 10s^2 + 44s)$  olarak verilmiştir.

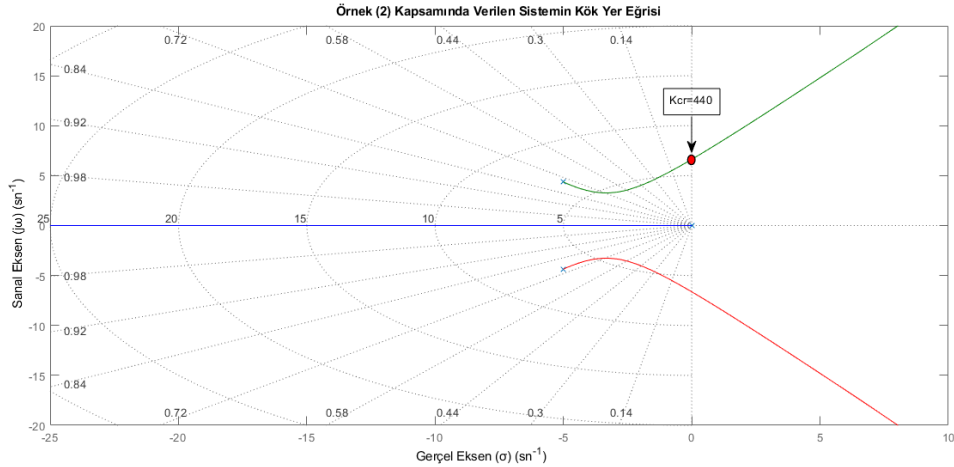


**Şekil (3.2.1.4):** Örnek 2 İçin Verilen Sistemin Blok Diyagramı

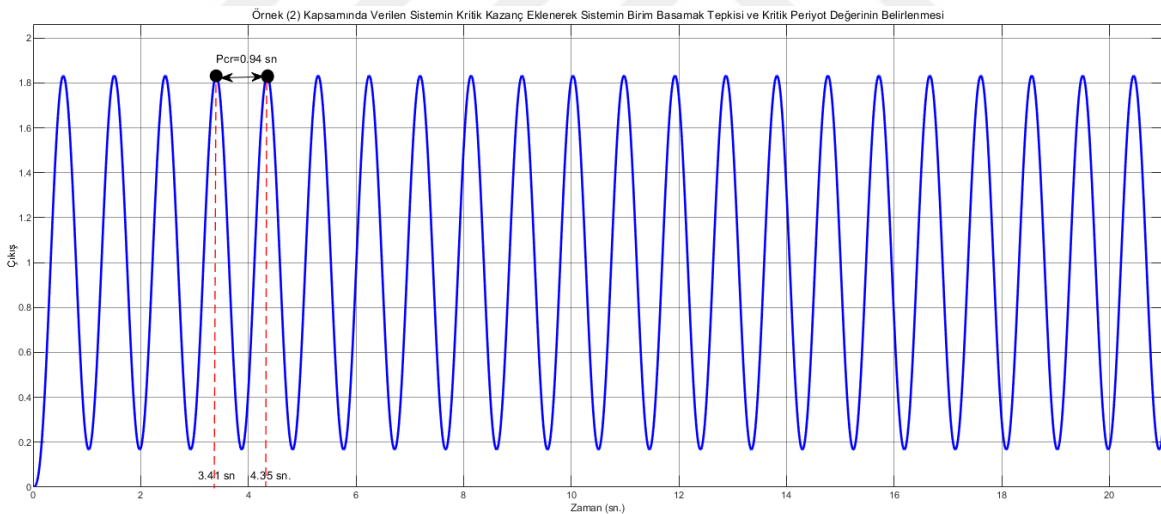
Öncelikle Şekil (3.2.1.4)' te gösterilen ve " $G(s)$ " olarak ifade edilen matematiksel modelin kök yer eğrisi çizdirilir ve sanal eksenı kesen noktadan kritik kazanç değeri " $K_{cr}$ " Şekil (3.2.1.5)' te gösterildiği gibi kolaylıkla belirlenir. Daha sonra Şekil (3.2.1.4)' te denetleyiciyi ifade eden " $G_c(s)$ " P denetleyici olarak düşünülür ve oransal kazanç " $K_p$ " yerine kritik kazanç değeri yazılır ve sistemin tepkisi incelenir. Sistem tepkisi Şekil (3.2.1.6)' da gösterildiği gibi salınımlıdır ve sistemimizin kritik kararlı olduğunu ifade

etmektedir. Salınlımlı olan sistem tepkisinden iki tepe arasındaki zaman farkıyla kritik periyot " $P_{cr}$ " hesaplanmalıdır.

Örnek (2) için Şekil (3.2.1.5) ve Şekil (3.2.1.6) kullanarak kritik kazanç " $K_{cr}=440$ " ve kritik periyot " $P_{cr}=0.94$  sn." olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.2.1.5:** Örnek (2)' de Gösterilen Sistemin ( $G(s)$ ) Kök Yer Eğrisi  
**Kritik Kazanç: ( $K_{cr}=440$ )**



**Şekil 3.2.1.6:** Örnek (2)' de Gösterilen Sistemin Kritik Kazançlı Birim Basamak Tepkisi  
**Kritik Periyot: ( $P_{cr}=0.94$ sn)**

Belirlenen " $K_{cr}$ " ve " $P_{cr}$ " değerleri Çizelge (3.2.1.2) kullanılarak P, PI ve PID denetleyici parametreleri şu şekilde hesaplanabilir:

- P Denetleyici:

$$K_p = 0.5K_{cr} = (0.5).(440) = 220$$

- PI Denetleyici:

$$K_p = 0.45K_{cr} = (0.45).(440) = 198$$

$$K_i = \frac{0.54K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(0.54).(440)}{0.94} = 253$$

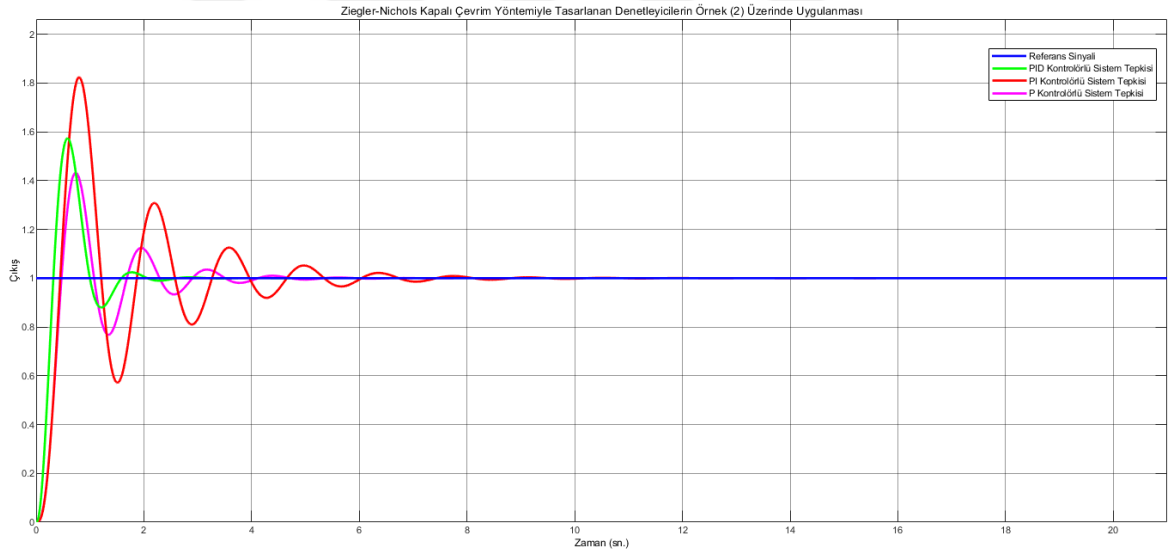
- PID Denetleyici:

$$K_p = 0.6K_{cr} = (0.6).(440) = 264$$

$$K_i = \frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(1.2).(440)}{0.94} = 562$$

$$K_d = \frac{0.6K_{cr}P_{cr}}{8} = \frac{(0.6).(440).(0.94)}{8} = 31$$

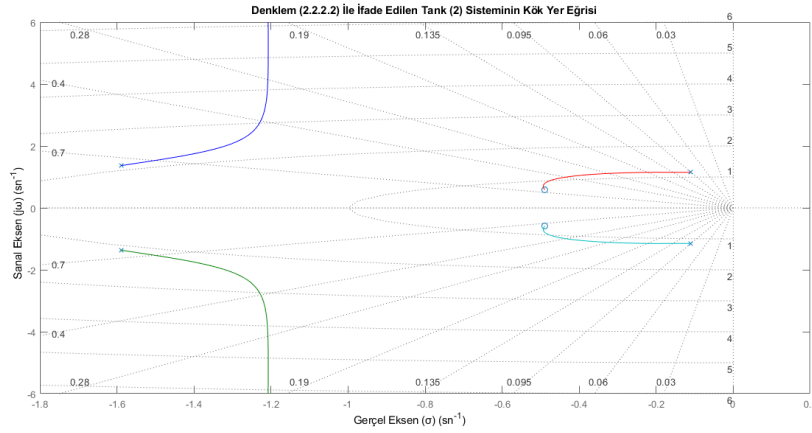
Örnek (2)' de tasarlanan P, PI ve PID denetleyicilerin kapalı çevrim negatif birim geri beslemeli “ $G(s)$ ” sisteminin birim basamak girişine karşı verdiği tepki Şekil (3.2.1.7)' de gösterilmiştir. Şekil (3.2.1.7) incelenirse denetleyicilerin üçü de sistemi kararlı kılmaktadır fakat P denetleyici PI denetleyiciye göre daha hızlı bir şekilde referans sinyalini izlerken PID denetleyici en iyi ve en hızlı şekilde referans sinyalini izlemiştir.



**Şekil 3.2.1.7:** Ziegler-Nichols Kapalı Çevrim Yönteminin (Yöntem 2) Örnek (2) Üzerinde Uygulanması ve Denetleyicilerin Sistem Üzerinde Gösterdiği Etkisi

Birleştirilmiş sıvı tank sistemin de Tank (1) ve Tank (2) sistemimiz için ayrı ayrı denetleyici tasarımında Ziegler-Nichols Kapalı Çevrim yöntemi kullanarak PID ayarlama yöntemi kullanılmıştır. Tank (1) ve Tank (2) sistemimizin Laplace uzayında matematiksel modeli sırasıyla Denklem (2.2.2.1) ve Denklem (2.2.2.3) de ifade edilen modeller kullanılmıştır. Tank (2) sisteminin Denklem (2.2.2.2)' de ifade edilen matematiksel modelin, Şekil (3.2.1.8)' de gösterilen kök yer eğrisi incelendiğinde kritik kazanç “ $K_{cr}$ ” değeri olmadığı gözlemlenebilir. Bu nedenle Ziegler-Nichols ayarlama yöntemine uygun değildir.

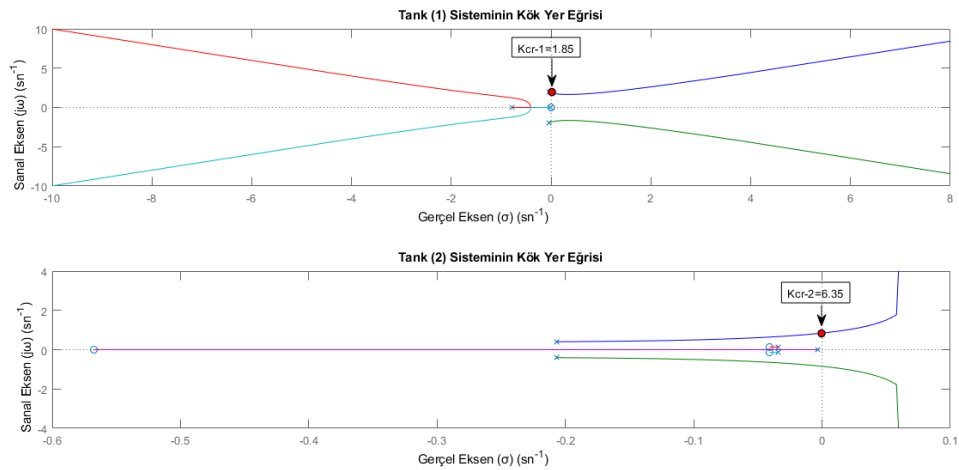
Ziegler-Nichols ile tasarım yapmak için Denklem (2.2.2.3) ile ifade edilen matematiksel model tercih edilmiştir.



Şekil 3.2.1.8: Denklem (2.2.2.2)' de İfade Edilen Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi

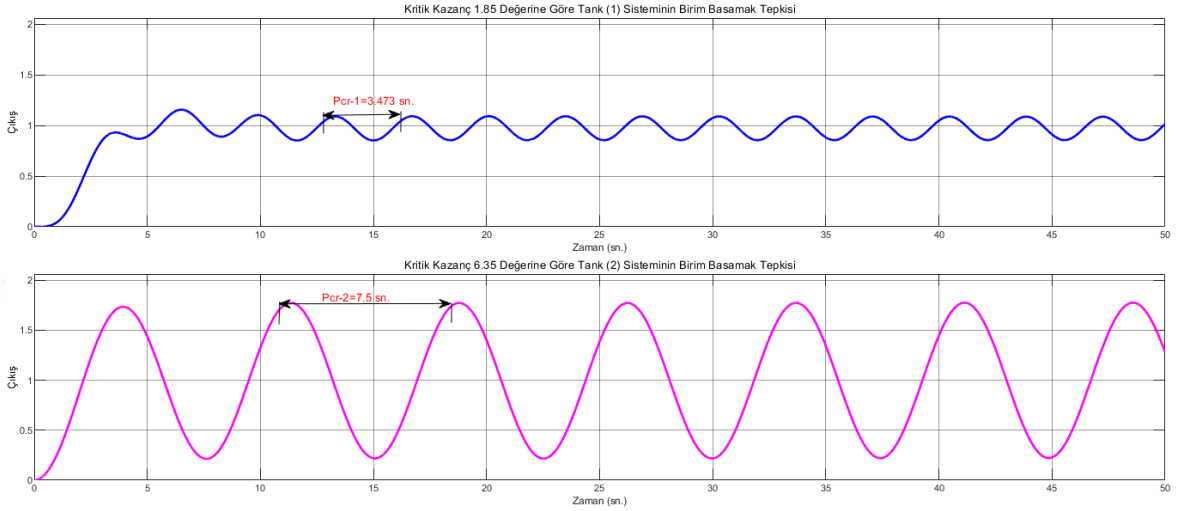
Tank (1) ve Tank (2) sistemi için Ziegler Nichols ayarlama yöntemiyle PI/PID denetleyici ayarlanması yukarıda verilen bilgiler ve Örnek (2) de gösterildiği gibi şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Tank (1) sistemi için Denklem (2.2.2.1) ve Tank (2) sistemi için Denklem (2.2.2.3)' de verilen matematiksel modellerin kök yer eğrisi çizdirilerek sistemi kritik kararlı yapacak " $K_{cr}$ " değeri belirlenir. Tank (1) sistemi için kritik kazanç değeri " $K_{cr-1}=1.85$ " Tank (2) sistemi için kritik kazanç değeri " $K_{cr-2}=6.35$ " olarak belirlenmiştir. Tank (1) ve Tank (2) sisteminin kök yer eğrisi Şekil (3.2.1.9)' da gösterilmiştir.



Şekil 3.2.1.9: Tank (1) ve Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi Grafiği  
( $K_{cr-1}=1.85$  ve  $K_{cr-2}=6.35$ )

- ✓ Kritik kazanç değerlerine göre (Tank (1) için  $K_{cr-1}$  Tank (2) için  $K_{cr-2}$ ) sistemlere ayrı ayrı birim basamak girişi uygulanarak sistem tepkisinde iki tepe arasındaki değer ölçülerek kritik periyot " $P_{cr}$ " belirlenmelidir. Şekil (3.2.1.10)' da negatif birim geri beslemeli Tank (1) ve Tank (2) sisteminin birim basamak tepkisi görülmektedir ve Tank (1) sistemi için kritik periyot " $P_{cr-1}=3.473$  sn." Tank (2) sistemi için kritik periyot " $P_{cr-2}=7.5$  sn." olarak belirlenmiştir.



**Şekil 3.2.1.10:** Negatif Birim Geri Beslemeli Tank (1) ve Tank (2) Sisteminin Kritik Kazanç Değerlerine Göre Birim Basamak Tepkisi

- ✓ Son olarak Kritik Kazanç ( $K_{cr}$ ) ve Kritik Periyot ( $P_{cr}$ ) değerlerine göre Çizelge (3.2.1.2) kullanılarak denetleyici tasarımı yapılabilir.

*Tank (1) Sistemi İçin:*

- Tank (1) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle P Denetleyici:

$$K_p = 0.5K_{cr} = (0.5).(1.85) = 0.925$$

- Tank (1) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle PI Denetleyici:

$$K_p = 0.45K_{cr} = (0.45).(1.85) = 0.8325$$

$$K_i = \frac{0.54K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(0.54).(1.85)}{3.473} \cong 0,3$$

- Tank (1) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle PID Denetleyici:

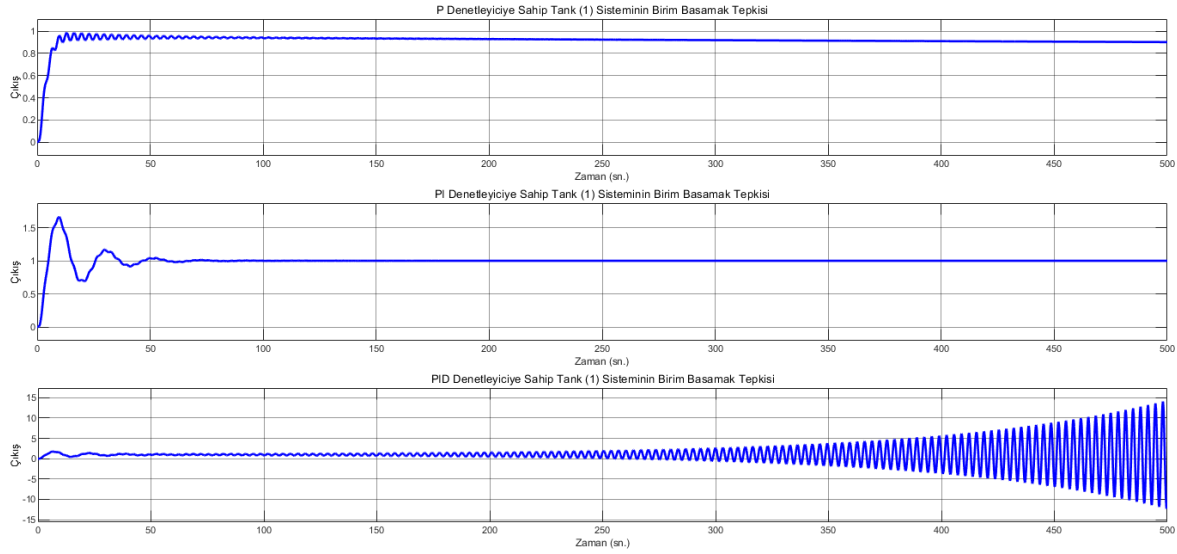
$$K_p = 0.6K_{cr} = (0.6).(1.85) = 1.11$$

$$K_i = \frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(1.2).(1.85)}{3.473} = 0.64$$

$$K_d = \frac{0.6K_{cr}P_{cr}}{8} = \frac{(0.6).(1.85).(3.473)}{8} \cong 0.5$$



Negatif birim geri beslemeye sahip Tank (1) sisteminin birim basamak referans girişine karşı sistemin benzetim tepkisi Şekil (3.2.1.11)' de gösterilmiştir. Şekil (3.2.1.11)' e göre P denetleyici sistemde kalıcı hâl hata ile sonuçlanırken, PID denetleyici sistemi kararsızlığa götürmüştür. Bu nedenle Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak denetleyici tasarımında Tank (1) sistemi için en verimli PI denetleyici olarak görülmektedir. Sistemin gerçek zamanlı sonuçları ve benzetim sonuçları Sonuçlar ve Öneriler bölümünde sunulmuştur.



**Şekil 3.2.1.11:** Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P, PI, PID Denetleyicilere Sahip Tank (1) Sistemi İçin Birim Basamak Girişine Göre Benzetimi

*Tank (2) Sistemi İçin:*

- Tank (2) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle P Denetleyici:

$$K_p = 0.5K_{cr} = (0.5).(6.35) = 3.175$$

- Tank (2) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle PI Denetleyici:

$$K_p = 0.45K_{cr} = (0.45).(6.35) = 2.8575$$

$$K_i = \frac{0.54K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(0.54).(6.35)}{7.5} = 0.4572$$

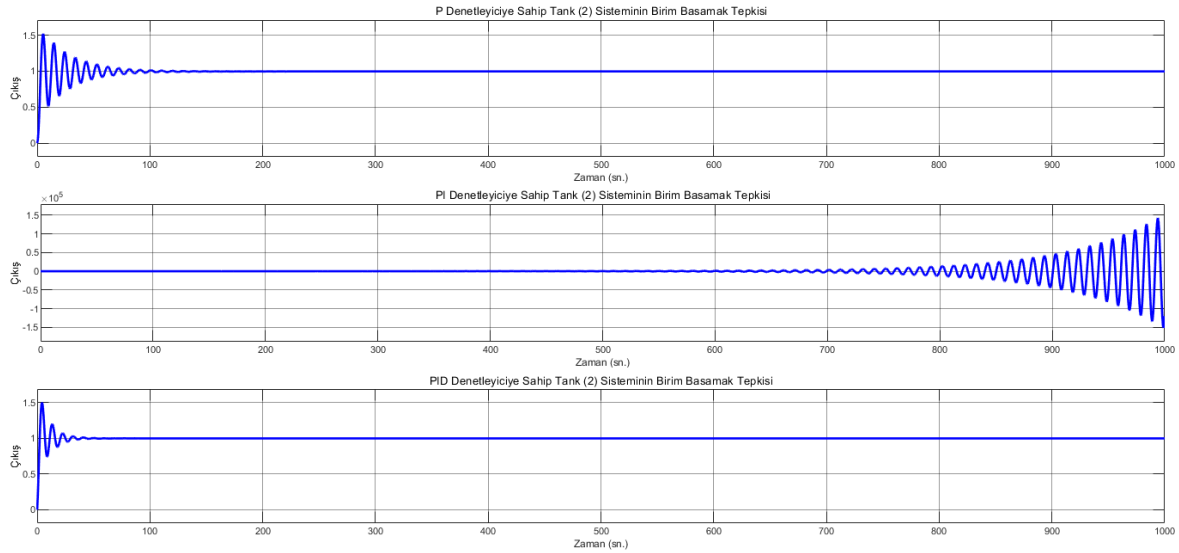
- Tank (2) Sistemi İçin Ziegler-Nichols Yöntemiyle PID Denetleyici:

$$K_p = 0.6K_{cr} = (0.6).(6.35) = 3.81$$

$$K_i = \frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}} = \frac{(1.2).(6.35)}{7.5} = 1.016$$

$$K_d = \frac{0.6K_{cr}P_{cr}}{8} = \frac{(0.6).(6.35).(7.5)}{8} = 3.571875$$

Şekil (3.2.1.12)'de Tank (2) sisteminin P, PI ve PID denetleyiciler kullanarak negatif birim geri beslemeli Tank (2) sisteminin birim basamak girişine göre tepkisi incelenmiştir. Buna göre P denetleyici ve PID denetleyici sistemi kararlı yaparken PI denetleyici sistemi kararsız kılmıştır. Bu nedenle Ziegler-Nichols yöntemiyle denetleyici tasarımında Tank (2) sistemimiz için gerçek zamanlı ve benzetim sonuçları P ve PID denetleyiciye göre alınarak Sonuçlar ve Öneriler bölümünde sunulmuştur.



**Şekil 3.2.1.12:** Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P, PI, PID Denetleyicilere Sahip Tank (2) Sistemi İçin Birim Basamak Girişine Göre Benzetimi

### 3.2.2 Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi Kullanarak PI Denetleyici Tasarımı

Kararlılık sınır eğrisi yöntemi, N.Tan ve diğerleri [27] tarafından geliştirilmiş ve sistemin kararlı olmasını sağlayan PI denetleyicinin, oransal kazanç " $K_p$ " ve tümlensel kazanç " $K_i$ " parametrelerine göre sınırını belirlemeye yarayan grafiksel bir yöntemdir.

Frekans analizi yapmak için Bode diyagramı vb. eğriler kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Kararlılık sınır eğrisi yöntemi; Bode diyagramı vb. eğrilerinin tersine frekans uzayında sistemi kararlı kılan eğriyi belirleme yarayan bir yöntemdir. Yöntem frekansa göre PI denetleyicilerin oransal kazanç " $K_p$ " ve tümlensel kazanç " $K_i$ " uzayında sistemin kararlılık sınırını belirlemektedir.

Bu yöntemi anlayabilmek için Şekil (3.2.1.4)'te verilen negatif birim geri beslemeli tek girişli tek çıkışlı sistemi ele alalım. Sistemde " $G_c(s)$ " olarak verilen denetleyici PI denetleyici olsun. PI denetleyicinin Laplace uzayında matematiksel modeli Denklem (3.1.5)'te verilmiştir. Kontrol sisteminde transfer fonksiyonu, sistemin çıkışının girişine oranı olarak tanımlanabilir. Buna göre Şekil (3.2.1.4)'te verilen sistemin transfer fonksiyonu Denklem (3.2.2.1) gösterildiği gibi yazılabilir.

$$H(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (3.2.2.1)$$

Transfer fonksiyonunun paydası sifira eşitlenirse, sistemin karakteristik denklemi Denklem (3.2.2.2)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta(s) = 1 + G_c(s)G(s) = 0 \quad (3.2.2.2)$$

Burada “ $G(s) = N(s) / D(s)$ ” olarak ifade edilebilir ve Denklem (3.2.2.2)' de ifade edilen karakteristik denklemin düzenlenmiş hali Denklem (3.2.2.3)'te sunulmuştur.

$$\Delta(s) = sD(s) + sN(s)K_p + N(s)K_i = 0 \quad (3.2.2.3)$$

Kararlılık sınır eğrisi yöntemi frekans uzayında uygulanan bir yöntemdir bu nedenle Laplace uzayından frekans uzayına geçmek için en kolay yöntem ( $s=j\omega$ ) eşitliğini uygulamaktır. Buna göre karakteristik denklem frekans uzayında Denklem (3.2.2.4)'te gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\Delta(j\omega) = j\omega D(j\omega) + j\omega N(j\omega)K_p + N(j\omega)K_i = 0 \quad (3.2.2.4)$$

Burada “ $D(j\omega) = R_D(\omega) + jI_D(\omega)$ ” ve “ $N(j\omega) = R_N(\omega) + jI_N(\omega)$ ” olarak temsil edilebilir. Karakteristik denklem üzerinden gerekli düzenlemeler yapılp, fonksiyonun gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı sifira eşitlenirse karşımıza iki bilinmeyenli iki denklem çıkar.

$$\omega R_D(\omega) + K_p \omega R_N(\omega) + K_i I_N(\omega) = 0 \quad (3.2.2.5)$$

$$-\omega I_D(\omega) - K_p \omega I_N(\omega) + K_i R_N(\omega) = 0 \quad (3.2.2.6)$$

Denklem (3.2.2.5) ve Denklem (3.2.2.6) çözülmesi sonucu frekansa bağlı oransal kazanç “ $K_p$ ” ve tümlevsel kazanç “ $K_i$ ” parametrelerinin matematiksel ifadesi sırasıyla Denklem (3.2.2.7) ve Denklem (3.2.2.8)' de gösterilmiştir. Bu ifadeler frekansın belli aralıklarında çizdirilerek “ $K_p$ - $K_i$ ” uzayında sistemi kararlı yapan sınırlar kolaylıkla tayin edilebilir.

$$K_p = -\frac{R_D(\omega)R_N(\omega) + I_D(\omega)I_N(\omega)}{[R_N(\omega)]^2 + [I_N(\omega)]^2} \quad (3.2.2.7)$$

$$K_i = \frac{\omega[R_N(\omega)I_D(\omega) - R_D(\omega)I_N(\omega)]}{[R_N(\omega)]^2 + [I_N(\omega)]^2} \quad (3.2.2.8)$$

Özellikle PI denetleyicinin “ $K_p$ ” ve “ $K_i$ ” parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan bu yöntem, kararlılık ve frekans cevabı özelliklerinin verimli şekilde denetiminde etkilidir.

Kararlılık sınır eğrisi kullanarak PI denetleyicinin tasarımına yönelik yöntemin anlaşılması için basit bir çalışma Örnek (3)'te sunulmuştur.

### Örnek 3:

Sistemimizin matematiksel modeli  $G(s) = 1 / (s^3 + 6s^2 + 5s)$  olarak verilsin. Sistemimizin blok diyagramı Şekil (3.2.1.4)' te gösterildiği gibi negatif birim geri beslemeli tek girişli tek çıkışlı bir sistemdir.

Denklem (3.2.2.7) ve Denklem (3.2.2.8) kullanarak sistemimizin frekansa bağlı " $K_p$ " ve " $K_i$ " parametreleri belirlenebilir. Öncelikle sistemimizin matematiksel modelini Laplace uzayından frekans uzayına geçirmek için ( $s=j\omega$ ) eşitliği kullanılır.

$$G(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{R_N(\omega) + jI_N(\omega)}{R_D(\omega) + jI_D(\omega)} = \frac{1}{-j\omega^3 - 6\omega^2 + 5j\omega}$$

Burada;

$$R_N(\omega) = 1, I_N(\omega) = 0$$

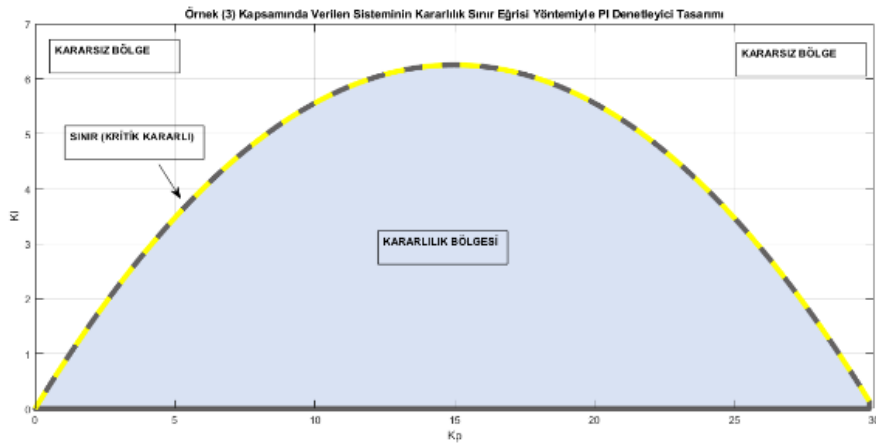
$$R_D(\omega) = -6\omega^2, I_D(\omega) = -\omega^3 + 5\omega$$

Denklem (3.2.2.7) kullanılarak oransal kazanç " $K_p$ " ve Denklem (3.2.2.8) kullanılarak tümlensel kazanç " $K_i$ " şu şekilde ifade edilebilir:

$$K_p = -\frac{R_D(\omega)R_N(\omega) + I_D(\omega)I_N(\omega)}{[R_N(\omega)]^2 + [I_N(\omega)]^2} = -\frac{-6\omega^2(1) + (-\omega^3 + 5\omega)(0)}{(1)^2 + (0)^2} = 6\omega^2$$

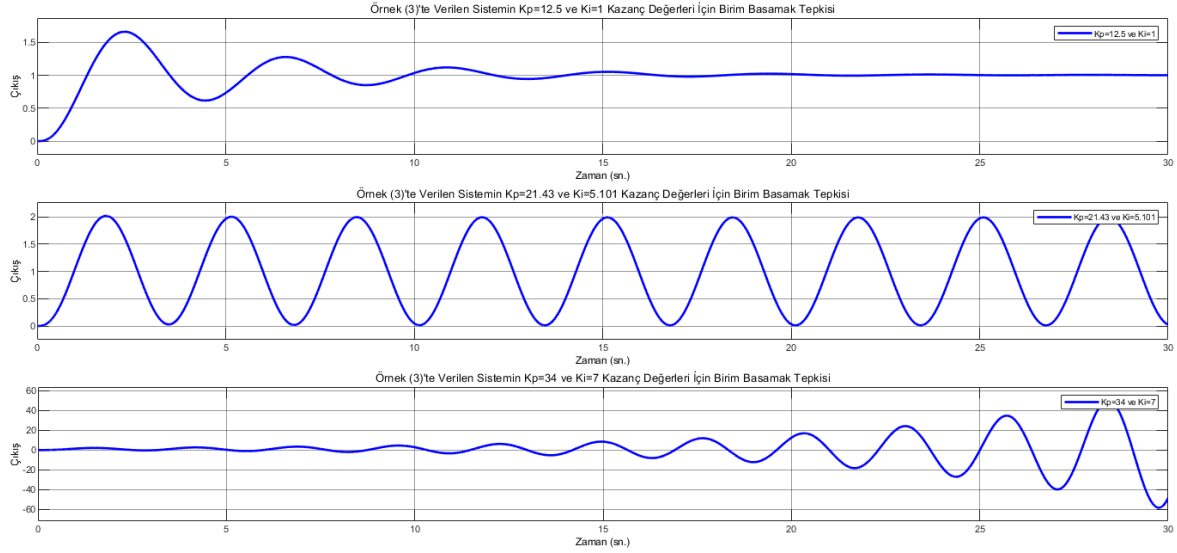
$$K_i = \frac{\omega[R_N(\omega)I_D(\omega) - R_D(\omega)I_N(\omega)]}{[R_N(\omega)]^2 + [I_N(\omega)]^2} = \frac{\omega[(1)(-\omega^3 + 5\omega) - (-6\omega^2)(0)]}{(1)^2 + (0)^2} = -\omega^4 + 5\omega^2$$

Frekansın belirli aralıklarında " $K_p$ " ve " $K_i$ " parametrelerinin çizilmesi sonucu Örnek (3)' te verilen sistemi kararlı kılan parametre değerleri Şekil (3.2.2.1) kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir.



Şekil 3.2.2.1: Örnek (3) Kapsamında Verilen Sistemin Kararlılık Sınır Eğrisi

Şekil (3.2.2.1)' de sistemi kararlı yapan “ $K_p$ ” ve “ $K_i$ ” parametreleri maviyle taralı alanla ifade edilmiştir. Kesik çizgilerle gösterilen kısım kararlı ve kararsız bölgeler arasında bulunan sınırdır ve bu noktada seçilen her değerde sistem kritik kararlı olarak çalışmaktadır. Beyaz ile gösterilen kısım ise kararsız bölgeyi belirtir. Şekil (3.2.2.2) incelenirse “ $K_p=12.5$ ” ve “ $K_i=1$ ” için sistem kararlı, “ $K_p=21.43$ ” ve “ $K_i=5.101$ ” için sistem kritik kararlı, “ $K_p=34$ ” ve “ $K_i=7$ ” için sistem kararsız olarak çalışmaktadır.



**Şekil 3.2.2.2:** Örnek (3) Kapsamında Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicinin Farklı Parametre Değerlerine Göre Sistemin Birim Basamak Tepkisi

Kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanarak birleştirilmiş sıvı tank sisteminde PI denetleyici tasarımında, Tank (1) sistemimiz için Denklem (2.2.2.1)' de verilen matematiksel model ve Tank (2) sistemimiz için Denklem (2.2.2.2)' de verilen matematiksel model kullanılmıştır. Denklem (3.2.2.7) ve Denklem (3.2.2.8) kullanılarak Tank (1) ve Tank (2) sistemimizin frekansa bağlı “ $K_p$ ” ve “ $K_i$ ” değerleri belirlenebilir.

*Tank (1) Sistemi İçin:*

$$G_{1-1}(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{R_N(\omega) + jI_N(\omega)}{R_D(\omega) + jI_D(\omega)}$$

$$G_{1-1}(j\omega) = \frac{j\omega 0.7632 + (5.52)10^{-4}}{j\omega^5 + \omega^4 0.877 - j\omega^3 3.8518 - \omega^2 3 + j\omega 0.0385 + (1.214)10^{-4}}$$

Burada:

$$R_N(\omega) = (5.52)10^{-4} \text{ ve } I_N(\omega) = \omega 0.7632$$

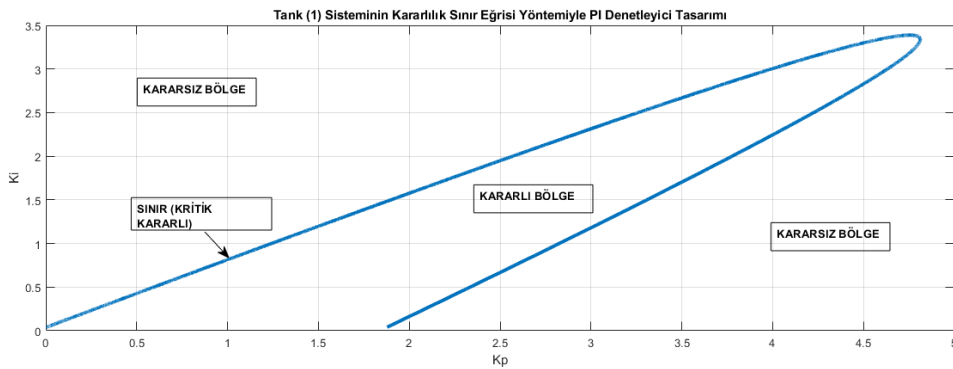
$$R_D(\omega) = \omega^4 0.877 - \omega^2 3 + (1.214)10^{-4}$$

$$I_D(\omega) = \omega^5 - \omega^3 3.8518 + \omega 0.0385$$

Denklem (3.2.2.7) ve Denklem (3.2.2.8) uygulanarak Tank (1) sisteminin frekansa bağlı oransal kazanç “ $K_p$ ” ve tümlevsel kazanç “ $K_i$ ” parametreleri Denklem (3.2.2.9)’ da ifade edilmiştir ve ilgili denklem kullanılarak Tank (1) sisteminin kararlılık sınır eğrisi Şekil (3.2.2.3)’ te gösterilmiştir.

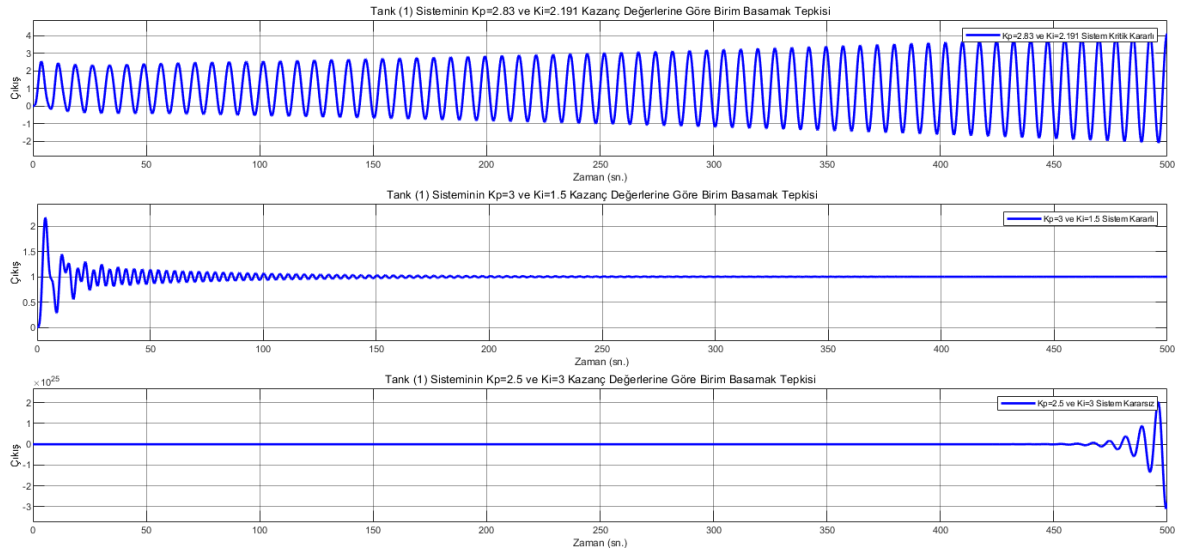
$$K_p = \frac{\omega^6(-0.7632) + \omega^4 3 + \omega^2(-0.0277) - (6.7)10^{-8}}{\omega^2 0.6 + (3.05)10^{-7}} \quad (3.2.2.9)$$

$$K_i = \frac{\omega^6(-0.67) + \omega^4(2.3) + \omega^2(-7.14)10^{-5}}{\omega^2 0.6 + (3.05)10^{-7}}$$



Şekil 3.2.2.3: Tank (1) Sistemi İçin Elde Edilen Kararlılık Sınır Eğrisi

Şekil (3.2.2.3) kullanılarak farklı “ $K_p$ ” ve “ $K_i$ ” değerlerine göre sistemin birim basamak tepkisi Şekil (3.2.2.4)’ te gösterilmiştir. Tank (1) sistemimizi kararlı yapan kazanç değerleri “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ” olarak belirlenmiştir.



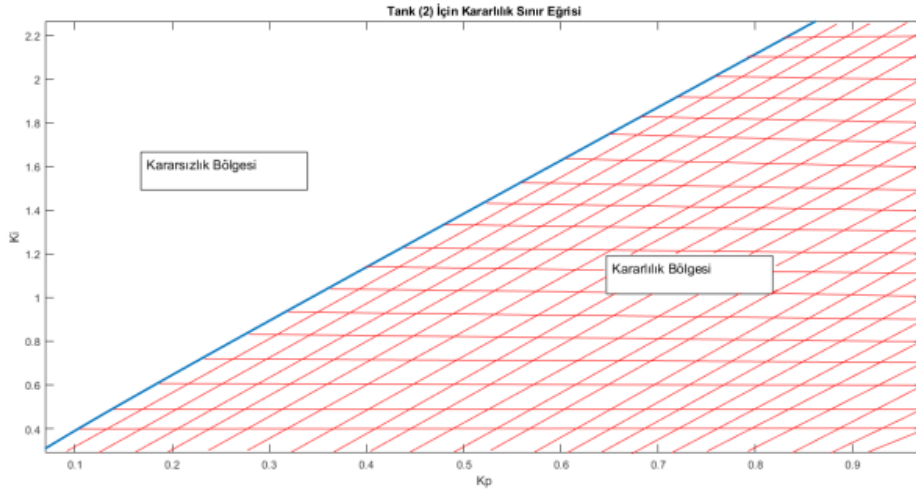
Şekil 3.2.2.4:  $K_p$ - $K_i$  Değerlerine Göre Tank (1) Sisteminin Birim Basamak Cevabı

Denklem (3.2.2.7) ve Denklem (3.2.2.8) kullanılarak benzer işlem adımları Denklem (2.2.2.2)’ de verilen Tank (2) sistemine uygulanarak frekansa bağlı “ $K_p$ ” ve “ $K_i$ ”

parametreleri Denklem (3.2.2.10)' da gösterilmiştir ve ilgili denklemden yola çıkarak Tank (2) sisteminin ( $K_p$ - $K_i$ ) uzayında kararlılık sınır eğrisi Şekil (3.2.2.5)' te gösterilmiştir.

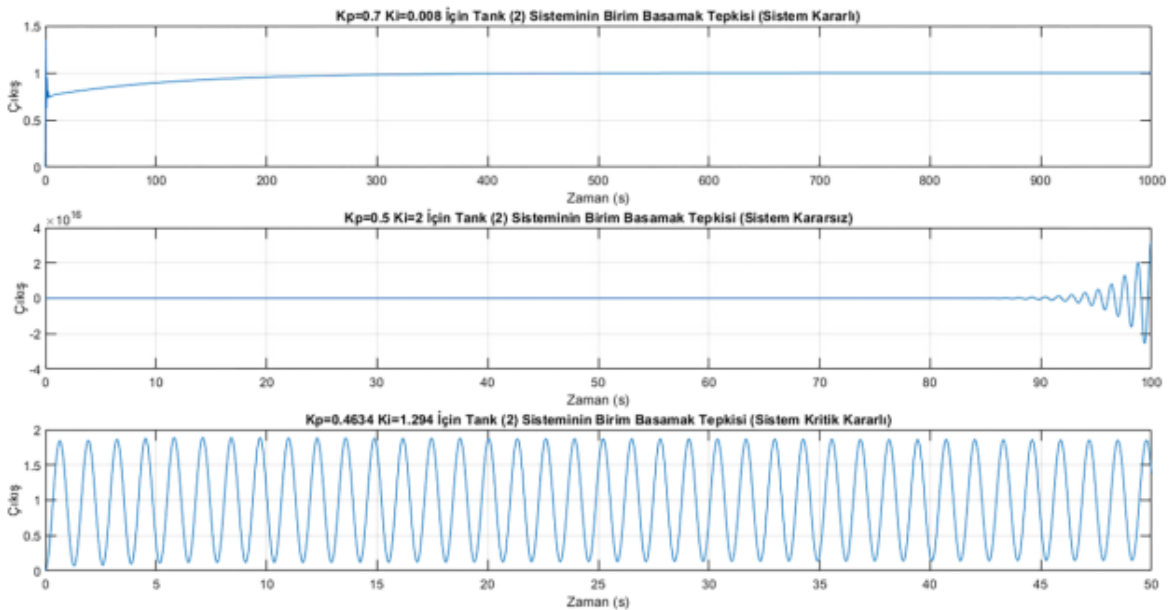
$$K_p = \frac{\omega^7 43.8 - \omega^5 161.30743 + \omega^3 196.4698 - \omega 149.0198}{\omega^5 1918.44 - \omega^3 389.8311 + \omega 646.6849}$$

$$K_i = \frac{\omega^7 106.0938 - \omega^5 39.38266 - \omega^3 118.49903}{\omega^5 1918.44 - \omega^3 389.8311 + \omega 646.6849}$$
(3.2.2.10)



Şekil 3.2.2.5: Tank (2) Sistemi İçin Elde Edilen Kararlılık Sınır Eğrisi

Şekil (3.2.2.5)'te verilen kararlılık sınır eğrisinde farklı " $K_p$ " ve " $K_i$ " değerleri elde edilebilir. Farklı " $K_p$ " ve " $K_i$ " değerlerine göre Tank (2) sisteminin birim basamak cevabı Şekil (3.2.2.6)' da gösterilmiştir. Tank (2) sistemimizi kararlı yapan kazanç değerleri " $K_p=0,7$ " ve " $K_i=0.008$ " olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2.2.6:  $K_p$ - $K_i$  Değerlerine Göre Tank (2) Sisteminin Birim Basamak Cevabı

### 3.2.3 Genetik Algoritma Yöntemiyle PI/PID Denetleyici Tasarımı

Genetik algoritma, Çaprazlama, Üreme ve Mutasyon gibi biyolojik veya evrimsel terimleri içerisinde barındıran ve birçok uygulama alanı bulunan en iyileme yöntemidir. Bu terimler şu şekilde açıklanabilir:

- **Üreme:** En kısa tarifıyla, seçilen iki bireyden genetik materyallerini birbirine aktararak yeni bir varlık veya popülasyon oluşturma işlemidir. Bu işlemi yapmak, iki bireyin kromozomların çaprazlanması sonucu oluşur. Genetik algoritma da üreme, popülasyon veya varlık içerisindeki çeşitliliğin artırılmasıyla etkili sonuçlar elde edilmesini sağladığı için, önemli bir durumdur. Bunu sağlayabilmenin yolu da diğer temel terimlerimizden çaprazlama ve mutasyonun etkisidir.
- **Çaprazlama:** Seçilen iki bireyin kromozomlarının yer değiştirilmesi sonucu döller üreterek yeni nesil üretme işlemidir. Bu yeni nesil bir önceki neslin bazı özelliklerini taşıyacak şekilde tasarlanır.
- **Mutasyon:** Mutasyon genel tanımıyla değişim veya dönüşüm anlamına gelir. Mutasyonda temel amaç bireyin genetik materyallerinde dönüşüm yaparak yeni bir birey meydana getirmektir. Mutasyon işlemi nadir olarak gerçekleşse de yeni çözümlerin oluşmasında ve algoritmanın en iyi çözüme oluşmasında etkilidir.

Kontrol sistemlerinde genetik algoritma kullanarak en iyileme işlemi yapabilmek için öncelikle problemin matematiksel modelini elde etmek gerekir ve en uygun çözümü sağlayacak amaç fonksiyonunu (fitness fonksiyonu) belirlemek gerekir. Genetik algoritmayı kullanmak için genellikle şu adımlar kullanılır:

1. Bir dizi olası rastgele başlangıç şartlarını kullanarak popülasyon oluşturulur.
2. Popülasyonumuz için uygun olan amaç fonksiyonu belirlenir.
3. Bireylerin uygunluk düzeyine dayanan ve popülasyon içindeki en iyi bireyleri seçmeye dayanan seleksiyon işlemi yapılır.
4. Seçilen bireylerin genetik özelliklerini yeni nesil bireylere aktarmak amacıyla çaprazlama işlemi yapılır.
5. Bireylerin genetik özelliklerini değiştirerek çeşitlilik sağlamak amacıyla mutasyon işlemine tabi tutulur.
6. Çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra yeni nesil popülasyon oluşturularak amaç fonksiyonumuz değerlendirilir. Bu işlemler istenen en iyi değere ulaşana kadar devam ettirilir.



Genetik algoritma özellikle karmaşık ve çok değişkenli problemleri en iyilemeye yönelik bir yapay zekâ tabanlı akıllı/zeki bir algoritma olup kontrol sistemi uygulamalarında ve denetleyici tasarımında sıklıkla kullanılır.

Kontrol sistemlerinde genetik algoritma kullanarak denetleyici tasarımı yapmak için genellikle giriş sinyali ve çıkış sinyali arasındaki fark olan hata fonksiyonunun minimum olması istenir. Bu durumu sağlayabilmek için performans indekslerinin minimize edilmesi gerekir. Performans indeksleri, sistem verimliliğinin sayısal ölçümü olarak adlandırılabilir. Genellikle kullanılan performans indeksleri; Tümlensel Kare Hatası (Integral Square Error - ISE), Tümlensel Mutlak Hatası (Integral Absolute Error - IAE), Tümlensel Zaman Mutlak Hatası (Integral Time Absolute Error - ITAE) ve son olarak Tümlensel Zaman Karesel Hata (Integral Time Square Error - ITSE) kullanılır. Bahsedilen performans indekslerinin matematiksel ifadesi Denklem (3.2.3.1), Denklem (3.2.3.2), Denklem (3.2.3.3) ve Denklem (3.2.3.4)' te ifade edilmiştir.

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (3.2.3.1)$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (3.2.3.2)$$

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (3.2.3.3)$$

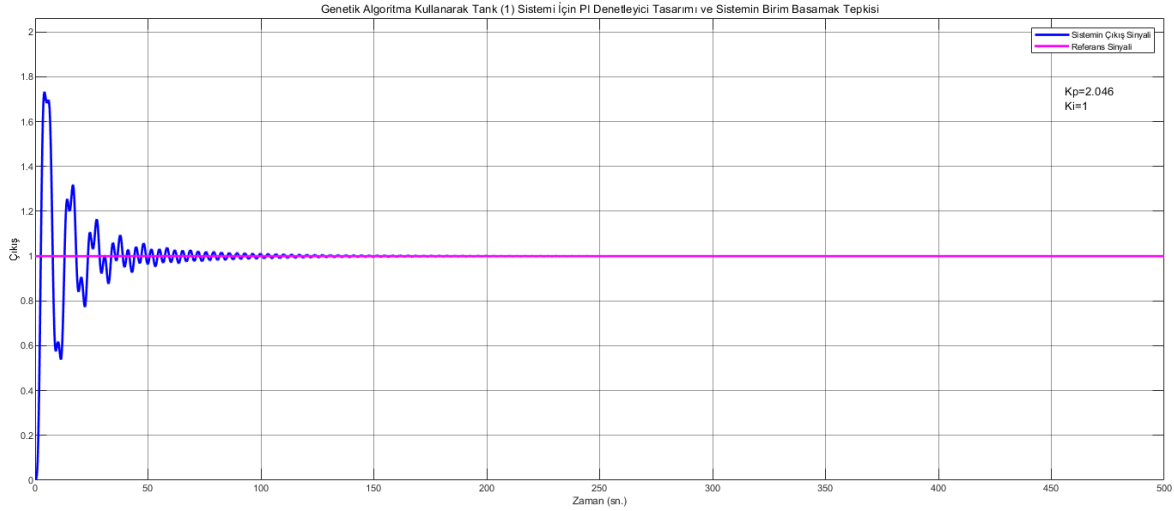
$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt \quad (3.2.3.4)$$

ITAE performans indeksi, diğer performans indekslerine nazaran en iyi seçiciliği sağladığından, başlangıç hatasının etkisini düşürüp daha iyi bir performans değerlendirmesi sağladığından daha fazla kullanılmaktadır. ITAE, sistem çıkışının yanıtının büyüklüğüne bağlıdır, aynı zamanda sürekli bir hata sinyali oluşturur. Bu nedenle, ITAE kullanıldığında, hata azalırken, sistem çıkışı da stabilize olur. ITAE, aynı zamanda ölçeklendirme faktörlerine de duyarlı değildir ve daha tutarlı bir sonuç verir. Bu nedenle, genellikle kontrol sistemleri performansının değerlendirilmesinde tercih edilen bir ölçüttür.

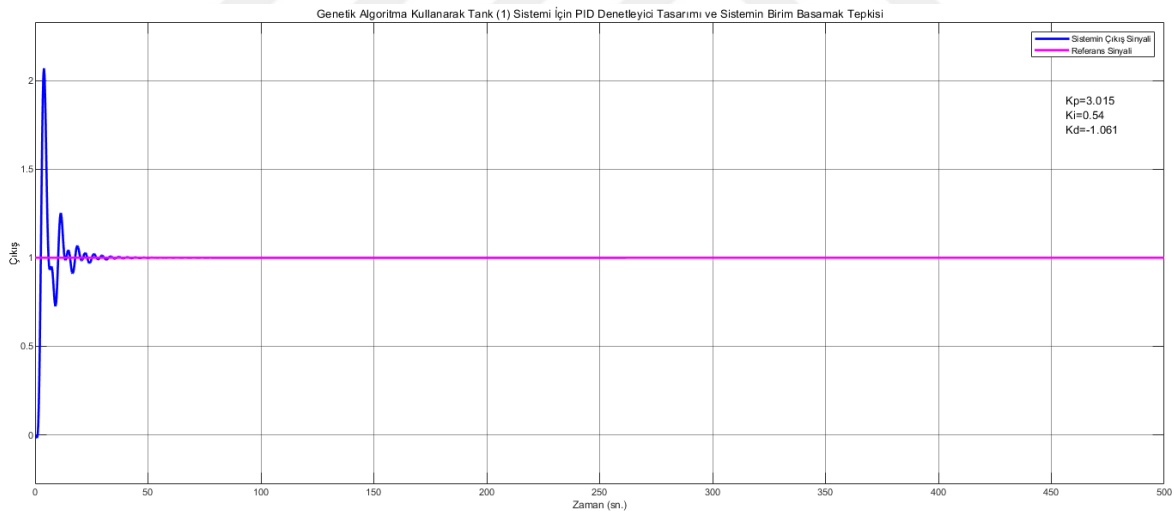
Genetik algoritma ile tank sistemimize denetleyici tasarımında ITAE performans indeksi, bahsedilen sebeplerden dolayı tercih edilmiştir. Genetik algoritma tasarımında, MATLAB/SIMULINK ortamında bulunan ve Şekil (3.2.3.1)' de gösterilen en iyileme araç kutusu (optimtool) kullanılır. Genetik algoritma ile PI/PID denetleyici tasarlamak için Şekil (3.2.3.2)'te gösterilen Tank (1) ve Tank (2) sisteminin MATLAB/SIMULINK ortamında



olarak belirlenmiştir. Tank (1) sistemi için GA kullanarak tasarlanan PI ve PID denetleyicilerin birim basamak girişine karşı elde edilen çıkış grafikleri sırasıyla Şekil (3.2.3.3) ve Şekil (3.2.3.4)' te gösterilmiştir. Tank (1) sistemini temsil eden Laplace uzayında matematiksel model Denklem (2.2.2.1)' de ifade edilmiştir.



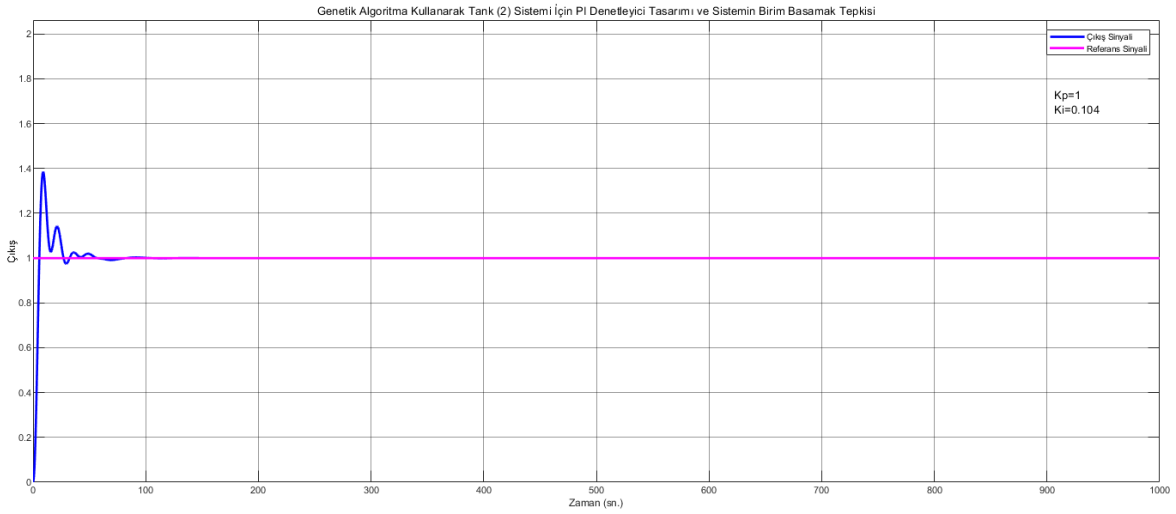
**Şekil 3.2.3.3:** Genetik Algoritma Kullanarak Tank 1 Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi “ $K_p=2.046$ ” ve “ $K_i=1$ ”



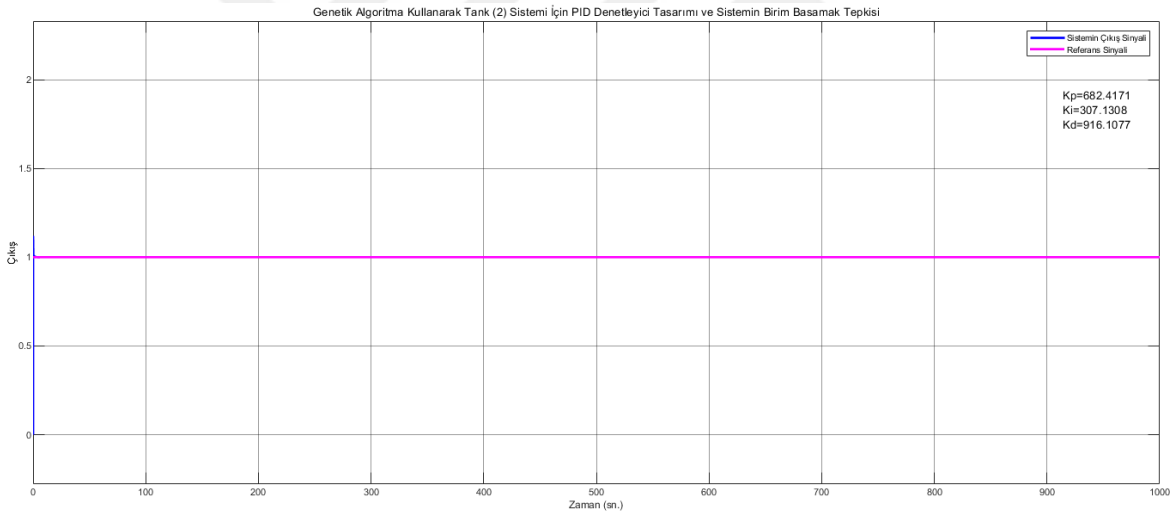
**Şekil 3.2.3.4:** Genetik Algoritma Kullanarak Tank 1 Sistemi İçin PID Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi “ $K_p=3.015$ ”, “ $K_i=0.54$ ” ve “ $K_d=-1,061$ ”

GA kullanarak Tank (2) sistemimiz için PI/PID denetleyici tasarımında Denklem (2.2.2.3)' te ifade edilen matematiksel model kullanılmıştır. Algoritma tarafından PI denetleyici parametreleri “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ” olarak belirlenmiştir, PID denetleyici için kazanç parametreleri “ $K_p=682.4171$ ”, “ $K_i=307.1308$ ” ve “ $K_d=916.1077$ ” olarak belirlenmiştir. Denklem (2.2.2.3)' te belirtilen Tank (2) sisteminin matematiksel modelini

kullanarak PI ve PID denetleyicilerin birim basamak referans girişine karşı sistemin verdiği tepki Şekil (3.2.3.5) ve Şekil (3.2.3.6)' da gösterilmiştir.



**Şekil 3.2.3.5:** Genetik Algoritma Kullanarak Tank 2 Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ”



**Şekil 3.2.3.6:** Genetik Algoritma Kullanarak Tank 2 Sistemi İçin PID Denetleyici Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi “ $K_p=682.4171$ ”, “ $K_i=307.1308$ ” ve “ $K_d=916.1077$ ”

#### 4. FAZ GERİLEMELİ KONTROLÖR VE KONTROLÖR PARAMETRELERİN AYARLANMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Endüstriyel süreçlerde en çok kullanılan denetleyici türlerinden biri de faz gerilemeli-ilerlemeli kontrolörlerdir. Faz gerilemeli-ilerlemeli kontrolörler, faz gerilemeli ve faz ilerlemeli kontrolörlerin seri olarak birbirine bağlanmasıyla oluşur ve genellikle sistem frekans tepkisini düzeltmek ve istenen performansı sağlamak için kullanılan denetleyicilerdir. Bu denetleyiciler düşük frekanslarda faz gecikmesini düzeltirken yüksek frekanslarda çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre ileri kaymasını sağlayarak sistemin daha hızlı tepki vermesini sağlamaktadır. Faz gerilemeli ve faz ilerlemeli kontrolörlerin tanımları şu şekilde yapılabilir:

- **Faz Gerilemeli (Phase Lag) Kontrolör:** Yüksek geçiş frekanslı sistemlerde faz gecikmesi ve buna bağlı olarak sistem tepkisi kararsız olabilir ve bu durumu düzeltmek amacıyla faz gerilemeli kontrolörler tasarımcılar tarafından tercih edilen bir denetleyici türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Faz gerilemeli kontrolör, sistem tepkisine gecikme ekleyerek veya düşük frekanslarda kalıcı hâl performansını düzeltmek için kazanç artışı sağlayan bir denetleyicidir [25]. Kalıcı hâl hataya sahip bir sistemde kalıcı hâl hatayı azaltabilir [28]. Bu nedenle kalıcı hâl hataya sahip sistemlerde tercih edilebilir.
- **Faz İlerlemeli (Phase Lead) Kontrolör:** Sistemin tepki süresini hızlandırmak ve yüksek frekanslarda çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre ileri kaymasını sağlamak için faz ilerlemeli kontrolör kullanımı tercih edilmektedir. Faz ilerlemeli kontrolörler genellikle daha yüksek kazanç geçiş frekansı ürettiklerinden dolayı daha büyük bir bant genişliğine sahiptir bu nedenle sistem üzerinde yerleşme zamanının kısılmasına ve daha hızlı tepki vermesini sağlayan denetleyicilerdir [25].

Faz gerilemeli kontrolör ve Faz ilerlemeli kontrolör arasındaki farklar şu şekilde sıralanabilir:

- Faz gerilemeli kontrolör, faz gecikmesini düzeltmek için kullanılırken, Faz ilerlemeli kontrolör çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre ileri kaymasını sağlamak için kullanılır.
- Faz gerilemeli kontrolör, sistem tepkisini yavaşlatmak için düşük frekanslarda kazanç artışı sağlar fakat faz ilerlemeli kontrolör, sistem tepkisini hızlandırmak için yüksek frekanslarda kazanç artışı sağlamaktadır.

- Faz ilerlemeli kontrolör, sistemin tepkisi hızlı olması isteniyorsa tercih sebebidir fakat faz gerilemeli kontrolör, faz gecikmeli sistemlerde ve genellikle kalıcı hâl hataya sahip sistemlerde tercih sebebi olabilmektedir.

Faz gerilemeli kontrolörün matematiksel ifadesi Denklem (4.1)' de, faz ilerlemeli kontrolörün matematiksel ifade Denklem (4.2) de gösterilmiştir. Birleştirilmiş sıvı tank sisteminde Tank (1) ve Tank (2) sistemimizde sıvı seviyesi denetimi için Denklem (4.1) kullanılarak faz gerilemeli kontrolör tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yaparken Tank (1) sistemimizi temsilen Denklem (2.2.2.1) ve Tank (2) sistemimizi temsilen Denklem (2.2.2.3)' te ifade edilen Laplace uzayındaki matematiksel modeller tercih edilmiştir.

$$G_c(s) = \hat{K}_c \beta \frac{Ts+1}{\beta Ts+1} = \hat{K}_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}}, \quad \beta > 1 \quad (4.1)$$

Burada “ $\hat{K}_c$ ” faz gerilemeli kontrolörün kazancını, sistem tepkisini düzeltmek amacıyla sisteme eklenen gecikme süresi “ $T$ ” ve son olarak “ $\beta$ ” gecikme süresinin oranını kontrol eden bir ayar parametresini temsil etmektedir.

$$G_c(s) = \hat{K}_c \alpha \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = \hat{K}_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4.2)$$

Burada “ $\hat{K}_c$ ” faz ilerlemeli kontrolörün kazancını, “ $T$ ” zaman gecikmesini ve son olarak “ $\alpha$ ” gecikme süresinin oranını kontrol eden bir ayar parametresini temsil etmektedir. Çıkış sinyalinin, giriş sinyaline göre ileri kaymasını denetlemek amacıyla “ $T$ ” zaman gecikmesi bir ayar parametresi olarak kullanılmaktadır.

Tank (1) ve Tank (2) sistemimiz için Faz gerilemeli kontrolör tasarımında iki ayrı yöntem olarak kök yer eğrisi ve Bode diyagramı kullanılmıştır.

#### 4.1. Kök Yer Eğrisi Yöntemi Kullanarak Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı

Tasarım için izlenecek adımlar şu şekilde sıralanabilir [1,25]:

Öncelikle sistemin kalıcı durum hatası ve buna bağlı olarak statik konum hata sabiti belirlenir.

Sistemimiz için gerekli olan kalıcı durum hatası ve buna bağlı olarak yeni statik konum hata sabitinin ne olması gerektiği belirlenmelidir. Bir ayar parametresi olan “ $\beta$ ” değerini bulabilmek için statik konum hata sabitleri Denklem (4.1.1)' de gösterildiği şekilde

oranlanmalıdır. Burada “ $K_p$ ” sistemin statik konum hata sabini ifade ederken, “ $K_{pcom}$ ” yeni hesaplanan statik konum hata sabitini temsil etmektedir.

$$\beta = \frac{K_{pcom}}{K_p} \quad (4.1.1)$$

Sistemin açık çevrim transfer fonksiyonundan kök yer eğrisi çizdirilmelidir ve kontrolörün sıfır ve kutbunu belirlemek için Denklem (4.1.2) kullanılmalıdır. Denklem (4.1.2)’ de sıfır değeri “ $z$ ” ve kutup değeri “ $p$ ” ile sembolize edilmiştir.

$$\beta = \frac{z}{p} \quad (4.1.2)$$

Arzu edilen sönüm oranının “ $\zeta$ ”, kök yer eğrisini kestiği noktadaki gerçel ve sanal değerler ile ilgili noktadaki kazanç değeri kullanarak, faz gerilemeli kontrolörün kazancı Denklem (4.1.3) kullanılarak hesaplanabilir. Burada; “ $G_c(s)$ ” kazanç ayarı yapılmamış kontrolörün matematiksel ifadesi, “ $G(s)$ ” Tank (1) veya Tank (2) sisteminin matematiksel ifadesi ve son olarak “ $K_d$ ” baskın kutup noktasındaki kazanç değerini temsil etmektedir.

$$\hat{K}_c = \frac{\left| \frac{1}{G_c(s)G(s)} \right|_{s=Baskın\ Kutup}}{K_d} \quad (4.1.3)$$

*Kök Yer Eğrisi Kullanarak Tank (1) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı:*

Denklem (2.2.2.1)’ de ifade edilen Tank (1) sisteminin kalıcı hâl hatası son değer teoremine göre “ $e_{ss}=0.2$ ” olarak hesaplanmıştır. Prosedürde belirtildiği gibi kalıcı durum hatasına bağlı olarak statik konum hata sabiti belirlenmelidir. Tank (1) sistemimiz için statik konum hata sabiti “ $K_p=4$ ” olarak hesaplanmıştır.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G_{1-1}(s)} = \frac{(1.214)10^{-4}}{(6.734)10^{-4}} \cong 0.2$$

$$K_p = \frac{1 - e_{ss}}{e_{ss}} = \frac{1 - 0.2}{0.2} = 4$$

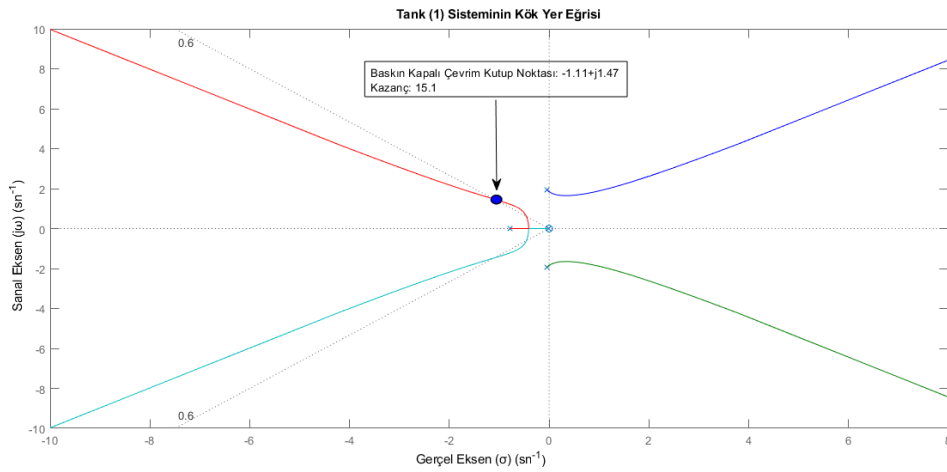
Tank (1) sistemimiz için kompanze edilmiş sistemin kalıcı hâl hatası “ $e_{sscom} \leq 0.01$ ” olarak ayarlanmak isteniyor. Buna göre statik konum hata sabiti “ $K_{pcom} \geq 99$ ” olmalıdır.

$$K_{pcom} = \frac{1 - e_{sscom}}{e_{sscom}} = \frac{1 - 0.01}{0.01} \geq 99$$

Bu nedenle Tank (1) sistemimiz için “ $K_{pcom}=100$ ” olarak seçilmiştir. Denklem (4.1.1) kullanılarak “ $\beta=25$ ” olarak hesaplanmıştır.

Faz gerilemeli kontrolörün kutup ve sıfırı belirlenirken kök yer eğrisinde büyük değişikliklerden kaçınmak gerekir çünkü yapılan büyük değişiklik sistemde kararsızlığa veya aşırı salınımına sebep olabilir. Bu durumu sağlayabilmek için kontrolörün kutup ve sıfırları genellikle birbirine ve orijine yakın olarak seçilir. Denklem (4.1.2) kullanılarak Tank (1) sistemimizin kutup ve sıfırı sırasıyla “ $p=0.02$ ” ve “ $z=0.5$ ” olarak belirlenmiştir.

Kontrolörün kazancı “ $\widehat{K}_c$ ” belirlemek için Tank (1) sistemimizin kök yer eğrisi çizilmiştir. Baskın kutup değeri ve bu noktadaki kazanç “ $K_d$ ” için Tank (1) sistemimizde sönüm oranı “ $\zeta = 0.6$ ” olarak seçilmiştir. Şekil (4.1.1)’de gösterilen kök yer eğrisinden baskın kutup “ $-1.11 \pm j1.47$ ” ve “ $K_d=15.1$ ” olarak belirlenmiştir. Denklem (4.1.3) kullanarak “ $\widehat{K}_c = 1.15232$ ” olarak hesaplanmıştır.

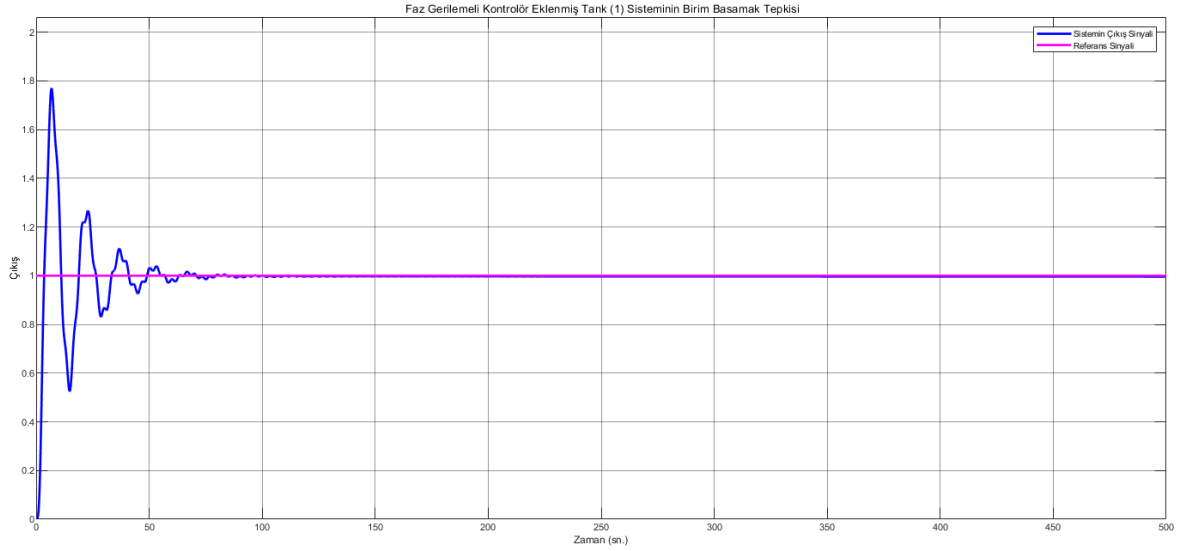


Şekil 4.1.1: Tank (1) Sisteminin Kök Yer Eğrisi

Buna göre Tank (1) sistemimiz için tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün matematiksel ifadesi Denklem (4.1.4)’te sunulmuştur. Şekil (4.1.2)’ de faz gerilemeli kontrolör eklenmiş Tank (1) sisteminin birim basamak tepkisi gösterilmektedir.

$$G_{c1_{Root-Locus}}(s) = 1.15232 \frac{s + 0.5}{s + 0.02} \quad (4.1.4)$$





**Şekil 4.1.2:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tank (1) Sistemi İçin Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi

*Kök Yer Eğrisi Kullanarak Tank (2) Sistemi İçin Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı:*

Tank (2) sistemi için Denklem (2.2.2.3)' te belirtilen matematiksel model kullanılmıştır. Tank (2) sistemimizin kalıcı hâl hatası son değer teoremine göre " $e_{ss}=0.014$ " olarak hesaplanmıştır. Kalıcı hâl hatasından yola çıkarak statik konum hata sabiti ise " $K_p=70.43$ " olarak hesaplanmıştır.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G_{2-2}(s)} = \frac{(0.1247)10^{-4}}{(9.0947)10^{-4}} \cong 0.014$$

$$K_p = \frac{1 - e_{ss}}{e_{ss}} = \frac{1 - 0.014}{0.014} = 70.43$$

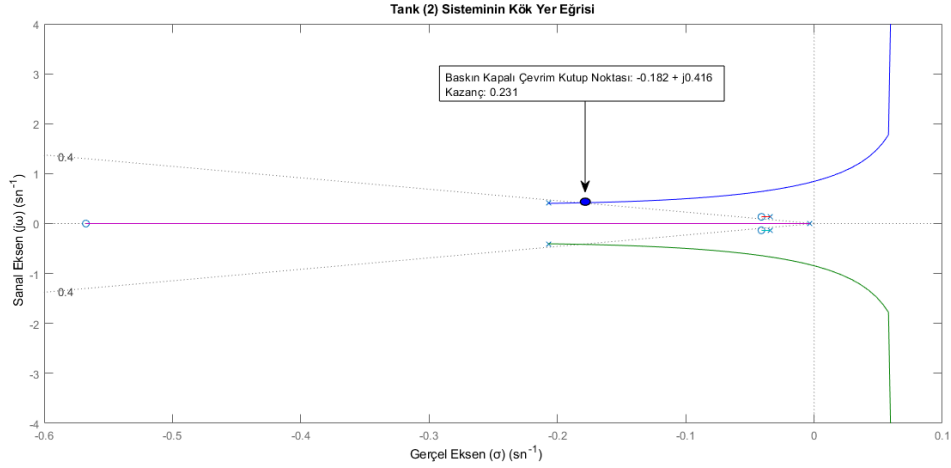
Tank (2) sisteminin istenen kalıcı hâl hatası " $e_{sscom} \leq 0.01$ " olarak belirlenmiştir bu nedenle " $K_{pcom} \geq 99$ " olmalıdır. Tank (2) sistemimiz için " $K_{pcom}=100$ " olarak tercih edilmiştir.

$$K_{pcom} = \frac{1 - e_{sscom}}{e_{sscom}} = \frac{1 - 0.01}{0.01} \geq 99$$

Denklem (4.1.1) kullanılarak " $\beta=1.42$ " olarak hesaplanmıştır. Denklem (4.1.2) ve " $\beta$ " değeri kullanılarak Tank (2) sistemimiz için faz gerilemeli kontrolörün kutup ve sıfırları sırasıyla " $p=0.0081$ " ve " $z=0.0115$ " olarak belirlenmiştir.

Faz gerilemeli kontrolörün kazancını hesaplamak için Şekil (4.1.3)' te gösterilen Tank (2) sisteminin kök yer eğrisinden yararlanılır. Şekil (4.1.3)' te Tank (2) sisteminin baskın kutupları, " $\zeta = 0.6$ " sönüm oranına göre belirlenmiştir.

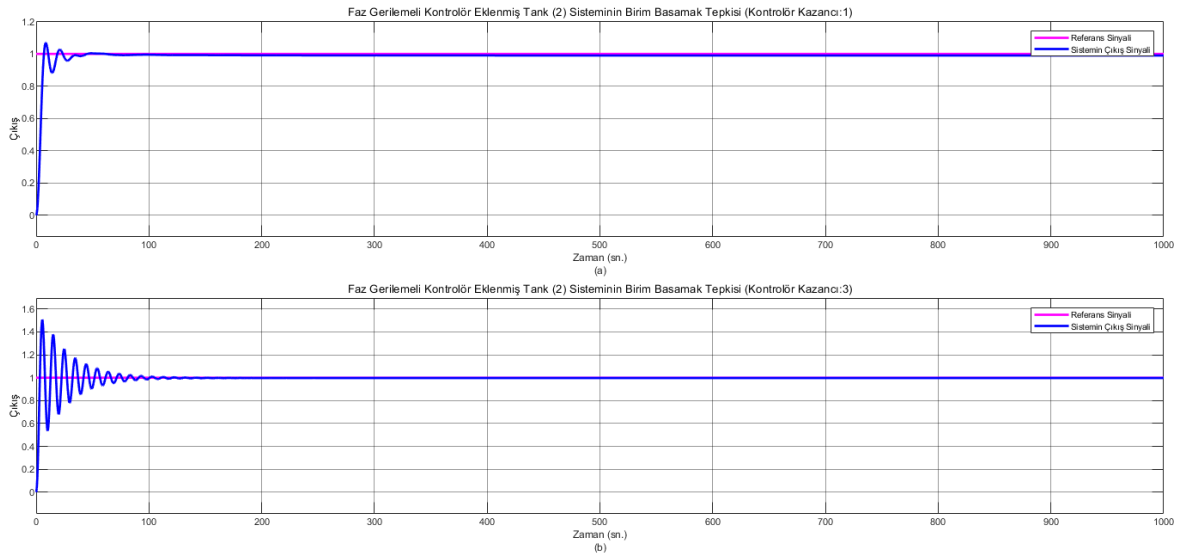
Baskın kutup noktası " $-0.182 \pm j0.416$ " ve bu noktadaki kazanç " $K_d=0.231$ " olarak Şekil (4.1.3)' te gösterilen Tank (2) sisteminin kök yer eğrisinden tayin edilmiştir.



**Şekil 4.1.3:** Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi

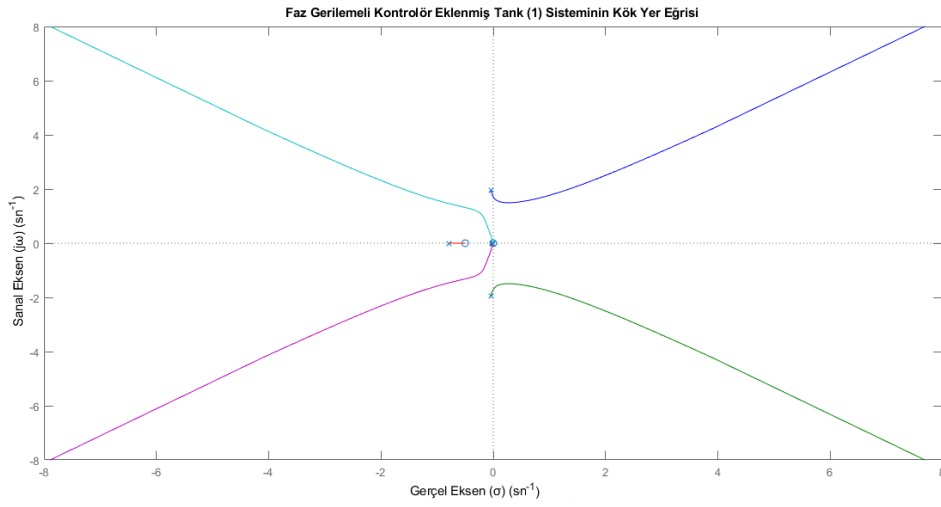
Denklem (4.1.3) kullanılarak faz gerilemeli kontrolörün kazancı yaklaşık 1 olarak hesaplanmıştır fakat bu kazanç değerinde sistem tam olarak kalıcı hâl hatayı düzeltemediğinden kontrolörün kazancı deneme yanılma yoluyla 3 olarak belirlenmiştir. Tank (2) sistemimiz için tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün matematiksel ifadesi Denklem (4.1.5)' te gösterilmektedir ve faz gerilemeli kontrolöre sahip sistemin birim basamak tepkisi Şekil (4.1.4)' te kontrolörün kazancı " $\hat{K}_c = 1$ " ve " $\hat{K}_c = 3$ " değerlerine göre MATLAB/SIMULINK kullanılarak çizdirilmiştir.

$$G_{C-2\text{Root-Locus}}(s) = 3 \frac{s + 0.0115}{s + 0.0081} \quad (4.1.5)$$

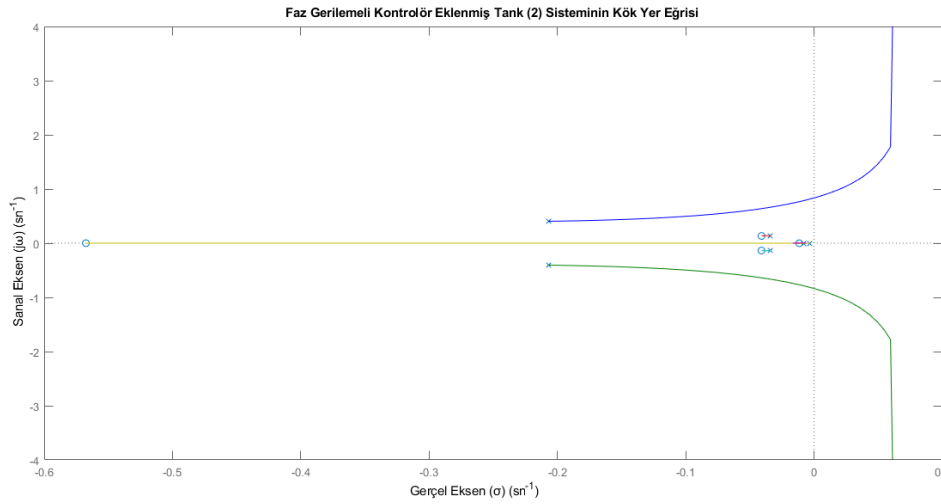


**Şekil 4.1.4:** Kök Yer Eğrisi Yöntemi Kullanarak Tank (2) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi (a):  $\hat{K}_c = 1$  ve (b):  $\hat{K}_c = 3$

Faz gerilemeli kontrolör eklenmiş Tank (1) ve Tank (2) sisteminin kök yer eğrisi sırasıyla Şekil (4.1.5) ve Şekil (4.1.6)' da gösterilmektedir.



Şekil 4.1.5: Faz Gerilemeli Kontrolör Eklenmiş Tank (1) Sisteminin Kök Yer Eğrisi



Şekil 4.1.6: Faz Gerilemeli Kontrolör Eklenmiş Tank (2) Sisteminin Kök Yer Eğrisi

Şekil (4.1.1), Şekil (4.1.3), Şekil (4.1.5) ve Şekil (4.1.6) incelendiğine Tank (1) ve Tank (2) sistemimiz için kök yer eğrisinde büyük değişiklikler olmadığı gözlemlenebilir ve bu da tasarım için istenen bir durumdur.

#### 4.2 Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı

Bode diyagramı kullanılarak faz gerilemeli kontrolör tasarımı için şu adımlar takip edilebilir [1,25]:

Kontrolör eklemeyen sistemin istenen kalıcı hâl hatasından yola çıkarak gereken hata sabiti belirlenir ve hata sabitine dayalı kazanç “**K**” Denklem (4.2.1) kullanarak elde edilir.

Denklem (4.2.1)' de gösterilen “ $x$ ” Tankı belirtmek için temsilen gösterilmiştir. Örneğin “ $x=1$ ” Tank (1) ve “ $x=2$ ” Tank (2)’ yi belirtmektedir. Kazanç “ $K$ ” hesaplandıktan sonra sisteme eklenerek Bode diyagramı çizdirilmelidir.

$$K_{p_x} = \frac{1 - e^{-s s_x}}{e^{-s s_x}} = \lim_{s \rightarrow 0} K_x G_x(s) \quad x = 1, 2 \quad (4.2.1)$$

Kazanç “ $K$ ” dahil edilen sistemin Bode diyagramından faz payı belirlenir “ $\Phi_{m1}$ ” ve yeterli olup olmadığı kontrol edilir.

Sistemimiz için uygun olan yeni faz payı tespit edilir “ $\Phi_{m2}$ ” ve bu değer dikkate alınarak Bode diyagramından yeni kazanç geçiş frekansı “ $\omega_{gc}$ ” belirlenir.

Faz gerilemeli kontrolörün sıfırı, yeni kazanç geçiş frekansının altındaki bir frekans bandına yerleştirilmelidir. Denklem (4.1)' de ifade edilen faz gerilemeli kontrolörün gecikme süresi “ $T$ ” parametresini hesaplamak için Denklem (4.2.2) kullanılır ve denklemde ifade edilen “ $\omega$ ” yeni kazanç geçiş frekansının altında seçilen frekans değerini temsil eder.

$$\omega T = 1 \quad (4.2.2)$$

Faz gerilemeli kontrolörün faz gecikmesini telâfi etmek için belirlenen faz payına Denklem (4.2.3)'te gösterildiği gibi, açılı ilavesi yapılmalıdır. Açılı ilavesi genellikle  $5^\circ$  ile  $12^\circ$  arasında seçilir.

$$\Phi_{m2} = \Phi_{m1} + (5^\circ - 12^\circ) \quad (4.2.3)$$

Açılı ilavesi yapılmış faz payına karşılık gelen frekans Bode diyagramı yardımıyla tespit edilir ve kazanç payı belirlenir. Belirlenen kazanç payını “ $0dB$ ” değerine çekecek olan değer Bode diyagramından okunur. Faz gerilemeli kontrolörün gecikme süresini kontrol eden bir ayar parametresi olan “ $\beta$ ” değeri Denklem (4.2.4) kullanılarak hesaplanır.

$$-20 \log \beta = y(dB) \quad (4.2.4)$$

$$\beta = 10^{\frac{-y}{20}}$$

Burada; “ $y$ ” desibel (dB) cinsinden bir değer olup Bode eğrisinde belirlenen kazanç payını “ $0dB$ ” ye çekecek olan değeri temsil etmektedir.

Faz gerilemeli kontrolörün kazancını hesaplamak için Denklem (4.2.5) kullanılır. Denklem (4.2.5)' te ifade edilen kazanç “ $K$ ” en başta belirlenen kazanç değerini göstermektedir.

$$\hat{K}_c = \frac{K}{\beta} \quad (4.2.5)$$

Bode diyagramı yöntemi kullanılarak faz gerilemeli kontrolör tasarımında Tank (1) sistemi için Denklem (2.2.2.1), Tank (2) sistemi için Denklem (2.2.2.3)' te ifade edilen

Laplace uzayında matematiksel modeller kullanılmıştır. Tank (1) sistemimiz için istenen statik konum hata sabiti ( $K_{p1} = 166$ ), Tank (2) sistemimiz için bu sabit ( $K_{p2} = 200$ ) olarak belirlenmiştir. Tank (1) sistemimiz ve Tank (2) sistemimiz kazanç ( $K_{1,2}$ ) Denklem (4.2.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Tank (1) sistemim için;

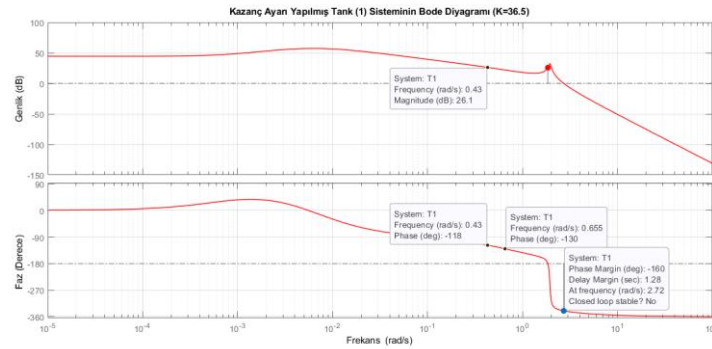
$$K_{p1} = \lim_{s \rightarrow 0} K_1 G_{1-1}(s) \rightarrow 166 = K_1 \cdot \frac{(5.52)10^{-4}}{(1.214)10^{-4}} \rightarrow K_1 = 36.5$$

Tank (2) sistemimiz için bu kazanç;

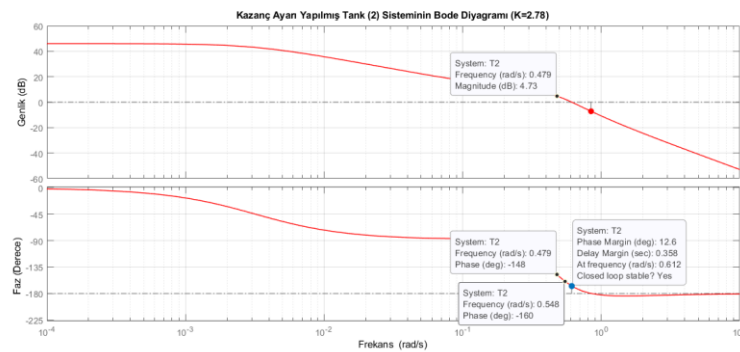
$$K_{p2} = \lim_{s \rightarrow 0} K_2 G_{2-2}(s) \rightarrow 200 = K_2 \cdot \frac{(8.97)10^{-4}}{(0.1247)10^{-4}} \rightarrow K_2 = 2.78$$

olarak hesaplanır.

Kazanç “K” dahil edilerek sistemin Bode diyagramı elde edildiğinde Tank (1) sistemimiz için faz payı “-160°” iken Tank (2) sistemimiz için faz payı “12.6°” olarak belirlenmiştir. Şekil (4.2.1) ve Şekil (4.2.2) sırasıyla Tank (1) ve Tank (2) sistemimizin Bode diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.2.1: Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı için Tank (1) sisteminin Bode Diyagramı



Şekil 4.2.2: Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı için Tank (2) sisteminin Bode Diyagramı

Tank (1) sistemimiz için faz payı “ $\Phi_m=50^\circ$ ” ve Tank (2) sistemimiz için faz payı “ $\Phi_m=20^\circ$ ” olarak ayarlanmak istenmektedir. Tank (1) ve Tank (2) sistemimiz için Denklem (4.2.3) uygulanarak “ $12^\circ$ ” güvenlik açısı eklenmiştir ve Denklem (4.2.4) uygulanarak Tank (1) ve Tank (2) sisteminin “ $\beta$ ” değeri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tank (1) sistemi için  $\beta$  :

$$-20 \log \beta_1 = -26dB \rightarrow \beta_1 = 10^{\frac{-26}{-20}} \cong 20$$

Tank (2) sistemi için  $\beta$  :

$$-20 \log \beta_2 = -4.73dB \rightarrow \beta_2 = 10^{\frac{-4.73}{-20}} \cong 1.724$$

Prosedür adımıında belirtilen Denklem (4.2.5) kullanılarak faz gerilemeli kontrolörün kazancı “ $\hat{K}_c$ ” Tank (1) ve Tank (2) için ayrı ayrı hesaplanmıştır ve Denklem (4.1) kullanılarak faz gerilemeli kontrolör, Bode diyagramı yardımıyla tasarlanmıştır. Denklem (4.2.2) kullanılarak Tank (1) sistemi için faz gerilemeli kontrolörün gecikme süresi “ $T_1=6.666$ ”, Tank (2) için bu değer “ $T_2=50$ ” olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak:

Tank (1) sistemi için kazanç “ $\hat{K}_c$ ” değeri ve tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$\hat{K}_c = \frac{K_1}{\beta_1} = \frac{36.5}{20} = 1.825$$

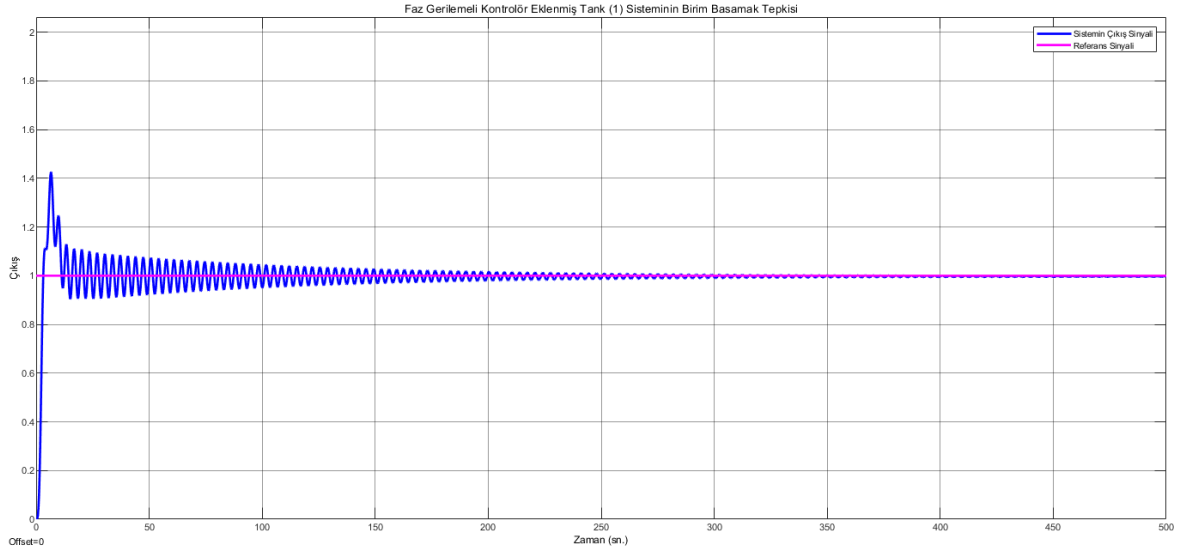
$$G_{c-1Bode}(s) = 1.825 \frac{s+0.15}{s+0.0075}$$

Benzer şekilde Tank (2) sistemi için kazanç “ $\hat{K}_c$ ” değeri ve tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün matematiksel ifadesi şu şekildedir:

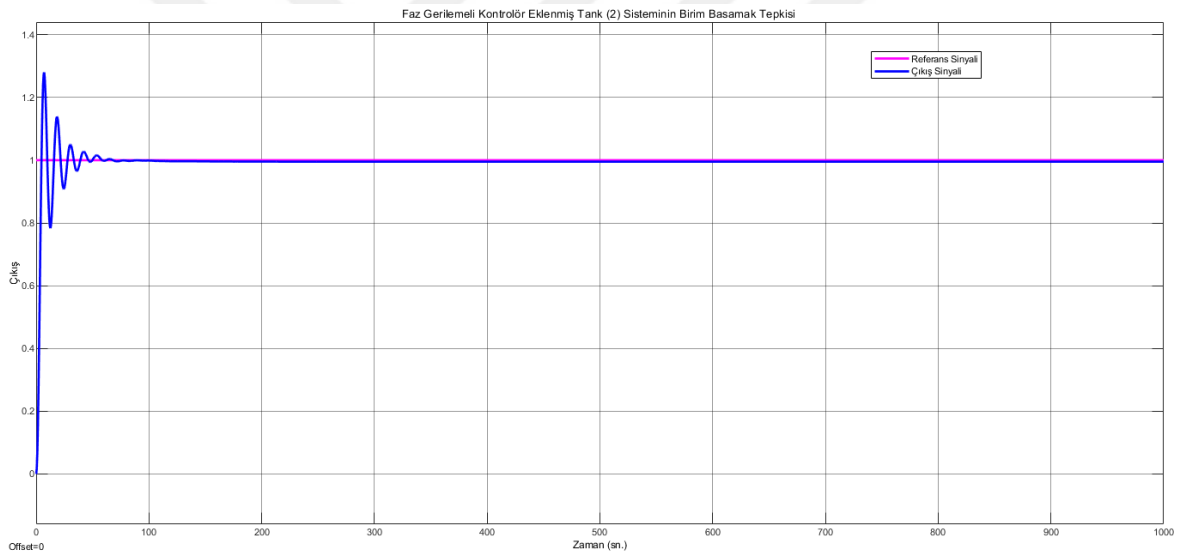
$$\hat{K}_c = \frac{K_2}{\beta_2} = \frac{2.78}{1.724} = 1.612$$

$$G_{c-2Bode}(s) = 1.612 \frac{s+0.02}{s+0.0116}$$

Şekil (4.2.3) ve Şekil (4.2.4) sırasıyla Tank (1) ve Tank (2) sisteminin birim basamak referans sinyaline göre çıkış sinyalini göstermektedir. Şekil (4.2.3) ve Şekil (4.2.4) incelenirse, çıkış sinyalinin, referans sinyalini izlediği gözlemlenebilir. Bu durum tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.



**Şekil 4.2.3:** Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Tank (1) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi



**Şekil 4.2.4:** Bode Diyagramı Yöntemi Kullanarak Tank (2) Sistemi için Faz Gerilemeli Kontrolör Tasarımı ve Sistemin Birim Basamak Tepkisi

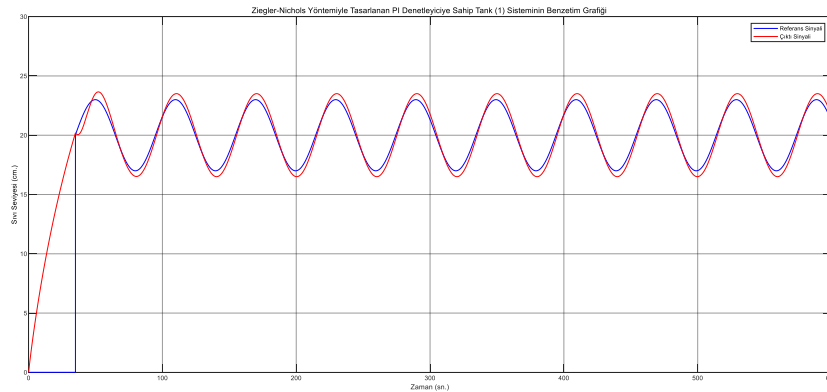
## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında endüstriyel süreçlerde sıvı seviye denetimini sağlamak için birleştirilmiş sıvı tank sisteminin PI/PID denetleyici ve faz gerilemeli kontrolör tasarımı farklı yöntemler kullanılarak tasarlanmıştır. Kuramsal çalışmanın desteklenmesi amacıyla tasarlanan sistem hem benzetim hem de gerçek zamanlı olarak incelenmiştir.

Gerçek zamanlı sistemde integral yığılması önleyici kazancı, tümlevsel bileşenin sınırlanması için varsayılan olarak sisteme entegre edilmiştir. Tümlevsel bileşen sürekli bir hatayı azaltmak ve sistemi kararlı kılmayı amaçlamaktadır. Tümlevsel bileşenin aşırı birikmesi kararlılıkta soruna neden olacağı için integral yığılması önleyici kazancı varsayılan olarak “3” olarak belirlenmiştir. Güvenlik gibi nedenlerden dolayı çalışmamızda integral yığılması önleyici kazancı genellikle değiştirilmemiştir fakat Bölüm (3.2.3)’ te Tank (2) sistemi için PID denetleyici tasarımı yaparken integral yığılması önleyici kazancı “1” olarak seçilerek sistemin benzetim tepkisi incelenmiştir.

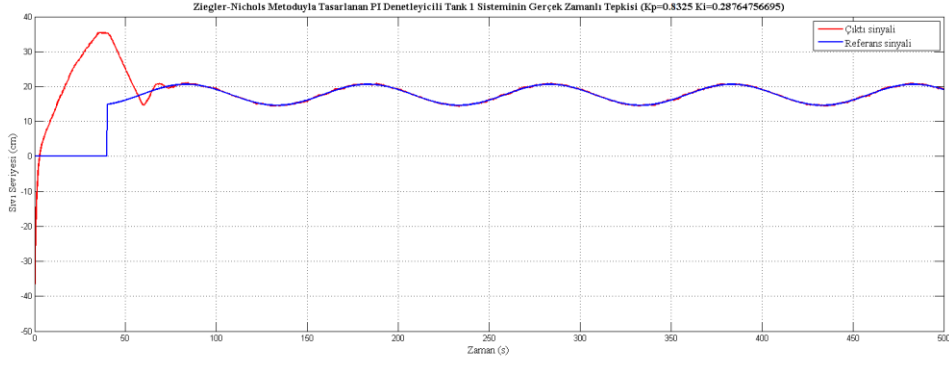
Bu çalışmada PI/PID denetleyici tasarımında Kararlılık Sınır Eğrisi yöntemi, Ziegler-Nichols yöntemi ve Genetik Algoritma kullanılırken, faz gerilemeli kontrolör tasarımında Kök yer eğrisi ve Bode diyagramı kullanılarak farklı yöntemlerle birleştirilmiş sıvı tank sistemi için sıvı seviye denetimi sağlanmıştır. Çalışma tek girişli-tek çıkışlı (SISO) olarak Tank (1) ve Tank (2) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tank (1) ve Tank (2) sistemimiz için gerçek zamanlı tepkisi ve benzetim sonuçları Bölüm (5.1) ve Bölüm (5.5) arasında gösterilmiştir.

### 5.1 Ziegler Nichols Yöntemiyle Tasarlanan Denetleyicinin Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafikleri

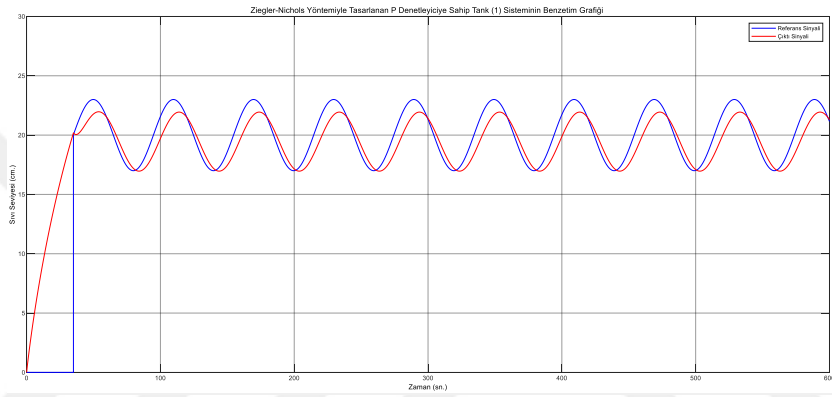


Şekil 5.1.1: Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI (Oransal-Tümlevsel) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=0.8325$ ” ve “ $K_i \cong 0.3$ ”



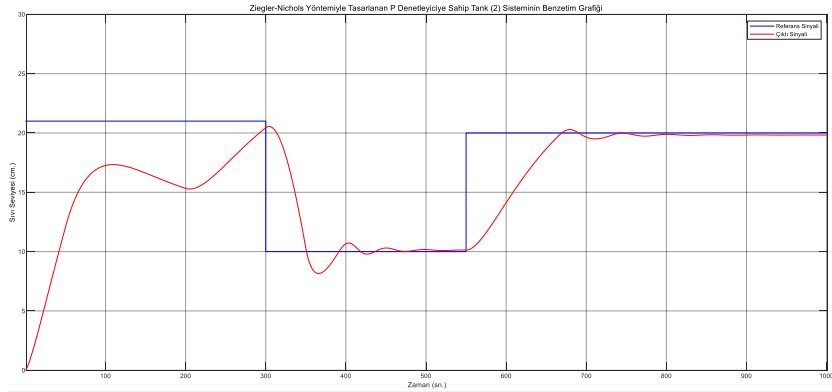


**Şekil 5.1.2:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI (Oransal-Tümlevsel) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=0.8325$ ” ve “ $K_i \cong 0.3$ ”

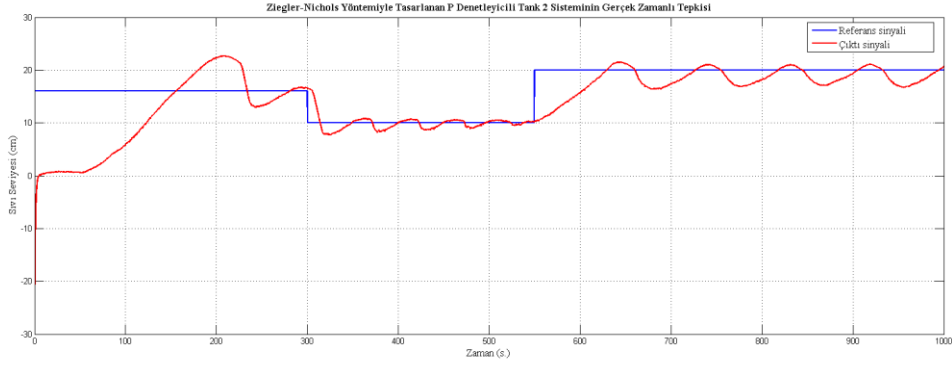


**Şekil 5.1.3:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=0.925$ ”

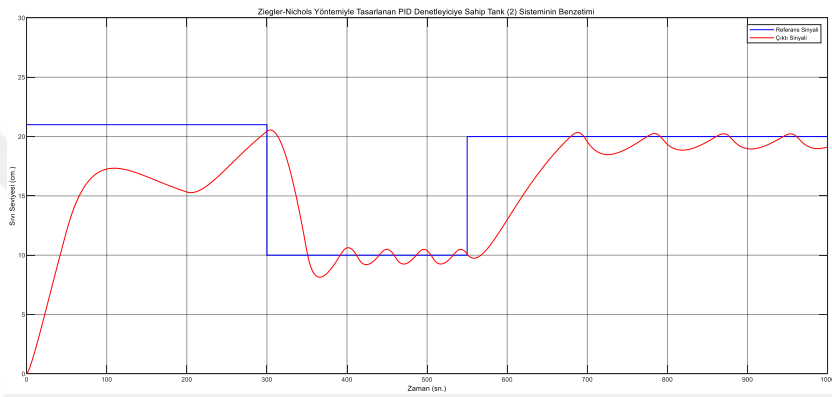
Şekil (5.1.1), Şekil (5.1.2) ve Şekil (5.1.3)’ te Tank (1) sistemi için Ziegler-Nichols yöntemiyle tasarlanan P ve PI denetleyicinin (kontrolörün) sistem üzerinde etkisini göstermektedir. Referans sinyali olan sinüzoidal bir girişe karşı PI denetleyici iyi bir başarımla sergilerken P denetleyici referans sinyalini tam olarak izleyememektedir.



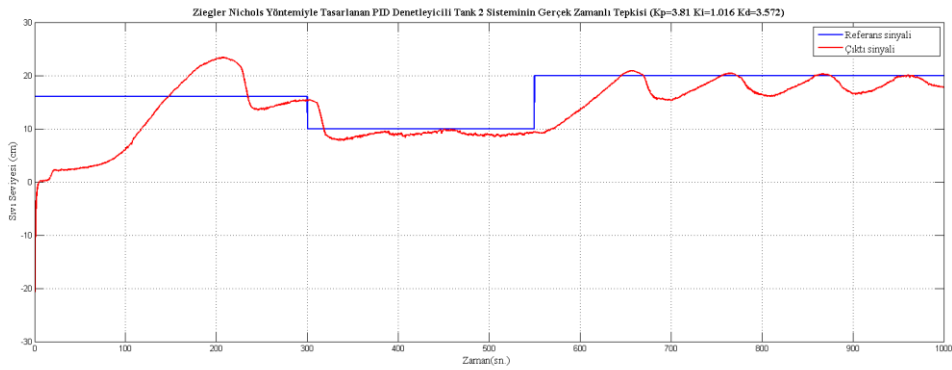
**Şekil 5.1.4:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3.175$ ”



**Şekil 5.1.5:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan P (Oransal) Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3.175$ ”



**Şekil 5.1.6:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID (Oransal-Tümlüsel-Türevsel) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3.81$ ”, “ $K_i = 1.016$ ” ve “ $K_d=3.572$ ”

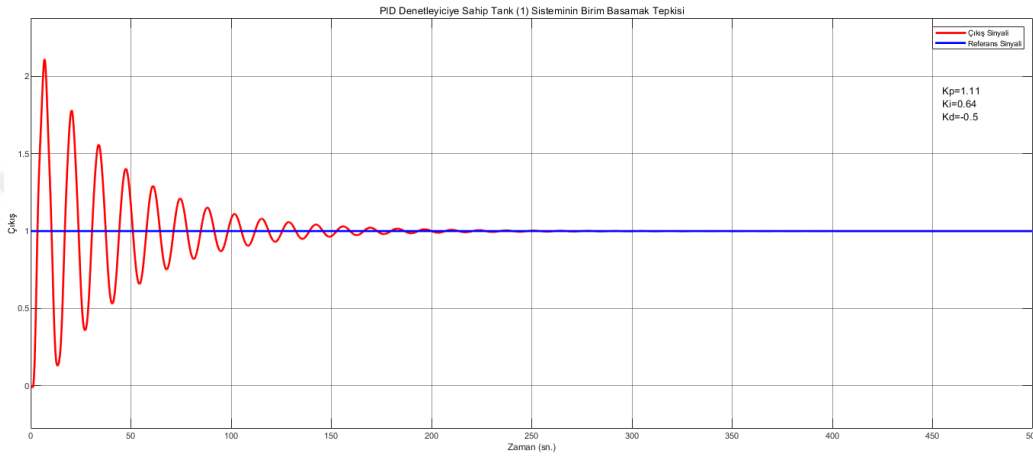


**Şekil 5.1.7:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID (Oransal-Tümlüsel-Türevsel) Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3.81$ ”, “ $K_i = 1.016$ ” ve “ $K_d=3.572$ ”

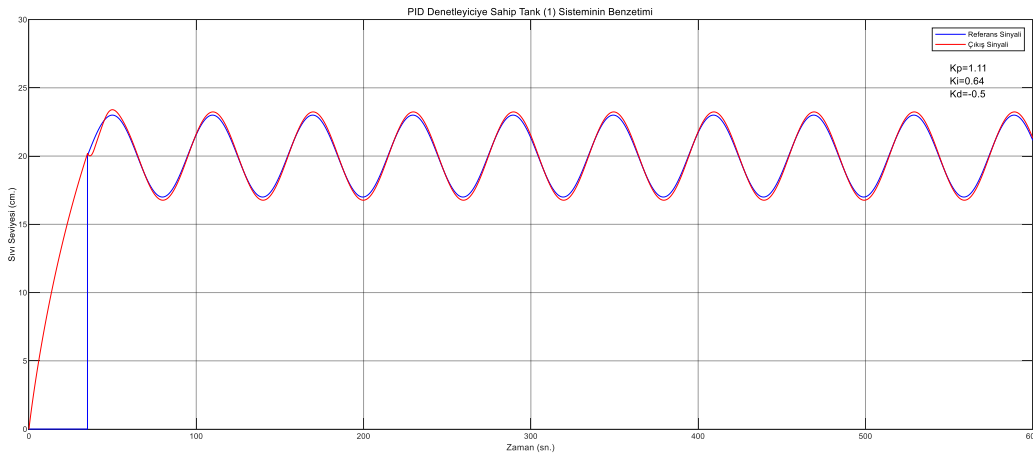
Tank (2) sistemimiz için Ziegler-Nichols yöntemiyle P ve PID denetleyici (kontrolör) tasarımı yapılmıştır. Denetleyicinin Tank (2) sistemi üzerindeki etkisi Şekil (5.1.4), Şekil

(5.1.5), Şekil (5.1.6) ve Şekil (5.1.7)' de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, P ve PID kontrolör referans sinyalini izlerken salınımlar meydana geldiği görülmektedir. Sistem kararlı ama salınımlı olarak çalışmaktadır.

Tank (1) sistemimiz için Ziegler-Nichols yöntemi kullanarak PID kontrolör tasarımında Şekil (3.2.1.11) incelendiğinde sistem kararsız olarak çalıştığı gözlemlenebilir fakat türevsel kazanç değeri negatif olarak alındığında Tank (1) sistemi için Şekil (5.1.8)' de gösterilen birim basamak tepkisi ve Şekil (5.1.9)' da gösterilen benzetim grafiği incelendiğinde sistem kararlı olarak çalışmaktadır.

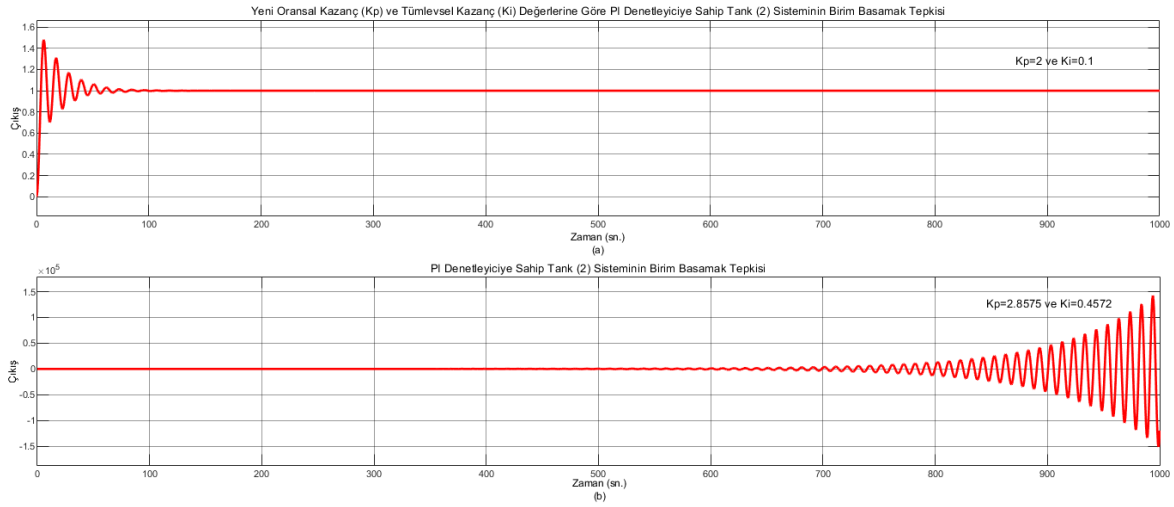


**Şekil 5.1.8:** Negatif Türevsel Kazanç Değerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyiciye Sahip Tank 1 Sisteminin Birim Basamak Tepkisi  
**“ $K_p=1.11$ ”, “ $K_i=0.64$ ” ve “ $K_d=-0.5$ ”**

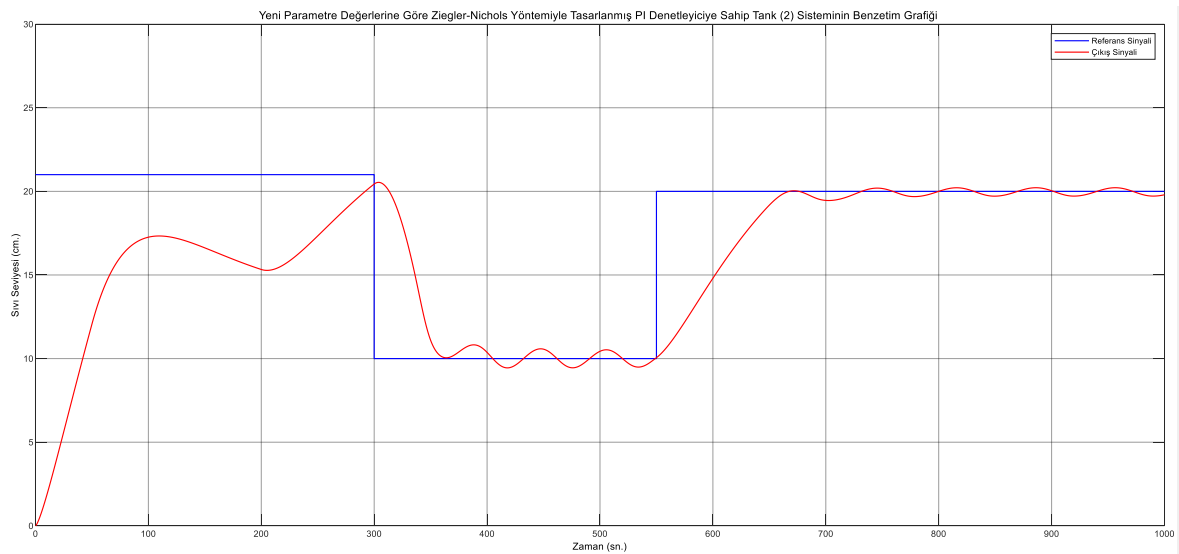


**Şekil 5.1.9:** Negatif Türevsel Kazanç Değerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyiciye Sahip Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği  
**“ $K_p=1.11$ ”, “ $K_i=0.64$ ” ve “ $K_d=-0.5$ ”**

Tank (2) sistemi için Ziegler-Nichols yöntemiyle tasarımda oransal kazanç değeri “ $K_p=2.8575$ ” ve tümlevsel kazanç “ $K_i=0.4572$ ” olarak hesaplanmıştır. Fakat bu parametre değerlerinde sistem Şekil (3.2.1.12)’de gösterildiği üzere birim basamak referans sinyali girişine karşı sistemin çıkışı kararsızdır. Bu nedenle Ziegler-Nichols yöntemiyle tasarlanan PI kontrolörün parametreleri üzerinde değişiklikler yaparak sistem kararlılığı sağlanmıştır. PI kontrolörün yeni parametre değerleri “ $K_p=2$ ” ve “ $K_i=0.1$ ” olarak belirlenmiş olup yeni parametre değerlerine göre sistemin birim basamak tepkisi ve benzetim grafiği sırasıyla Şekil (5.1.10) ve Şekil (5.1.11)’ de gösterilmiştir.

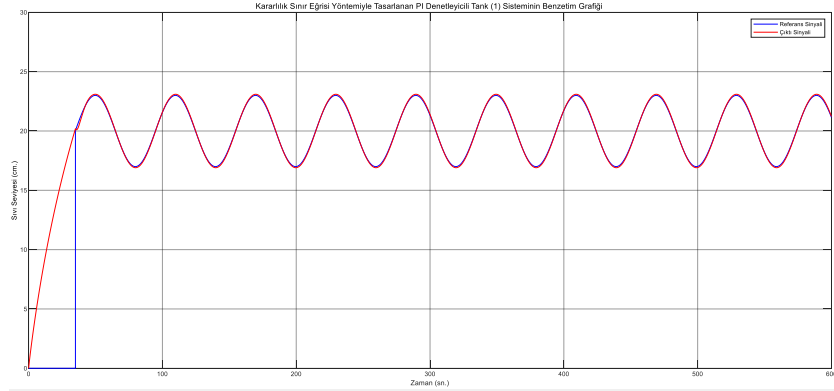


**Şekil 5.1.10:** Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Birim Basamak Tepkisi (a): Yeni Kazanç Değerleri “ $K_p=2$ ” ve “ $K_i=0.1$ ” (b) Eski Kazanç Değerleri “ $K_p=2.8575$ ” ve “ $K_i=0.4572$ ”

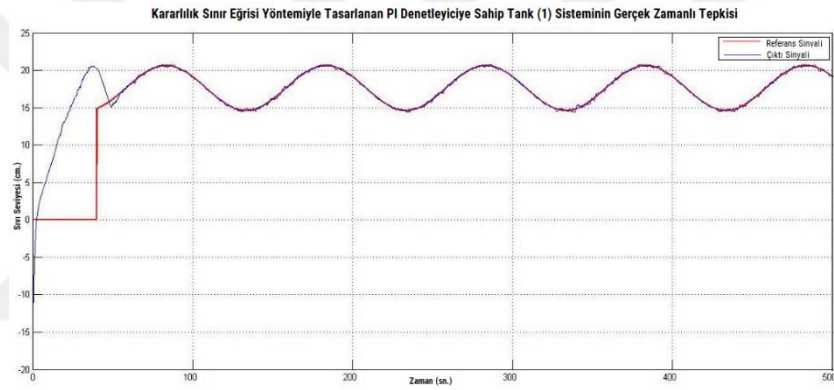


**Şekil 5.1.11:** Yeni Parametre Değerlerine Göre Ziegler-Nichols Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyiciye Sahip Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=2$ ” ve “ $K_i=1$ ”

## 5.2 Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicinin Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafikleri

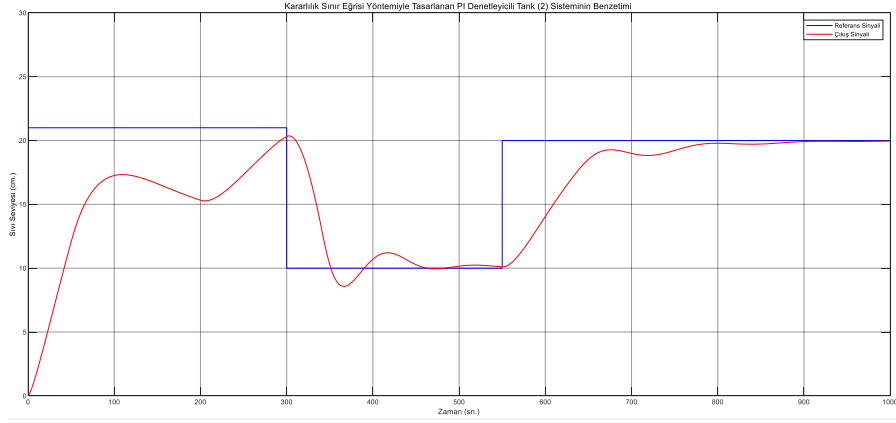


Şekil 5.2.1: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ”

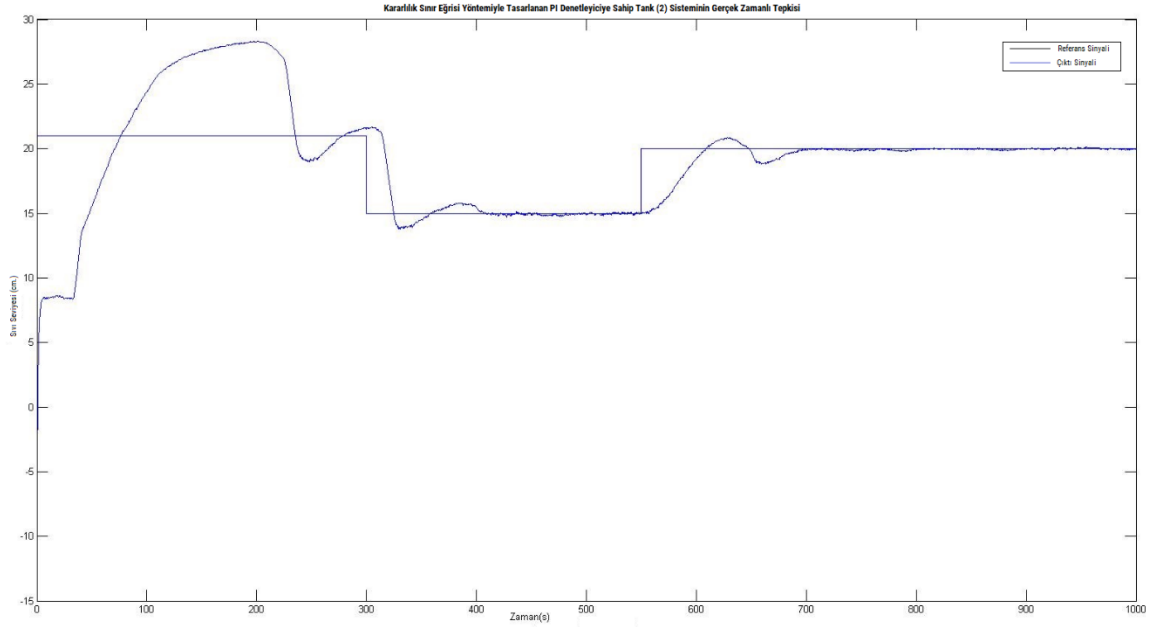


Şekil 5.2.2: Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ”

Kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak Tank (1) sistemi için PI denetleyici (kontrolör) tasarımı yapılmıştır. Tasarımda oransal kazanç “ $K_p=3$ ” ve “ $K_i=1.5$ ” olarak belirlenmiştir. Sistemin gerçek zamanlı tepkisi ve benzetim grafikleri Şekil (5.2.1) ve Şekil (5.2.2) de gösterilmiştir. Şekil (5.2.1) ve Şekil (5.2.2) incelenirse Tank (1) sisteminin çıkış sinyali, sinüzoidal bir girişe sahip referans sinyalini izleme konusunda iyi bir performans sergileyerek sistemin kararlı olduğu gözlemlenmiştir.



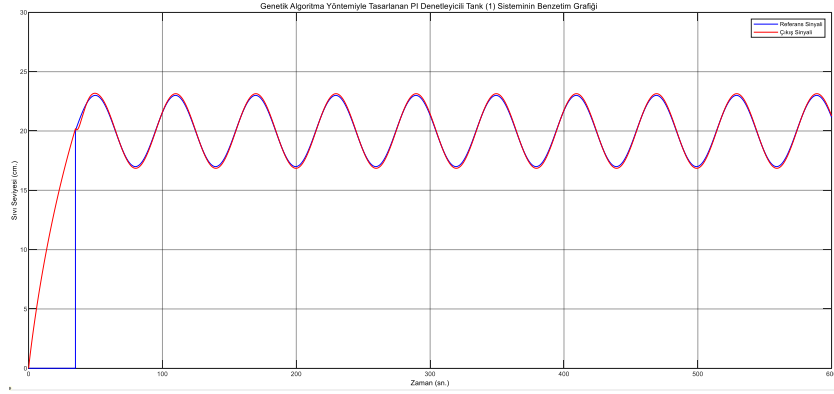
**Şekil 5.2.3:** Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=0.7$ ” ve “ $K_i=0.008$ ”



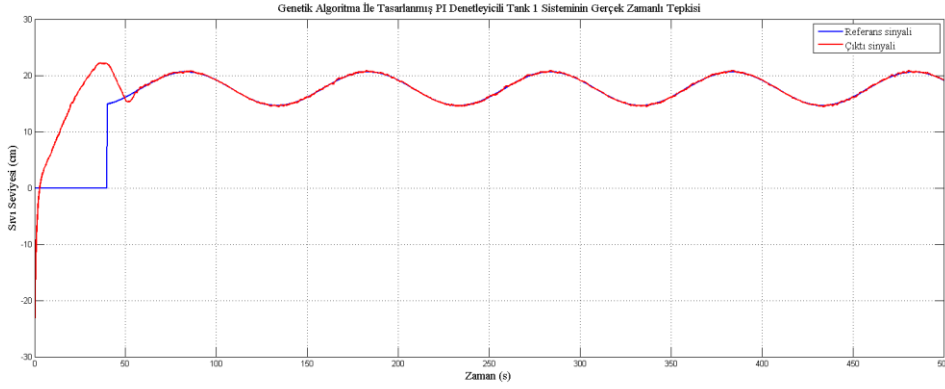
**Şekil 5.2.4:** Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=0.7$ ” ve “ $K_i=0.008$ ”

Tank (2) sistemi için kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanarak PI denetleyici tasarımında “ $K_p=0.7$ ” ve “ $K_i=0.008$ ” olarak belirlenmiştir. Sistemin benzetim grafiği Şekil (5.2.3)’ te ve gerçek zamanlı tepkisi Şekil (5.2.4)’ te gösterilmiştir. Şekil (5.2.3) ve Şekil (5.2.4)’ te gösterildiği üzere Tank (2) sistemimiz kararlı olarak çalışmaktadır.

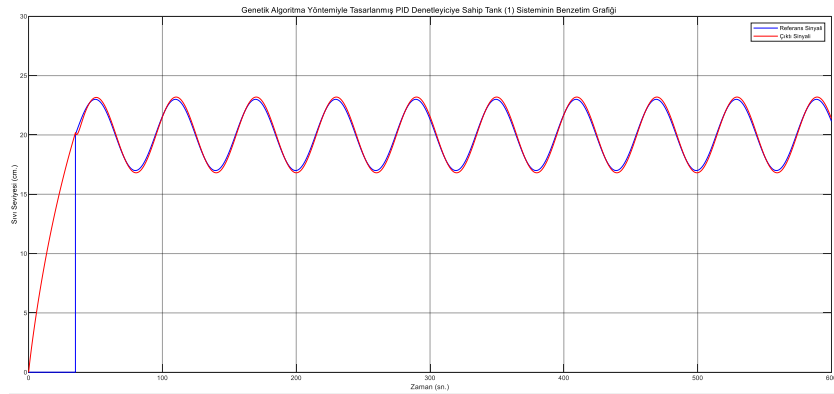
### 5.3 Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan Denetleyicilerin Gerçek Zamanlı Tepkileri ve Benzetim Grafikleri



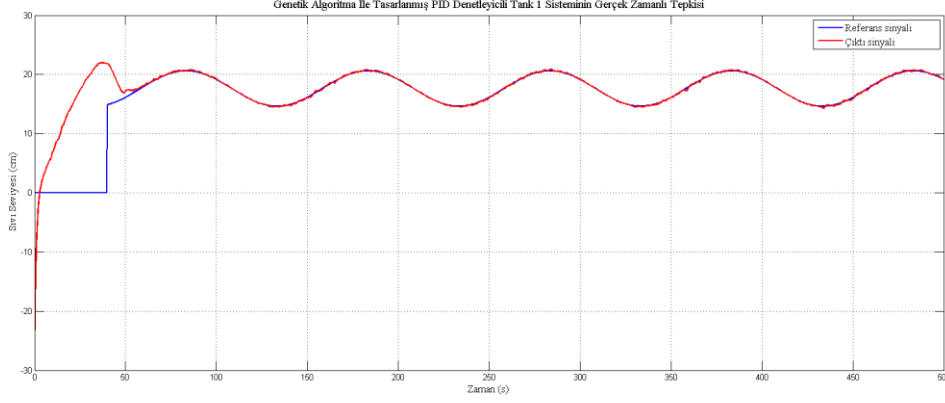
Şekil 5.3.1: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyicili Tank 1 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=2.046$ ” ve “ $K_i=1$ ”



Şekil 5.3.2: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanmış PI Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=2.046$ ” ve “ $K_i=1$ ”

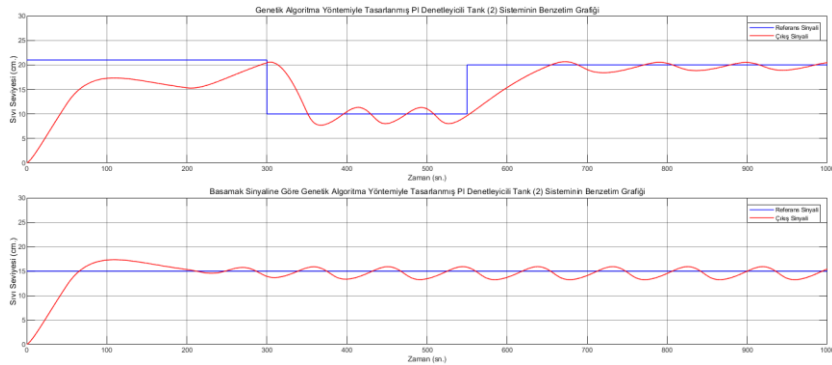


Şekil 5.3.3: Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=3.015$ ”, “ $K_i=0.54$ ” ve “ $K_d=-1.061$ ”



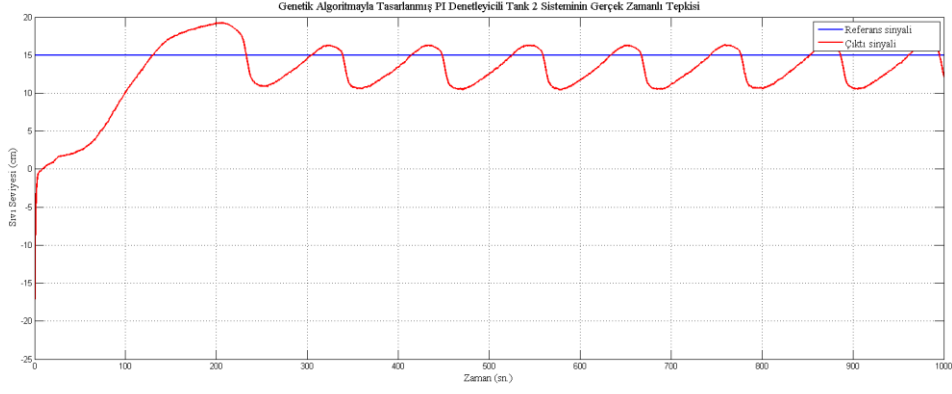
**Şekil 5.3.4:** Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank (1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=3.015$ ”, “ $K_i=0.54$ ” ve “ $K_d=-1.061$ ”

Genetik Algoritma yöntemiyle Tank (1) sistemimiz için PI denetleyici ve PID denetleyici tasarımı yapılmıştır. Şekil (5.3.1) ve Şekil (5.3.2)’ de PI denetleyiciye sahip Tank (1) sisteminin benzetim ve gerçek zamanlı sonuçları verilmektedir. Şekil (5.3.1) ve Şekil (5.3.2) incelendiğinde, tasarlanan PI denetleyici, Tank (1) sistemini kararlı kıldığı anlaşılmaktadır. Şekil (5.3.3) ve Şekil (5.3.4) incelendiğinde GA yöntemi türevsel kazanç değerini “ $K_d=-1.061$ ” olarak negatif bir değer bulmuştur. PI ve PID denetleyicilerde negatif değerler, kontrolörün çıkışının tersini alarak, sistemin olumsuz olarak etkilenmesine sebep olacağından genellikle tercih edilen bir durum değildir ve burada aslında negatif çıkışının sebebi Denklem (2.2.2.1)’ de ifade edilen Tank (1) sisteminin matematiksel modelinin türevsel kazancın etkisine ihtiyacının olmadığını ve hata sinyalinin azalıp negatif yönde değiştiği anlamına geldiği düşünülmektedir fakat Şekil (5.3.3) ve Şekil (5.3.4) incelendiğinde sistem kararlı bir şekilde referans sinyalini izlediği görülmektedir.

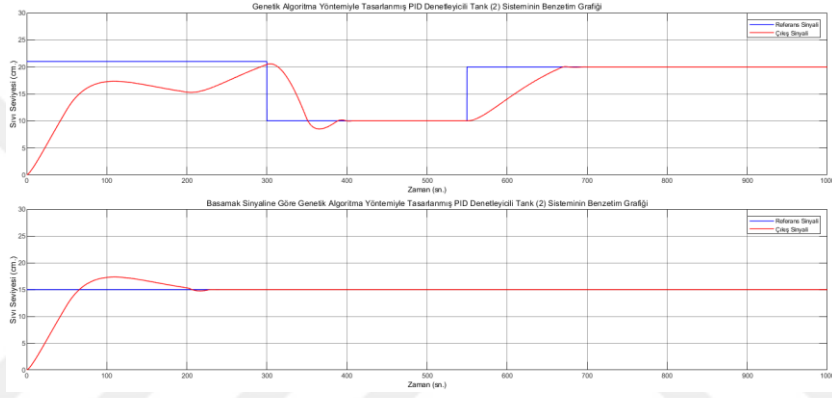


**Şekil 5.3.5:** Farklı Referans Girişine Göre Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank (2) Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ”





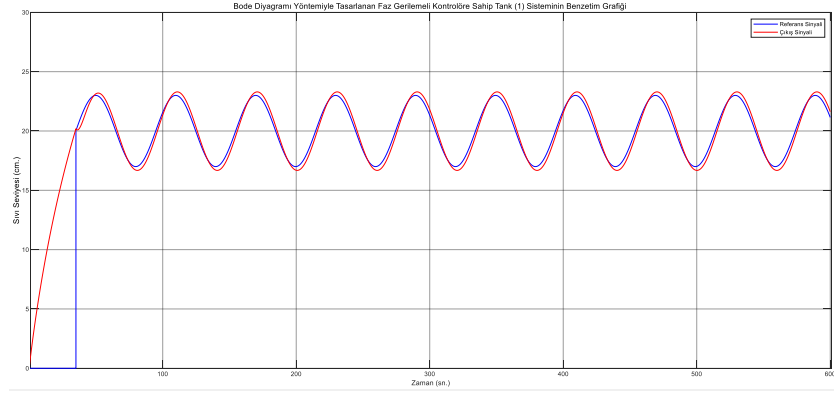
**Şekil 5.3.6:** Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PI Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi “ $K_p=1$ ” ve “ $K_i=0.104$ ”



**Şekil 5.3.7:** Genetik Algoritma Yöntemiyle Tasarlanan PID Denetleyicili Tank 2 Sisteminin Benzetim Grafiği “ $K_p=682.4171$ ”, “ $K_i=307.1308$ ” ve “ $K_d=916.1077$ ”

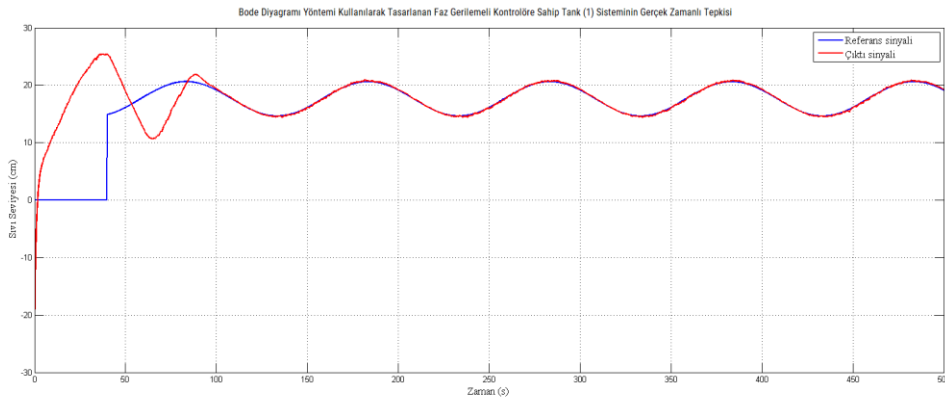
Genetik algoritma yöntemiyle PI ve PID denetleyici tasarımı Tank (2) sistemimiz için tasarlanmıştır. PI denetleyici için parametreler oransal kazanç “ $K_p=1$ ” ve tümlensel kazanç “ $K_i=0.104$ ” olarak belirlenirken PID denetleyici için oransal kazanç “ $K_p=682.4171$ ”, tümlensel kazanç “ $K_i=307.1308$ ” ve türevsel kazanç “ $K_d=916.1077$ ” olarak algoritma tarafından belirlenmiştir. Bu parametre değerlerine göre sistemin tepki grafikleri farklı referans sinyallerine göre Şekil (5.3.5), Şekil (5.3.6) ve Şekil (5.3.7)’ de sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde PI denetleyiciye sahip Tank (2) sistemimiz salınımlı bir tepki gösterirken, Şekil (5.3.7)’de gösterilen PID denetleyiciye sahip Tank (2) sistemimiz farklı referans sinyallerine rağmen daha kararlı bir şekilde giriş sinyalini izlediği görülmektedir.

## 5.4 Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolörün Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafiği



Şekil 5.4.1: Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip

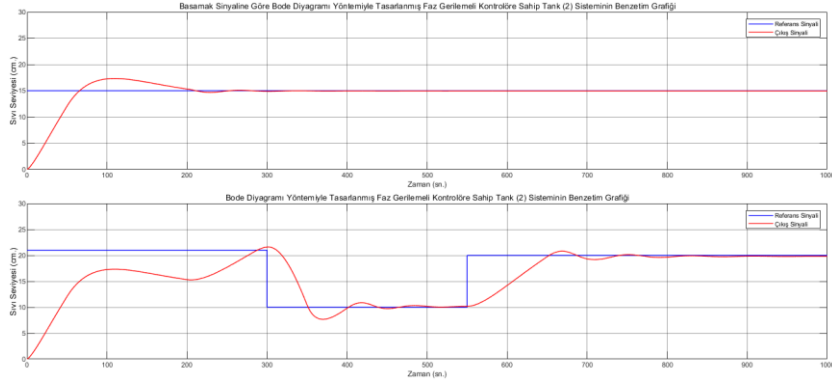
Tank (1) Sisteminin Benzetim Grafiği 
$$\left( G_{c-1Bode}(s) = 1.825 \frac{s + 0.15}{s + 0.0075} \right)$$



Şekil 5.4.2: Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank

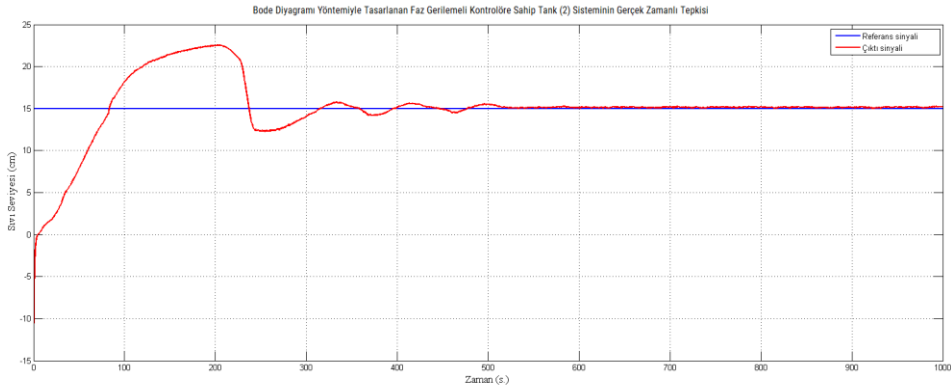
(1) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi 
$$\left( G_{c-1Bode}(s) = 1.825 \frac{s + 0.15}{s + 0.0075} \right)$$

Bode Diyagramı yöntemi kullanarak Tank (1) sistemi için Faz gerilemeli kontrolörün Şekil (5.4.1) ve Şekil (5.4.2)' de gösterilen benzetim ve gerçek zamanlı tepki grafikleri incelendiğinde sinüzoidal bir girişe karşı sistem sinüzoidal bir tepki vererek referans sinyalini takip etmiştir; fakat Şekil (5.1.2), Şekil (5.2.2), Şekil (5.3.2) ve Şekil (5.3.4)' te gerçek zamanlı tepki grafikleri verilen PI ve PID kontrolöre (denetleyiciye) sahip Tank (1) sistemine nazaran referans sinyalini daha geç yakaladığı görülmektedir. Buna rağmen Faz gerilemeli kontrolöre sahip Tank (1) sisteminin Şekil (5.4.2)'de gösterilen gerçek zamanlı tepkisi incelendiğinde, sistemin iyi bir performans sergilediği gözlemlenmektedir.



**Şekil 5.4.3:** Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (2) Sisteminin Farklı Referans Sinyallerine Göre Benzetim Grafiği

$$\left( G_{c-2_{Bode}}(s) = 1.612 \frac{s + 0.02}{s + 0.0116} \right)$$

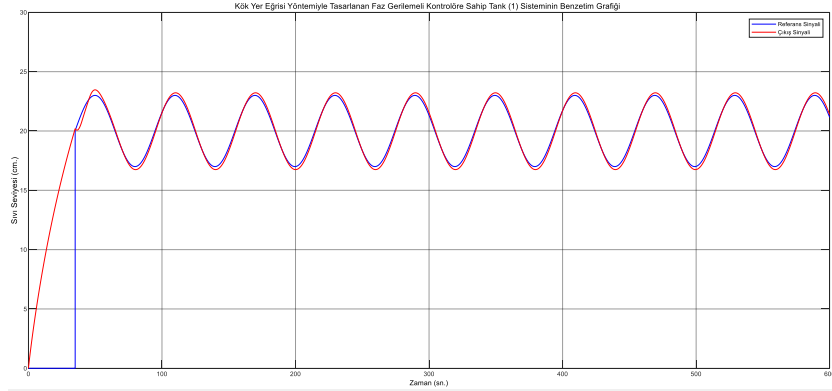


**Şekil 5.4.4:** Bode Diyagramı Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip

Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi  $\left( G_{c-2_{Bode}}(s) = 1.612 \frac{s + 0.02}{s + 0.0116} \right)$

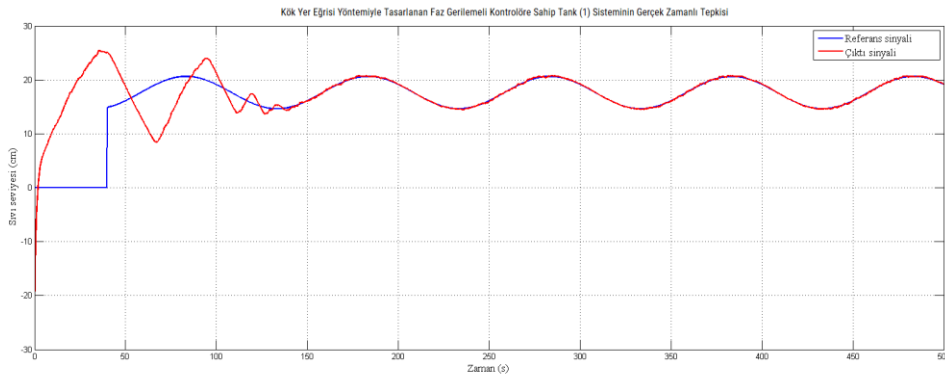
Şekil (5.4.3)' te farklı referans sinyallerine göre Bode diyagramı yöntemiyle tasarlanmış faz gerilemeli kontrolöre sahip Tank (2) sisteminin benzetim grafiği, Şekil (5.4.4)' te ise sistemin gerçek zamanlı tepkisi gösterilmektedir. Tasarlanan model, Şekil (5.2.4)' te gösterilen kararlılık sınır eğrisi yöntemiyle tasarlanan PI denetleyiciye nazaran daha geç bir yerleşme zamanına sahipken, ZN yöntemi kullanarak, sırasıyla Şekil (5.1.5) ve Şekil (5.1.7)' de gösterilen PI ve PID denetleyiciye ve Şekil (5.3.6)' da gösterilen GA yöntemiyle tasarlanmış PI denetleyiciye nazaran salınımların az olduğu gözlemlenerek daha iyi bir başarımla sergilediği tespit edilmiştir.

## 5.5 Kök Yer Eğrisi (Root Locus) Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolörün Gerçek Zamanlı Tepkisi ve Benzetim Grafiği



Şekil 5.5.1: Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank

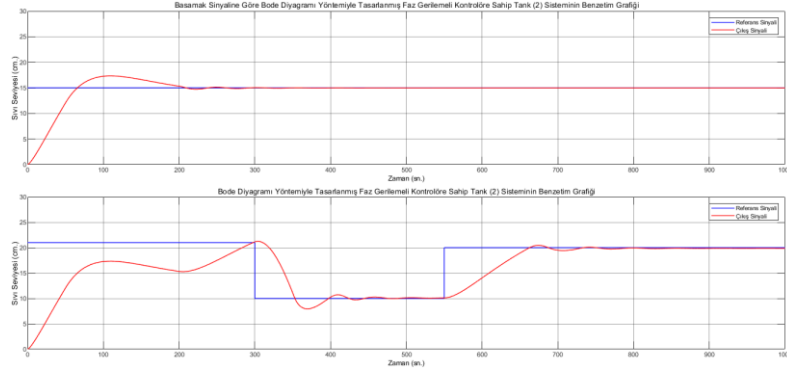
$$(1) \text{ Sisteminin Benzetim Grafiği } \left( G_{c1_{\text{Root-Locus}}} (s) = 1.15232 \frac{s+0.5}{s+0.02} \right)$$



Şekil 5.5.2: Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank

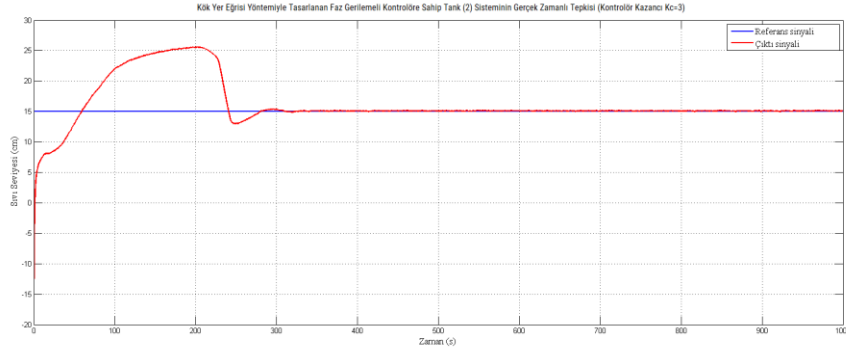
$$(1) \text{ Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi } \left( G_{c1_{\text{Root-Locus}}} (s) = 1.15232 \frac{s+0.5}{s+0.02} \right)$$

Kök yer eğrisi yöntemi kullanılarak tasarlanan faz gerilemeli kontrolörün Tank (1) sistemi üzerinde etkisi, Şekil (5.5.2) ve Şekil (5.4.2) incelendiğinde, Bode diyagramı yöntemi kullanılarak tasarlanan kontrolöre kıyasla daha zayıf bir başarımla sergilediği gözlemlenmiştir, fakat Şekil (5.5.1) ve Şekil (5.5.2)' de gösterildiği üzere faz gerilemeli kontrolör sistemi kararlılığa götürmüştür.



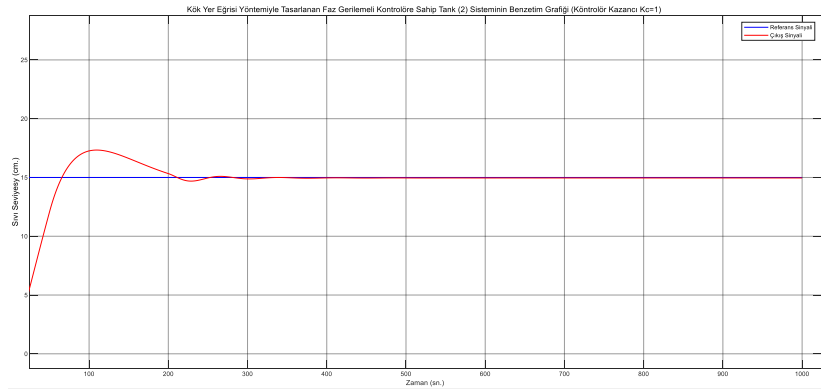
**Şekil 5.5.3:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (2) Sisteminin Farklı Referans Sinyallerine Göre Benzetim Grafiği

$$\left( G_{C-2_{Root-Locus}}(s) = 3 \frac{s + 0.0115}{s + 0.0081} \right)$$



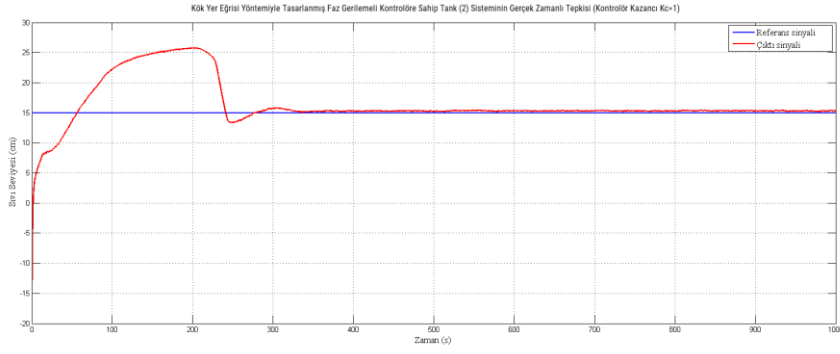
**Şekil 5.5.4:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (2) Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi

$$(2) \text{ Sisteminin Gerçek Zamanlı Tepkisi } \left( G_{C-2_{Root-Locus}}(s) = 3 \frac{s + 0.0115}{s + 0.0081} \right)$$



**Şekil 5.5.5:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (2) Sisteminin Kontrolör Kazancı "1" Olduğunda Sistemin Benzetim Grafiği

$$\left( G_{C-2_{Root-Locus}}(s) = 1 \frac{s + 0.0115}{s + 0.0081} \right)$$



**Şekil 5.5.6:** Kök Yer Eğrisi Yöntemiyle Tasarlanan Faz Gerilemeli Kontrolöre Sahip Tank (2) Sisteminin Kontrolör Kazancı “1” Olduğunda Sistemin Gerçek Zamanlı Tepkisi

$$\left( G_{C-2_{Root-Locus}}(s) = 1 \frac{s + 0.0115}{s + 0.0081} \right)$$

Kök yer eğrisi yöntemi kullanarak Tank (2) sistemi için faz gerilemeli kontrolör tasarımı Bölüm (4.1)’ de ifade edilmiştir. Tank (2) sistemimiz için belirlenen kontrolör kazancı “ $\hat{K}_c = 1$ ” olarak hesaplanmıştır. Fakat Şekil (4.1.4)’ te sunulduğu üzere sistem de kalıcı hâl hata meydana gelmiş olup bu nedenle faz gerilemeli kontrolörün kazancı deneme yanılma yoluyla “ $\hat{K}_c = 3$ ” olarak belirlenmiştir. Sistemin Şekil (5.5.3), Şekil (5.5.4), Şekil (5.5.5) ve Şekil (5.5.6)’ da sunulan benzetim ve gerçek zamanlı sonuçlarına göre, bu durumun sistem üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı kanısına varılmıştır. Kök yer eğrisi yöntemiyle tasarlanan faz gerilemeli kontrolör Şekil (5.4.4), Şekil (5.5.4) ve Şekil (5.5.6)’ da gösterilen Tank (2) sisteminin gerçek zamanlı tepkilerine göre, Bode diyagramı yöntemiyle tasarımın daha iyi bir performans sağladığı belirlenmiştir. Birleştirilmiş sıvı tank sisteminde sıvı seviye denetimini sağlamak için faz ilerlemeli kontrolör tasarımı bu çalışmada denenmiş fakat elde ettiğimiz matematiksel modelin faz ilerlemeli kontrolör tasarımına uygun olmadığı kanısına varılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında farklı yöntemler kullanılarak geleneksel PI/PID denetleyici ve faz gerilemeli kontrolör tasarımı yapılmıştır. İncelenen literatür çalışmaları kapsamında genellikle kesir dereceli PI/PID denetleyici, kayan kip denetleyici ve onların türevlerini kapsayan modern dayanıklı çalışmaları Tank sistemlerinde sıvı denetimi sağlamak için kullanmıştır. Bu tez kapsamında ise geleneksel denetleyicileri farklı yöntemler kullanarak tasarımını sağlayarak bu yöntemlerin sistem üzerindeki referans sinyalini izlenmesi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında Bölüm (5.1) ve Bölüm (5.5)’ te gösterilen gerçek zamanlı sonuçlar ve benzetim grafikleri incelendiğinde sistemimiz genel

olarak referans sinyalini izlemede başarı sağlamış olup sistemimiz kararlı bir şekilde çalışmıştır ve sonuç olarak kuramsal çalışma desteklenmiştir.

Bu çalışmanın gelecek çalışması için çok girişli çok çıkışlı olarak, birleştirilmiş sıvı tank sisteminin kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanarak PI denetleyicinin kararlılık sınır eğrisini elde etmek ve bu sistemi kararlı kılan en iyi parametrenin tespitini sağlamak için kararlılık bölgesinden alınan parametreleri genetik algoritma da başlangıç şartı kullanarak tankın denetimini sağlamak ve ayrıca kesir dereceli PI denetleyici tasarımı yaparak ikisi arasında karşılaştırmalı bir çalışma yapmak amaçlanmaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Dorf, R.C. & Bishop, R.H.** (2017). *Modern control systems* (13th ed). Pearson.
- [2] **Blandon, E. D. G.**. A brief history of feedback control. Erişim :19 Mart 2023, [https://www.academia.edu/28014483/A\\_BRIEF\\_HISTORY\\_OF\\_FEEDBACK\\_CONTROL](https://www.academia.edu/28014483/A_BRIEF_HISTORY_OF_FEEDBACK_CONTROL)
- [3] **Sarioglu, M.K.** (1995). *Dijital kontrol sistemleri (2. basım)*. Sistem yayıncılık.
- [4] **Tan, N.** (2003). Computation of stabilizing Lag/Lead controller parameters. *Computers & Electrical Engineering*, 29(8), 835–849. [https://doi.org/10.1016/S0045-7906\(03\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7906(03)00012-0)
- [5] **Al-Hadithi, B. M., Matia, F., & Jimenez, A.** (2003.). Fuzzy Control for a Liquid Level System. *Proceedings of the 3rd Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology*, (pp.355-360). Zittau, Germany, September 10-12.
- [6] **Aktas, M., Altun, Y. Erol, O.** (2017). LQR Control of Liquid Level And Temperature Control For Coupled-Tank System. *International Conference on Hydraulics, Pneumatics, Tools, Sealing Elements, Fine Mechanics, Specific Electronic Equipment & Mechatronics–HERVEX 2017*. (pp. 74-79). Baile Govora, Romania, November 8-10.
- [7] **Abbas, H., Asghar, S., & Qamar, S.** (2012). Sliding Mode Control for Coupled-Tank Liquid Level Control System. *10th International Conference on Frontiers of Information Technology*, (pp.325–330). Islamabad, Pakistan, December 17-19. <https://doi.org/10.1109/FIT.2012.65>
- [8] **Roy, P., Kar, B., Kumar, A., & Roy, B. K.** (2016). Level Control of Two Tank system by Fractional Order Integral State Feedback Controller Tuned by PSO with Experimental Validation. *Measurement and Instrumentation. 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, (pp. 224-228). Kolkata, India, January 8-10. Doi: 10.1109/CMI.2016.7413744
- [9] **Roy, P., & Krishna Roy, B.** (2016). Fractional order PI control applied to level control in coupled two tank MIMO system with experimental validation. *Control Engineering Practice*, 48, 119–135. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.01.002>



- [10] **Khan, M. K., & Spurgeon, S. K.** (2006). Robust MIMO water level control in interconnected twin-tanks using second order sliding mode control. *Control Engineering Practice*, 14(4), 375–386. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2005.02.001>
- [11] **Gupta, H., & Verma, O.** (2012). Intelligent Controller for Coupled Tank System. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Volume 2, (pp.154–157). April 4. ISSN: 2277 128X.
- [12] **Kumar, A., Vashishth, M., & Rai, L.** (2013). Liquid level control of coupled tank system using fractional PID controller. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics*, (pp.61-64) 3(1).
- [13] **Yeroglu, C., Onat, C., & Tan, N.** (2009). A New Tuning Method for PI $\lambda$ D $\mu$  Controller. *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, (pp. 312-316). Bursa, Turkey, November 5-8.
- [14] **Aksu, I. O., & Coban, R.** (2019). Sliding mode PI control with backstepping approach for MIMO nonlinear cross-coupled tank systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29(6), 1854–1871. <https://doi.org/10.1002/rnc.4469>
- [15] **Ramli, M. S., Ismail, RM. T. R., Ahmad, M. A., Nawi, S. M., & Hussin, M. A. M.** (2009). Improved Coupled Tank Liquid Levels System Based on Swarm Adaptive Tuning of Hybrid Proportional-Integral Neural Network Controller. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(4), 669–675. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2009.669.675>
- [16] **Almutairi, N. B., & Zribi, M.** (2006). Sliding mode control of coupled tanks. *Mechatronics*, 16(7), 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2006.03.001>
- [17] **Saad, M., Albagul, A., & Abueejela, Y.** (2014). Performance Comparison between PI and MRAC for Coupled-Tank System. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2(3), 316–321. <https://doi.org/10.12720/joace.2.3.316-321>
- [18] **G. Stohy, M., S. Abbas, H., M. El-Sayed, A.-H., & G. Abo El-maged, A.** (2020). Parameter Estimation and PI Control for A Water Coupled Tank System. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 38(2), 147–159. <https://doi.org/10.21608/jaet.2020.73062>

- [19] **Bhambhani, V., & Chen, Y.** (2008). Experimental study of fractional order proportional integral (FOPI) controller for water level control. *2008 47th IEEE Conference on Decision and Control*, (pp.1791–1796). Cancun, Mexico. December 9-11. <https://doi.org/10.1109/CDC.2008.4739341>
- [20] **Sekban, H., Can, K., & Başı, A.** İkili tank sıvı-seviye sisteminin PI ve geri adımlamalı kontrol yöntemleri ile kontrolü ve performans analizi. *In ELECO International Conference on Electrical and Electronic Engineers*, (pp. 01-03), Türkiye
- [21] **Sekban, H. T., Can, K., Orman, K., & Başı, A.** (2016). Dörtlü Tank Sıvı-Seviye Sisteminin Kesir Dereceli PI Kontrolcü ile Kontrolü The Control of a Quadruple Tank Liquid-Level System using Fractional-Order PI Controller. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2016)*, (pp. 634-638), Eskişehir, Türkiye, Ekim-2016
- [22] **Mahapatro, S.R.** (2012-2014). Control Algorithms for a Two Tank Liquid Level System: An Experimental Study, Thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology (Master Thesis), Rourkela, Odisha, India. <https://core.ac.uk/download/pdf/80147466.pdf>
- [23] **Feedback Instruments Ltd. Coupled Tanks Control Experiments Manual: Vol. Manual: 33-041S Ed02 072013.** Feedback Instruments Ltd.
- [24] **Jagan, N.C.** (2008). *Control Systems* (8th ed). BSP-BS Publications.
- [25] **Ogata, K.** (2010). *Modern control engineering* (5th ed). Prentice-Hall.
- [26] **Ljung, L.** (2016). *System Identification Toolbox™*. MathWorks, 3036.
- [27] **Tan, N., & Atherton, D. P.** (2006). Design of stabilizing PI and PID controllers. *International Journal of Systems Science*, 37(8), 543–554. <https://doi.org/10.1080/00207720600783785>
- [28] **CTM: Lead/lag.** (n.d.). *Designing lead and lag compensators*. Erişim 16 Eylül 2023, <https://www3.diism.unisi.it/~control/ctm/extras/lead.lag.html>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad**

:Ali Murat DEĞİRMENCİ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2021 yılından beri FMV Işık Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi altında bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktayım.

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Değirmenci, A. M., Tan, N., & İstefanopulos, Y.** (2022). Kararlılık Sınır Eğrisi Kullanarak Birleştirilmiş Sıvı Tank Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı. *Firat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*. 1(1), 356-361, 2022. [https://fen.firat.edu.tr/subdomain\\_files/fen.firat.edu.tr/files/28/UH\\_62.pdf](https://fen.firat.edu.tr/subdomain_files/fen.firat.edu.tr/files/28/UH_62.pdf)
- **Değirmenci, A. M., Tan, N., & İstefanopulos, Y.** (2022). Lag Controller Design For Copled Tank System. *International Congress on Engineering, Architecture and Design, Güven Plus Grup A.Ş* (pp.1569–1577), Istanbul, Turkey, December 24,25-26.