

# Kararlılık Sınır Eğrisi Kullanarak Birleştirilmiş Sıvı Tank Sistemi İçin PI Denetleyici Tasarımı

## PI Controller Design For Coupled Liquid Tanks System Using Stability Boundary Locus

Ali Murat DEĞİRMENCI<sup>1</sup>, Nusret TAN<sup>2</sup>, Yorgo İSTEFANOPULOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
FMV Işık Üniversitesi, İstanbul/Şile  
murat.degirmenci@isikun.edu.tr

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
İnönü Üniversitesi, Malatya  
nusret.tan@inonu.edu.tr

<sup>3</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
FMV Işık Üniversitesi, İstanbul/Şile  
yorgo.istefanopulos@isikun.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada, birbirine bağlı ikili sıvı tank sistemi için, Kararlılık Sınır Eğrisi yöntemi kullanılarak, bir PI denetleyici (Oransal-Tümlevsel) tasarlanmıştır. Tasarıma başlamadan önce iki ayrı tankın matematiksel modeli elde edilmiştir. Elde edilen modelden yola çıkarak, tanklarda bulunan sıvıların seviye kontrolü için PI denetleyici tasarlanmış ve tasarım sonuçları MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmiştir. Sonuç olarak, sistemin benzetim ve gerçek zamanlı tepkileri incelenerek kuramsal çalışma desteklenmiştir.

### Abstract

In this paper, a PI controller (Proportional, Integral) has been designed for the interconnected dual liquid tank system, using the Stability Boundary Locus method. Before starting the design, a mathematical model of two separate tanks has been obtained. Based on this model, a PI controller has been designed for the level control of the liquids in the tanks and the design results have been modeled in MATLAB/SIMULINK. As a result, the theoretical study has been supported by examining the simulation and the real-time responses of the system.

### 1. Giriş

Sıvı tank sistemleri, süreç endüstrilerinde sıvı seviyesinin denetimi için sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle atık arıtma, kimyasal işleme, nükleer enerji santralleri, ısıtıcı kazanlar, süzgeçleme vb. alanlarda sıvı seviye denetimi önem arz etmektedir. Sıvı tank sistemleri veya sıvı seviye denetim sistemlerinde, dalgıç pompalar, vanalar ve sıvı seviyesini ölçmek için duyargaçlar (sensor) bulunur. Bu sistemler genellikle, çok girişli çok çıkışlı (Multi Input-Multi Output) sistemlerdir ve tanklar birbirine karmaşık şekilde bağlantılar içermektedir. Bir tanktan çıkan sıvı, diğer bir tank için girer olmaktadır. Sistemin karmaşık yapısından dolayı, sıvı

seviyesinin denetlenmesi önemli bir kontrol problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sıvı tank sistemi için yapılan çalışmalar incelendiğinde, Roy ve diğerleri [1] yaptığı çalışmada, Kesir Dereceli Tümlüsel Durum Geri Beslemeli (Fractional Order Integral State Feedback – FOISF) denetleyicinin, Tümlüsel Durum Geri Besleme (Integral State Feedback - ISF) denetleyicisine göre daha iyi bir başarımla sergilediğini gösteren bir çalışma yapmıştır. Başka bir çalışmada ise Kesir Dereceli Oransal Tümlüsel (Fractional Order Proportional Integral – FOPI) denetleyicilerin, PI, PID gibi denetleyicilerden daha iyi çalıştığını gösteren çalışma yapmıştır [2]. M. K. Khan ve S. K. Spurgeon [3], birbirleriyle bağlantılı tank sistemi için, bir dayanıklı/gürbüz denetim (Robust Control) yöntemi olan, kayan kip denetleyici (Sliding Mode Control) algoritması geliştirmişlerdir. Başka bir çalışmada [4], bağlantılı tank sistemi için statik ve dinamik olmak üzere iki kayan kip denetleyici üzerine çalışma yapılmıştır. H. Gupta ve diğerleri [5] yaptığı çalışmada, bulanık mantığa dayalı (Fuzzy Logic) bir denetim çalışmasını birleştirilmiş tank sistemi için uygulayarak akıllı denetleyici tasarımında bulunmuştur. I. O. Aksu ve R. Coban [6], sıvı tank sistemi için, kayan kip denetleyici, PI denetleyici, kayan kip PI denetleyici, geri adım yaklaşımlı kayan kip PI denetleyici gibi farklı denetleyiciler kullanarak, denetleyicilerin sistemde verdiği tepkileri inceleyip, başarımlarını karşılaştıran bir makale çalışması sunmuştur. M.S. Ramli ve diğerleri [7] gelişmiş melez (hibrit) parçacık sürü tabanlı PI denetleyicisini, iki girdili iki çıkıtlı (Two Input-Two Output / TITO) ikili tank sistemine uygulamışlardır.

Bir PI/PID vb. denetleyiciler, temel manada hata sinyalini sıfır yapıp, girdi sinyalinin çıkışta görülmesini sağlayan bir süzgeç görevi görmektedir. Bu nedenle bir sistemin en iyi şekilde denetimini sağlamak için PI/PID vb. denetleyicilerin parametrelerinin doğru şekilde seçilmesi gerekir. Denetleyicilerin parametrelerini ayarlamak için sezgisel (heuristic) veya analitik en iyileme yöntemleri vardır. Sezgisel yöntemler genellikle algoritma tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemlere örnek olarak Tabu Arama, Karınca Koloni, Genetik

Tabanlı algoritmalar örnek verilebilir [8]. Analitik en iyileme yöntemleri ise daha çok matematiğin hâkim olduğu yöntemlerdir.

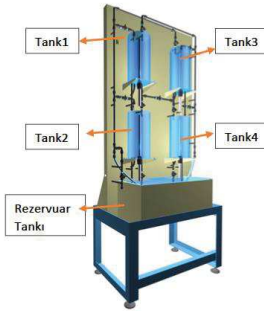
Bu bildiri çalışması kapsamında, tek girdili tek çıktılı (Single Input Single Output-SISO) ikili birbirine bağlı tank sistemi için PI denetleyici tasarlanmıştır. PI denetleyicinin en verimli şekilde çalışabilmesi için N. Tan ve diğerleri [9] tarafından tasarlanan ve analitik bir en iyileme yöntemi olan Kararlılık Sınır Eğrisi yöntemi kullanılmıştır.

Çalışma temel olarak dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde birleştirilmiş sıvı tank sisteminin tanıtılması ve tankların modellenmesi ele alınmıştır. Tankların PI denetleyici parametrelerini belirlemek için kullanılan yöntem Bölüm (3)' te ve kuramsal çalışmanın sonuçları ise Bölüm (4)' te gösterilmiştir.

## 2. Sıvı Tank Sistemi

Tank sistemleri çeşitli endüstriyel süreçlerde çok sık kullanılır. Bu sistemlerin sıvı seviye denetimini sağlamak maliyet, güvenlik vb. parametreler açısından kolay değildir. Bu nedenle bu tarz sistemlerin denetimini sağlamak ve çeşitli düzenlemelerini güvenilir bir şekilde denetlemek için genellikle laboratuvar ortamlarında kullanılan deneysel set düzenekleri kullanılması tercih edilir.

Şekil (1) ve Şekil (2)'de Feedback Instruments Ltd. tarafından tasarlanan birleştirilmiş tank sistemi görülmektedir. Birbirine bağlı dört tanktan ve bir rezervuar tankından oluşmuş olan bu sistem MATLAB/SIMULINK ile uyumlu olarak çalışarak sıvı seviye denetimini sağlamamıza olanak sağlayan bir kimyasal tesis parçası modelidir. Tanklar birbirlerine plastik borularla bağlanmıştır ve sıvının tanklar arasında çeşitli yapılandırılmalarla akması için vanalar bulunmaktadır. Sıvıların seviyelerinin ölçülmesi tanklarda bulunan sıvı seviye duyargalarıyla (sensor) sağlanmaktadır.



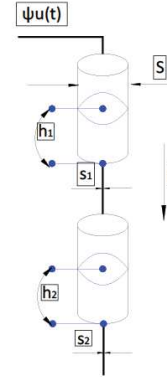
Şekil 1: Sıvı tank sistemi ve tankların konumları (Şekil Ref. [10])



Şekil 2: Sıvı tank sistemi

### 2.1. Birleştirilmiş Sıvı Tank Sisteminin Matematiksel Modeli

Bir sistemin denetimini sağlayabilmek için öncelikle sistemin matematiksel modellerinin oluşturulması gerekir. Şekil (3)' te birbirine bağlı iki tankın doğrusal olmayan modeli gösterilmektedir. Bu doğrusal olmayan modelin matematiksel ifadesi Denklem (1) ve (2)'de sunulmuştur [10].



Şekil 3: Birbirine bağlı iki tankın doğrusal olmayan sistem modeli

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{s_1}{S} \sqrt{2gh_1(t)} + \psi u(t) \quad (1)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{s_1}{S} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{s_2}{S} \sqrt{2gh_2(t)} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)' de gösterilen zaman uzayındaki matematiksel ifadeler sisteme uygulanan  $u$  voltajı ile  $h_1$  ve  $h_2$  sıvı seviyeleri arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Burada sıvı seviyelerini belirleyen  $u$  voltajının kendisidir. Şekil (2)' de gösterilen tank sistemi için denetim sinyali (0V-5V) arasındadır.

Denklem (1) ve (2)' de gösterilen doğrusal olmayan matematiksel modelin parametrelerinin açıklanması Tablo (1)' de sunulmuştur. Denklem (1) ve Denklem (2) ile ifade edilen matematiksel model ele alınarak birinci tank veya ikinci tank için sıvı seviyesi denetlendiğinde, sıvı seviyesi modelin çıktısını ifade ederken, dalgıç pompanın kontrol voltajı  $u(t)$  ise sistemin girdisini ifade etmektedir. Bu nedenle sistem tek girdili tek çıktılı (Single Input-Single Output SISO) bir sistem halini almaktadır. Bu durumu ifade eden blok diyagramı (öbek çizeneği) Şekil (4)' te gösterilmiştir.

Tablo 1: Denklem (1-2) ile ifade edilen matematiksel ifadelerin parametrelerinin açıklamaları

$h_1$	Tank (1)'in sıvı seviyesi	$g$	Yerçekimi sabiti
$h_2$	Tank (2)'nin sıvı seviyesi	$s_1$	Tank (1)'in çıkış alanı
$S$	Tankların kesit alanı	$s_2$	Tank (2)'nin çıkış alanı
$\psi$	Kontrol voltajını pompadan gelen su akışıyla ilişkilendiren sabit		



Şekil 4: Tek girdili tek çıktılı birleştirilmiş tank sisteminin blok diyagramı (öbek çizeneği) (Şekil Ref. [10])

### 2.1.1. Tank (1) ve Tank (2) için doğrusal sistem modeli

Doğrusal olmayan matematiksel modeller kullanarak, bir sistemin denetimini sağlamak oldukça zor bir iştir. Bu nedenle kontrol edilecek sistem için, oransal-tümlevsel (PI) denetleyici tasarımına başlamadan önce sistemin doğrusal modellerinin elde edilmesi gerekir.

Doğrusal olmayan sistemlerden doğrusal model elde etmek için farklı yöntemler vardır. Şekil (1) ve (2)'de gösterilen tank sistemi MATLAB/SIMULINK ile uyumlu çalışan bir laboratuvar sistemidir. Bu uyumluluktan dolayı sistem, MATLAB üzerinden çalıştırılarak Tank (1) ve Tank (2) için model tanımlama deneyi yapmamıza yardımcı olur. Model elde edilirken Tank (1) veya Tank (2) belli bir süre otomatik çalıştırılarak veriler elde edilir. Elde edilen verilerden Matlab Sistem Tanımlama Aracı (Matlab System Identification Toolbox) kullanılarak Laplace uzayında Tank (1) ve Tank (2)'nin matematiksel modeli elde edilmiştir. Bu doğrusal matematiksel modeller sırasıyla Denklem (3) ve Denklem (4)'te gösterilmiştir.

$$G_{T1}(s) = \frac{0,7632s + 5,52 \cdot 10^{-4}}{s^5 + 0,877s^4 + 3,8518s^3 + 3s^2 + 0,0385s + 1,214 \cdot 10^{-4}} \quad (3)$$

$$G_{T2} = \frac{43,8s^2 + 42,87s + 25,43}{s^4 + 3,401s^3 + 6,431s^2 + 5,219s + 5,86} \quad (4)$$

Denklem (3) ve Denklem (4) ile gösterilen tankların MATLAB/SIMULINK kullanarak, ölçülen ve benzetim sonucu model çıktılar Şekil (5) ve Şekil (6)'da gösterilmiştir. Şekil (5)'te gösterildiği gibi Tank (1)'in matematiksel modeli %92,04 uyumlu olarak tasarlanmıştır. Tank (2) ise ortam şartlarının verdiği olumsuz durumlardan dolayı %77 uyumluluk göstermiştir.

### 3. PI Denetleyici Tasarımında Kullanılan Yöntem

Açık döngü denetleyiciler ve oransal-tümlevsel (PI) denetleyiciler, endüstriyel sıvı seviye denetiminde yaygın olarak kullanılır ve makul başarımla özelliklerine sahip sıvı seviye denetim sistemlerinin işlevselliğine izin verir [11].

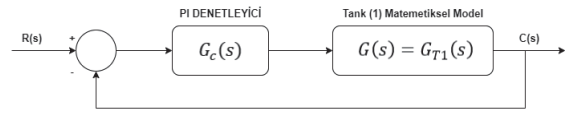
Kararlılık sınır eğrisi yöntemi, PI denetleyicilerin  $K_p$  (oransal sabit),  $K_i$  (tümlevsel sabit) parametrelerinin belirlenebilmesinde kullanılan analitik bir optimizasyon yöntemidir. Yöntem,  $(K_p, K_i)$  uzayında sistemin kararlı olduğu

sınır eğrilerini çizdirir. Tank (1) ve Tank (2) için kararlı olduğu eğri grafiği Şekil (8) ve Şekil (10)'da sunulmuştur. Şekil (8) ve (10) incelendiğinde kırmızı ile taralı kısım kararlı olduğu bölgeyi gösterirken, mavi ile çizilen kısım yani sınır noktasında sistem kritik kararlı, taralı olmayan kısımda ise sistem kararsız olarak davranır (bkz. Şekil (9) ve (11)).

Bu yöntemde öncelikle sistemin Laplace uzayında transfer fonksiyonu bulunur. Kontrol teorisine göre transfer fonksiyonu, Laplace uzayında bir sistemin çıktısının girdisine oranı olarak ifade edilir. Bulunan transfer fonksiyonundan yararlanarak sistemin karakteristik denklemi elde edilebilir. Karakteristik denklem, kapalı çevrim transfer fonksiyonunun paydasının sıfıra eşit olduğu denklemdir.

Bu bölümde Tank (1) ve Tank (2)'nin matematiksel modellerinden yararlanarak (bkz. Denklem (3-4)) sistemlerin ayrı ayrı karakteristik denklemleri elde edilmiştir. Karakteristik denklem Laplace uzayındadır. N. Tan ve diğerleri [9] tarafından tasarlanan yöntem ise frekans uzayında tasarlanmış bir yöntemdir; bu nedenle işlemler yapılırken Laplace uzayından Frekans uzayına geçiş yapılmıştır. Bu işlemler aşağıda Denklem (5) ile Denklem (15) arasında gösterilmiştir.

Şekil (7)'de ifade edilen blok diyagramında (öbek çizeneğinde)  $G_c(s)$  PI denetleyicidir.  $G(s)$  ise Tank (1)'in matematiksel modelleridir. Bir PI denetleyicinin Laplace uzayında matematiksel ifadesi Denklem (5)'te Tank (1) in Laplace uzayında matematiksel ifadesi Denklem (3)'te gösterilmiştir.



Şekil 7: Birim geri beslemeli Tank (1) sisteminin blok diyagramı (öbek çizeneği)

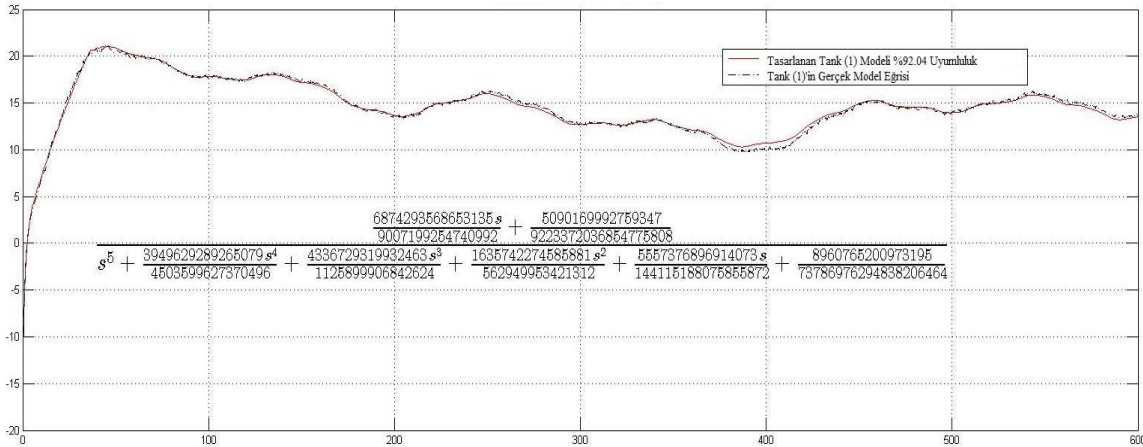
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

Buna göre sistemin transfer fonksiyonu ve karakteristik denklemi şunlardır:

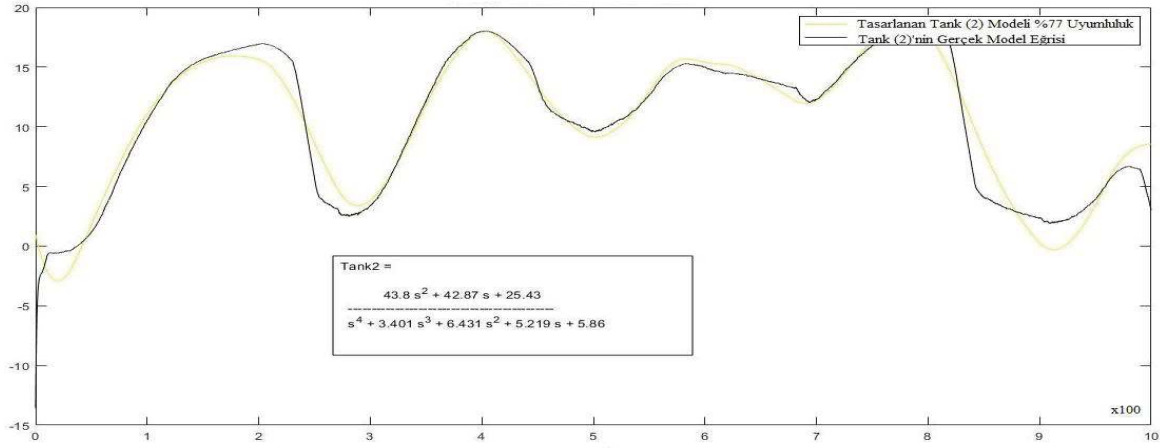
$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s).G(s)}{1 + G_c(s).G(s)} \quad (6)$$

$$\Delta(s) = 1 + G_c(s).G(s) = 0 \quad (7)$$

Burada;



Şekil 5: Tank (1) için ölçülen ve benzetim sonuçlu model çıktısı  
Kırmızı: Tasarlanan model eğrisi/ Siyah: Gerçek model eğrisi



Şekil 6: Tank (2) için ölçülen ve benzetim sonuçlu model çıktısı  
Sarı: Tasarlanan model eğrisi/ Siyah: Gerçek model eğrisi

$\Delta(s)$ : Karakteristik denklemi,  $T(s)$ : Kapalı çevrim transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

Denklem (3) ve Denklem (5) kullanılarak Denklem (7)' de yerine yazılırsa birim geri beslemeli sistemin karakteristik denklemi bulunabilir.

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= s^6 + 0,877s^5 + 3,8518s^4 \\ &+ 3s^3 + (0,7632K_p + 0,0385)s^2 \\ &+ (1,214 \cdot 10^{-4} + 5,52 \cdot 10^{-4}K_p + 0,7632K_i)s \\ &+ 5,52 \cdot 10^{-4}K_i = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Karakteristik denklemi Laplace uzayından Frekans uzayına geçirmek için  $s=j\omega$  dönüşümü uygulanır. Şekil (8)' de gösterilen birim geri beslemeli Tank (1) sisteminin frekans uzayında karakteristik denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega) &= -\omega^6 + j\omega^5 0,877 + \omega^4 3,8518 \\ &- j\omega^3 3 - \omega^2 (0,7632K_p + 0,0385) \\ &+ j\omega (1,214 \cdot 10^{-4} + 5,52 \cdot 10^{-4}K_p + 0,7632K_i) \\ &+ 5,52 \cdot 10^{-4}K_i = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Denklem (9)' da gösterilen karakteristik denklemin gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı sıfıra eşitlenir ve frekansa bağlı iki bilinmeyenli iki denklem karşımıza çıkar (bkz. Denklem (10-11)). Bu iki bilinmeyenli iki denklemin çözümü yapılarak frekansa bağlı  $K_p$  ve  $K_i$  değeri sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (13)' te sunulmuştur.

$$\begin{aligned} -\omega^6 + \omega^4 3,8518 - \omega^2 0,0385 \\ = \omega^2 K_p 0,7632 - K_i 5,52 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -\omega^5 0,877 + \omega^3 3 - \omega 1,214 \cdot 10^{-4} \\ = \omega K_p 5,52 \cdot 10^{-4} + \omega K_i 0,7632 \end{aligned} \quad (11)$$

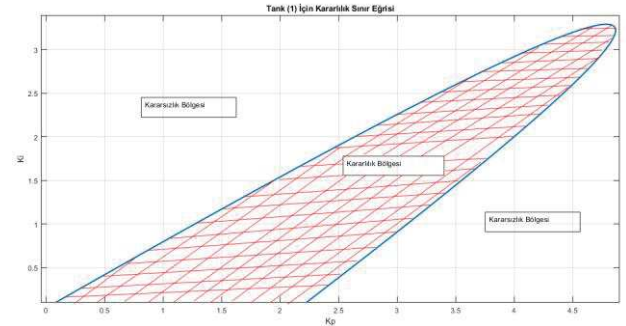
$$K_p \cong \frac{\omega^7 (-0,7632) + \omega^5 3 + \omega^3 (-0,0277) + \omega (-6,7 \cdot 10^{-8})}{\omega^3 0,6 + \omega (3,05 \cdot 10^{-7})} \quad (12)$$

$$K_i \cong \frac{\omega^6 (-0,67) + \omega^4 (2,3) + \omega^2 (-7,14 \cdot 10^{-5})}{\omega^2 0,6 + (3,05 \cdot 10^{-7})} \quad (13)$$

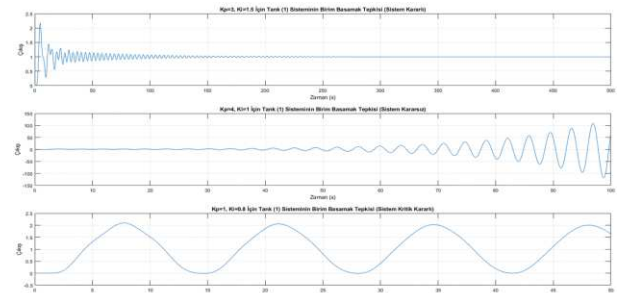
Yukarıda bahsedilen işlem adımları Tank (2) için yapıldığında frekansa bağlı  $K_p$  ve  $K_i$  parametreleri, Denklem (14) ve Denklem (15)' de ifade edilmiştir. Denklem (12-13) ve Denklem (14-15) kullanılarak elde edilen, kararlılık sınırı eğrisi grafiği ve farklı  $K_p$  ve  $K_i$  değerlerinde sistemlerin tepkisi Şekil (8) ve Şekil (11) arasında gösterilmiştir.

$$K_p \cong \frac{\omega^7 43,8 - \omega^5 161,30743 + \omega^3 196,4698 - \omega 149,0198}{\omega^5 1918,44 - \omega^3 389,8311 + \omega 646,6849} \quad (14)$$

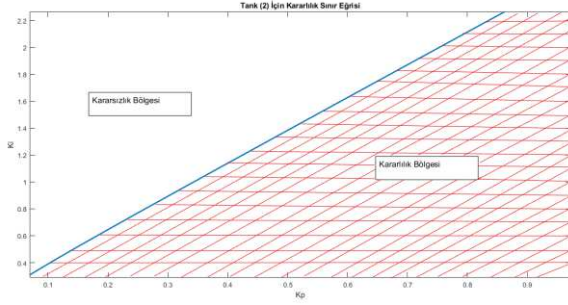
$$K_i \cong \frac{\omega^7 106,0938 - \omega^5 39,38266 - \omega^3 118,49903}{\omega^5 1918,44 - \omega^3 389,8311 + \omega 646,6849} \quad (15)$$



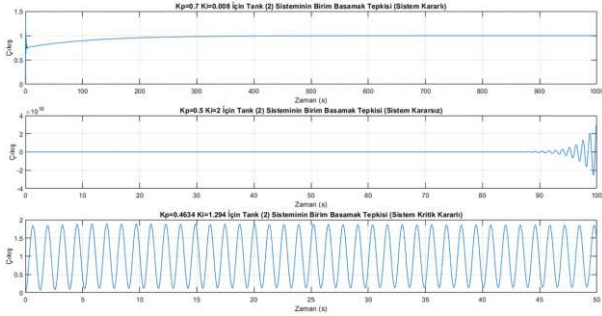
Şekil 8: Tank (1) için kararlılık sınır eğrisi



Şekil 9: Farklı  $K_p$  ve  $K_i$  değerlerine göre Tank (1)'in birim basamak tepkileri



Şekil 10: Tank (2) için Kararlılık sınırı eğrisi

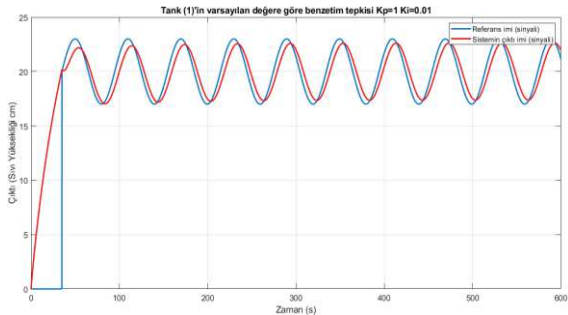


Şekil 11: Farklı  $K_p$  ve  $K_i$  değerlerine göre Tank (2)'nin birim basamak tepkileri

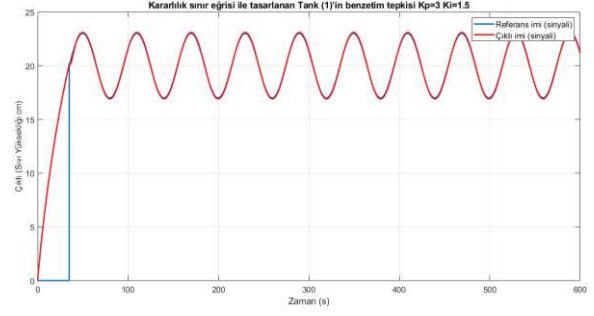
#### 4. Sonuçlar

Bu bildiri çalışmasında, kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak, birleştirilmiş sıvı tank sistemi için bir PI denetleyici tasarlanmıştır. Çalışma tek girdili tek çıktılı (Single input single output-SISO) olarak Tank (1) ve Tank (2) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tank (1) için belirlenen kararlılık sınır eğrisi grafiğinden,  $K_p$  ve  $K_i$  parametreleri sırasıyla 3 ve 1.5 olarak, Tank (2) için bu değerler  $K_p=0.7$ ,  $K_i=0.008$  olarak belirlenmiştir. Tank (1) için sistemin varsayılan parametre değeri  $K_p=1$ ,  $K_i=0.01$  ve Tank (2) için varsayılan değerler  $K_p=0.45$ ,  $K_i=0.0038$  olarak verilmiştir. Bu değerlerle karşılaştırmalı grafikleri, Şekil (12) ve Şekil (19) arasında gösterilmiştir.

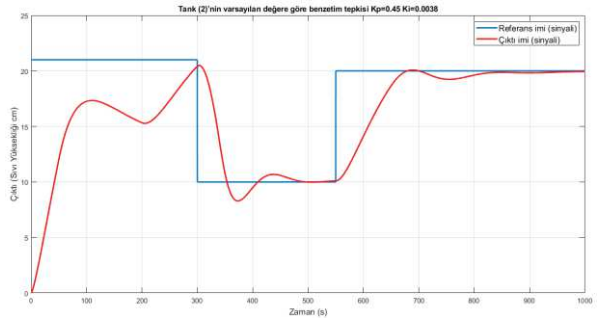
Sonuç olarak Tank (1) için belirlenen parametre değerlerine göre referans sinyalinin izlenmesi sistemin varsayılan parametre değerlerine kıyasla çok daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenirken, Tank (2) için varsayılan parametre değerlerine göre referans sinyalinin izlenmesi parametre değerlerine göre benzer bir başarımla sergilenmiştir.



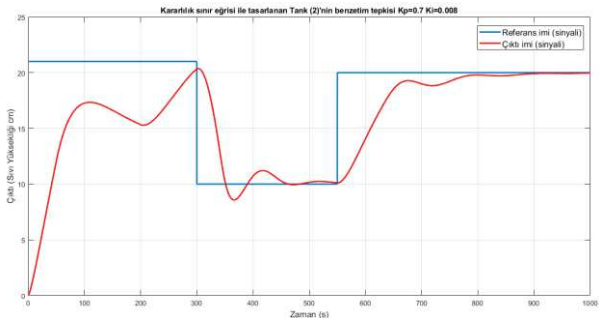
Şekil 12:  $K_p=1$   $K_i=0.01$  Tank (1)'in varsayılan değere göre benzetim tepkisi. Mavi: Referans imi (sinyali)/ Kırmızı: Sistemin çıktı imi (sinyali)



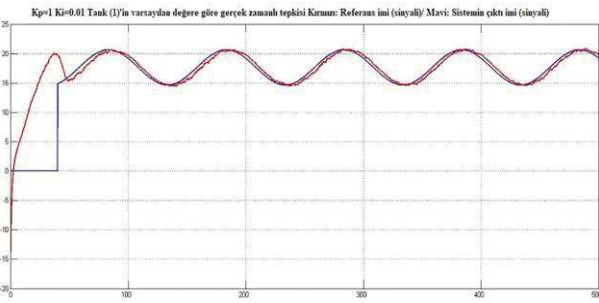
Şekil 13:  $K_p=3$   $K_i=1.5$  Kararlılık sınır eğrisi ile tasarlanan Tank (1)'in benzetim tepkisi. Mavi: Referans imi (sinyali)/ Kırmızı: Sistemin çıktı imi (sinyali)



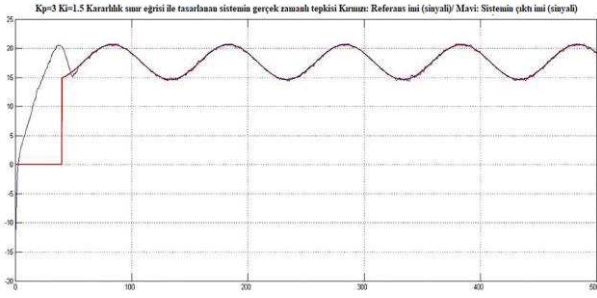
Şekil 14:  $K_p=0.45$   $K_i=0.0038$  Tank (2)'nin varsayılan değere göre benzetim tepkisi. Mavi: Referans imi (sinyali)/ Kırmızı: Sistemin çıktı imi (sinyali)



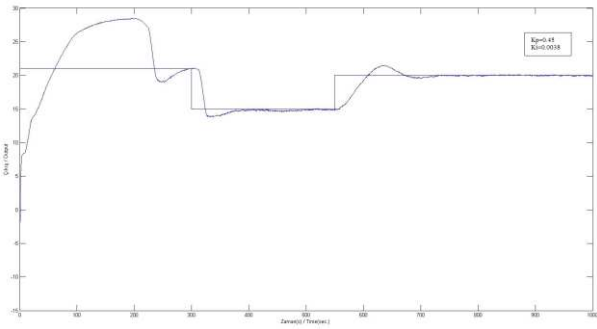
Şekil 15:  $K_p=0.7$   $K_i=0.008$  Kararlılık sınır eğrisi ile tasarlanan Tank (2)'nin benzetim tepkisi. Mavi: Referans imi (sinyali)/ Kırmızı: Sistemin çıktı imi (sinyali)



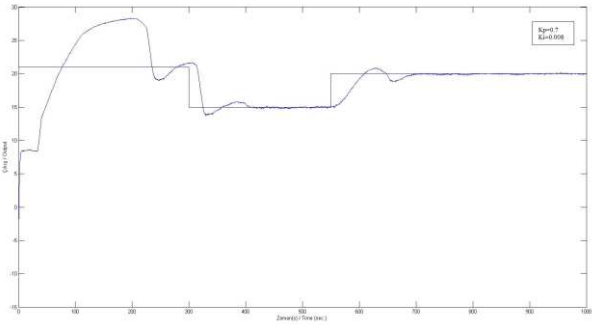
Şekil 16:  $K_p=1$   $K_i=0.01$  Tank (1)'in varsayılan değere göre gerçek zamanlı tepkisi. Kırmızı: Referans imi (sinyali)/ Mavi: Sistemin çıktı imi (sinyali)



Şekil 17:  $K_p=3$   $K_i=1.5$  Kararlılık sınır eğrisi ile tasarlanan sistemin gerçek zamanlı tepkisi Kırmızı: Referans imi (sinyali)/ Mavi: Sistemin çıktı imi (sinyali)



Şekil 18:  $K_p=0.45$   $K_i=0.0038$  Tank (2)'in varsayılan değere göre gerçek zamanlı tepkisi Siyah: Referans imi (sinyali)/ Mavi: Sistemin çıktı imi (sinyali)



Şekil 19:  $K_p=0.7$   $K_i=0.008$  Kararlılık sınır eğrisi ile tasarlanan sistemin gerçek zamanlı tepkisi Siyah: Referans imi (sinyali)/ Mavi: Sistemin çıktı imi (sinyali)

## Kaynakça

- [1] P. Roy, B. Kar, A. Kumar, ve B. K. Roy, "Level control of two tank system by fractional order integral state feedback controller tuned by PSO with experimental validation", içinde *2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, Kolkata, India, Oca. 2016, ss. 224-228. doi: 10.1109/CMI.2016.7413744.
- [2] P. Roy ve B. Krishna Roy, "Fractional order PI control applied to level control in coupled two tank MIMO system with experimental validation", *Control Engineering Practice*, c. 48, ss. 119-135, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.conengprac.2016.01.002.
- [3] M. K. Khan ve S. K. Spurgeon, "Robust MIMO water level control in interconnected twin-tanks using second order sliding mode control", *Control Engineering Practice*, c. 14, sy 4, ss. 375-386, Nis. 2006, doi: 10.1016/j.conengprac.2005.02.001.
- [4] N. B. Almutairi ve M. Zribi, "Sliding mode control of coupled tanks", *Mechatronics*, c. 16, sy 7, ss. 427-441, Eyl. 2006, doi: 10.1016/j.mechatronics.2006.03.001.
- [5] H. G. Om Prakash Verma, "Intelligent Controller for Coupled Tank System", *IJARCSSE*.
- [6] I. O. Aksu ve R. Coban, "Sliding mode PI control with backstepping approach for MIMO nonlinear cross-coupled tank systems", *Int J Robust Nonlinear Control*, c. 29, sy 6, ss. 1854-1871, Nis. 2019, doi: 10.1002/rnc.4469.
- [7] M. S. Ramli, R. M. T. R. Ismail, M. A. Ahmad, S. M. Nawi, ve M. A. M. Hussin, "Improved Coupled Tank Liquid Levels System Based on Swarm Adaptive Tuning of Hybrid Proportional-Integral Neural Network Controller", *American J. of Engineering and Applied Sciences*, c. 2, sy 4, ss. 669-675, Nis. 2009, doi: 10.3844/ajeassp.2009.669.675.
- [8] M. Baghel, S. Agrawal, ve S. Silakari, "Survey of Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization", *IJCA*, c. 58, sy 19, ss. 21-31, Kas. 2012, doi: 10.5120/9391-3813.
- [9] N. Tan ve D. P. Atherton, "Design of stabilizing PI and PID controllers", *International Journal of Systems Science*, c. 37, sy 8, ss. 543-554, Haz. 2006, doi: 10.1080/00207720600783785.
- [10] Feedback Instruments Ltd, *Coupled Tanks Control Experiments Manual*, c. Manual: 33-041S Ed02 072013. Feedback Instruments Ltd., Park Road, Crowborough, East Sussex, TN6 2QR, UK: Feedback Instruments Ltd.
- [11] H. Pan, H. Wong, V. Kapila, ve M. S. de Queiroz, "Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system", *Control Engineering Practice*, c. 13, sy 1, ss. 27-40, Oca. 2005, doi: 10.1016/j.conengprac.2003.12.019.

## Teşekkür

Bu çalışma TÜBA (Türkiye Bilimler Akademisi) tarafından desteklenmiştir.