



Zaman Gecikmeli Sıvı Seviye Sistemi için Kaskad Oransal-İntegral Denetleyicilerin Deneysel Uygulaması

Experimental Application of Cascade Proportional-Integral Controllers for Time Delayed Liquid Level System

Ahmet DURLU^{1*} , Emre TUŞİK¹  Sadrettin GÖLCÜGEZLİ¹ 

¹Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi EEM Bölümü, 25100 Yakutiye/ERZURUM, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 27/09/2022

Kabul / Accepted: 10/04/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/05/2023

Son Versiyon/Final Version: xx/xx/xxxx

Öz

Bu çalışmada zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin kaskad kontrolün performansını artırmak için standart formlara dayalı yeni bir kaskad kontrol yapısı ve kontrolör tasarımı önerilmektedir. Kaskad kontrolör yapısına ayrıca zaman gecikmesi eklenerek kaskad oransal integral gecikmeli kontrolör (Cascade Proportional Integral Retarded (CPIR)) şeklinde adlandırılabilir sıvı seviye sistemi için yeni bir kontrol tasarımı yapılmıştır. İlk olarak gecikme tabanlı sistemlerin genel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve üzerinde deneysel çalışmalar yapıldığı zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin dinamik davranışı detaylı bir şekilde sunulmuştur. Daha sonra kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli ve analizi gerçekleştirilmiştir. Kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün gerçek zamanlı sıvı seviye tankı üzerine yapılan deneylerle de kontrolcü tasarımının doğruluğu pekiştirilmiştir. Böylelikle önerilen kontrol tasarımı yönteminin kullanımını ve bazı mevcut tasarım yöntemlerine göre üstünlüğü ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bu çalışma ile kaskad oransal integral gecikmeli kontrolcü tasarımı performansı diğer klasik yöntemlere göre avantajlı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Kaskad kontrol, Zaman Gecikmeli Sistemler, Zaman Gecikmeli Kontrol, CPIR Kontrol, CNPIR Kontrol

Abstract

In this study, a new cascade control structure and controller design based on standard forms is proposed to improve the performance of cascade control. By adding a time delay to the cascade controller structure, a new control design, which can be called a cascade proportional integral delay controller, has been made for liquid level systems. Firstly, the general properties of delay based systems are given and the dynamic behavior of the delayed liquid level system is presented in detail when experimental studies are carried out on it. Then, the mathematical model and analysis of the cascade proportional integral delay controller is carried out. The accuracy of the controller design has been reinforced by the experiments on the real-time liquid level tank of the cascade proportional integral delay controller. Thus, the use of the proposed control design method and its superiority over some existing design methods have been revealed. In addition, with this study, it has been revealed that the performance of cascade proportional integral delay controller design is advantageous compared to other classical methods.

Key Words

Cascade Control, Time Delayed Systems, Time Delayed Control, CPIR Control, CNPIR Control

1. Giriş

Otomatik kontrol kuramında ölü zaman olarak da adlandırılan zaman gecikmesi; bir kontrol sistemine herhangi bir referans işareti verildiğinde bu işaretin etkilerinin, kontrol sisteminin çıkışında belirli bir süre farkla gözlemlenmesidir. Bu durum gerçek zamanlı birçok kontrol sistemi için beklenen ve kaçınılmaz somut bir olgudur. Bir kontrol sisteminde zaman gecikmesi sistemde kullanılan sensörlerden, sistemin kendi iç doğasından veya tasarlanan denetleyicinin karmaşık bir yapıya sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Bir kontrol mekanizmasında zaman gecikmesinin sistem üzerinde inkâr edilemez yani yok sayılamaz etkilere sahiptir. Bu etkilere iki farklı metodoloji ile yaklaşmak mümkündür; bu yaklaşımlardan ilki, zaman gecikmesinin kontrol mekanizmaları ve kontrol denetleyicisi üzerinde olumlu veya olumsuz farklı ne gibi tesirlerinin etki edebileceğine dair bazı sözlü çıkarımlar yapabilmektir. En önemli diğer bir bakış açısı ise, bir sistemde zaman gecikmesinin bulunması durumunda, kontrol mekanizmaları üzerindeki tesirlerinin matematiksel olarak gözlemlenmesi veya incelenmesidir. Bundan dolayı kontrol sistemleri üzerinde zaman gecikmesinin etkisini matematiksel olarak açıklayabilmek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Literatür araştırmalarında zaman gecikmesinin matematiksel analizinin ve matematiksel etkisi hakkında birçok farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarına göre, zaman gecikmesi bir kontrol sistemi algoritmasında bulunduğu takdirde; kapalı çevrimli kontrol sisteminin karakteristik denklemi bir polinom olarak değil de polinomsu (quasipolynomial) olarak ifade edilir. Polinomlar sonlu sayıda köke sahip iken, polinomsular sonsuz sayıda köke sahiptirler. Bu özellik iki karakteristik yapıyı ayıran en önemli özelliklerden biridir. Açıklanan bu sistem çeşidinde de sistemin davranışı, kapalı döngülü kutupların yerleriyle önemli ölçüde ilişkili olduğundan, sistemde zaman gecikmesinin oluşu, sistemin davranışını analiz etmeyi zorlaştırdığı ve sistemin tasarlanmasını güçleştirmiştir.

Literatürde zaman gecikmeli kontrol sistemlerinin kararlılığı tespit etmeyi sağlayan yöntemler arasında en yaygın olanları sırasıyla Hermite-Biehler teoremi, Nyquist teoremi ve Walton-Marshall Direct metodudur. Kararlılığı saptamaya yarayan bu yöntemler arasında Hermite-Biehler Teoreminin polinomsular için genelleştirilmiş versiyonudur (Roy&Iqbal, 2005). Temelinde Nyquist Teoremi bulunan literatürde birçok çalışma vardır (Munro, 2001; Dan&Dale, 2002). Söz konusu Walton-Marshall Direct metodunun temelinde zaman gecikmesi bulunan kontrol sistemlerinin kararlılığını belirlemesi için iyi ve güçlü bir yöntem olduğu birçok çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu yöntem Hermite-Biehler teoremi ve Nyquist teoremine kıyasla daha kullanışlı ve daha hızlıdır. Bununla birlikte bu metod sayesinde kararsız olan bir kontrol sisteminin sağ yarı s düzlemindeki kutup sayısının zaman gecikmesinin varlığıyla nasıl etki gösterdiği ve nasıl değişebileceği hakkında da önemli bilgiler elde edilebilmektedir (Nesimioğlu, 2016).

Zaman gecikmeli kontrol tasarımları üzerinde literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada zaman gecikmelerinin dengeleyici özelliklerinden faydalanarak frekans şekillendirme üzerine çalışmışlardır (Tallman&Smith, 1958). Bir diğer çalışmada ise zaman geciktirme etkisini kullanan yeni bir kontrolör tipi önerilmiştir (Suh&Bien, 1979). Bu kontrolcü yapısı uygun bir zaman gecikmesi ile donatılmış geleneksel P kontrolörünün ortalama bir türev eylemi gerçekleştirdiği ve dolayısıyla PD kontrolörünün yerini alabileceği, giriş değişikliklerine hızlı tepkiler gösterdiği, ancak yüksek frekanslı gürültüye karşı duyarlı olduğunu belirtmiştir. Salınım sistemlerinin stabilizasyonu için zaman gecikmesi kullanılan çalışmada pozitif, gecikmeli geri besleme ile salınım sistemini stabilize etmişlerdir (Abdallah vd., 1993). Elde ettikleri kapalı döngü sisteminin (Nyquist kriteri kullanılarak) bir dizi gecikme için kararlı olduğunu göstermişlerdir. Literatürde zaman gecikmeli sistemler üzerinde yapılan bir çalışmada ise Niculescu, S. I., zaman gecikmesinin entegratör zincirleri de dahil olmak üzere lineer sistemlerin stabilizasyonu sağlamıştır (Niculescu&Michiels, 2004). Galip Ulusoy, yapmış olduğu çalışmasında, tek girişli tek çıkışlı doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için zaman gecikmeli kontrol yapısı önermiştir (Galip, 2015). Bu kontrol yapısı kararlılık marjlarını iyileştiren ve duyarlılığı azaltmıştır. Başka bir çalışmada kaskad kontrol ağının bilhassa tahmin edilemeyen bozucuların varlığında kontrol mekanizmasının performansını artırdığı kanıtlanmıştır (Nalbantoğlu&Güler, 2017). Söz konusu çalışmada SSSC olarak adlandırılan Statik Senkron Seri Kompansatör içeren sonsuz baraya bağlı tek makineli güç sisteminde kaskad denetleyici algoritması kullanılarak kontrol sisteminin kararlılığı iyileştirilmesi sağlanmışlar. Standart kontrol yöntemlerine göre kaskad kontrol yönteminin performansının daha iyi olduğunu ispatlanmıştır.

Zaman gecikmeli sistemlerden biri olan ikili tank sistemlerinin kontrolü için literatürde farklı çalışmalara rastlanmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalardan ilki özellikle bozucu etkilere karşı duyarlı olan uyarlanabilir tabanlı kontrol tekniğidir (Xu vd., 2020). Kontrolcü parametrelerinin uyarlanabilir özelliği sayesinde bu çalışmada belirlenemeyen sistem parametrelerine ve bozucu etkilere karşın iyi bir kontrol performansı elde edilebilmiştir. Bir diğer kontrol yöntemi ise kesir dereceli denetleyici tasarımıdır (Sundaravadivu vd., 2011). Yapılan bu sıvı seviye kontrol çalışmasında klasik PI kontrolcüsü yerine kesirli dereceden PI kontrolcü kullanılarak sistem performansı artırılmıştır. Literatürde yapılan diğer bir çalışmada ise geri adımlamalı denetleyici olup geliştirilen gözlemci etkisi ile sistemde meydana gelebilecek bozucu etkilerin önüne geçilebilmiştir (Gouta vd., 2015). Ayrıca söz konusu sisteme bulanık mantık tabanlı PI kontrolü (Liang, 2011), genetik algoritma tabanlı ayarlanabilir yapı sinir ağı kontrolü (Lian vd., 1998) gibi kontrol teknikleri uygulanarak sistem performansı test edilmiştir.

Bu çalışmada ise zaman gecikmeli ikili tank sisteminin gerçek zamanlı kontrolü için kaskad oransal integral gecikmeli kontrolör şeklinde adlandırılabilir bir kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcü ilk defa Lo'pez tarafından tasarlanmış olup DC servo motorun pozisyon kontrolünde denenmiştir (Lo'pez vd., 2018). Önerilen denetleyici kademeli olarak bir iç döngü ve bir dış döngü yapısına sahiptir. Söz konusu iç döngü, geciktirilmiş bir algoritma yapısına sahip olup kontrol edilen DC servo motorun açısal hızını düzenleyebilirken, dış döngü ise oransal bir kontrolcü sayesinde söz konusu sistemin açısal konumunu ayarlayabilmektedir. İlave filtreler kullanılmadan DC servo motorun açısal hız ölçümlerini yapabilen bu kontrolcü sayesinde pozisyon değişimlerinde meydana

gelebilecek aşımalar azaltılabilmüş ve bozucu etkiye sahip farklı yükler altında iyi bir pozisyon kontrolü gerçekleştirilebilmiştir. Söz konusu kontrolcünün gürültülere karşı daha duyarlı olması ve özellikle referans değişimlerinde çok az bir aşım yaptırması nedeniyle bu çalışmada ilk defa zaman gecikmeli ikili tank sistemin gerçek zamanlı kontrolünde kaskad oransal integral gecikmeli kontrolcü denenmiştir. İki tank sisteminin yapısı gereği zaman gecikmeli olması ve özellikle bozucu etkilerden oldukça fazla etkilenmesi nedeniyle bu kontrolcünün performansı sistem üzerinde test edilmiş ve klasik PI kontrolcüsünde göre oldukça iyi bir performans sergilemiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde endüstri tesislerinde sıklıkla kullanılan zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin çalışma prensibi ve matematiksel modeli detaylı bir şekilde sunulmuştur. Daha sonra kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli ve analizi gerçekleştirilmiştir. Kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün gerçek zamanlı sıvı seviye tankı üzerine yapılan deneylerde kontrolcü tasarımın doğruluğu pekiştirilmiştir. Özellikle ileri beslemeli PI (FF-PID) kontrolcüye göre üstünlüğü grafiksel olarak sunulmuştur. Sisteme verilen harici gürültüler karşısında önerilen kontrolcü daha iyi bir performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

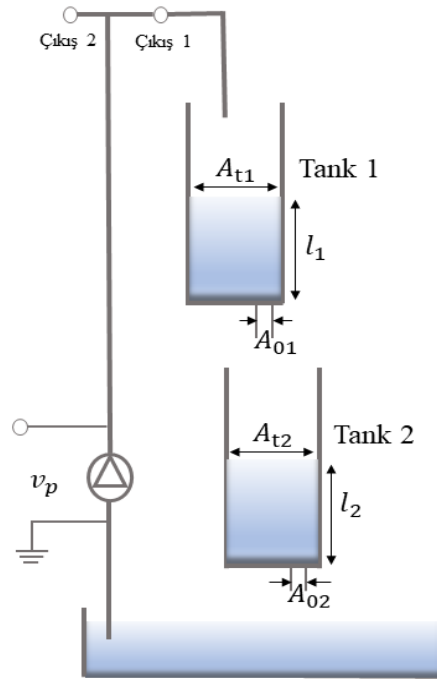
2. Materyal ve Yöntemler

Endüstri tesislerindeki akışkan seviye tank prosesinin tipik bir uygulaması olan sıvı seviye sistemi Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu sisteme ait tasarım parametreleri ise Tablo 1’de sunulmuştur. Sıvı seviye kontrol sisteminde amaç, akışkanın sistemden talep edilen seviyede sabit tutulmasıdır. İkili-Tank sisteminden L_1 ve L_2 olmak üzere iki adet akışkan seviyesi mevcut olmasından dolayı iki ayrı denetleyiciye ihtiyaç duyulmuştur. Tank 1’in kontrolü, pompa vasıtasıyla Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması, Tank 2’nin kontrolü ise Tank 1 tarafından Tank 2’nin içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması ile sağlanmıştır. Sistemlerin kontrol aşamalarından biri transfer fonksiyonun belirlenmesidir. İkili tank sistemi için Tank 1’in kontrolünde giriş pompa gerilimi, çıkış ise tutulması gereken akışkan seviyesi olacak şekilde alınmıştır. Bu makalede Tank 1’in transfer fonksiyonu giriş gerilimi ile akışkan seviyesinin oranıyla belirlenmiş olup ilk olarak seviye tank sisteminin modeli ortaya konulacak ve ardından kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli tanımlanacaktır.

Tablo 1. Sıvı Seviye Sistemine Ait Tasarım Parametreleri

Sembol	Parametre Açıklaması	Değerler
K_p	Pompa Akış Sabiti	$3.3 \text{ cm}^3/\text{s/V}$
A_{01}	Tank 1 Çıkışının Kesit Alanı	0.1781 cm^2
A_{02}	Tank 2 Çıkışının Kesit Alanı	0.1781 cm^2
A_{t1}	Tank 1’in Kesit Alanı	15.5179 cm^2
A_{01}	Tank 1 Çıkışının Kesit Alanı	15.5179 cm^2

2.1. Sıvı Seviye Tank Sisteminin Doğrusal Olmayan Hareket Denklemi



Şekil 1. Tank-1 deneyi için bağlantı şeması

Sıvı seviye tank sisteminin matematiksel modelini Tank 1 kontrolçüsü için türetebilmek için pompanın Tank 1'i beslediği ve Tank 2'nin hiç dikkate alınmadığı düşünülmüştür. Bu nedenle sistemin girişi V_p pompasının voltajıdır ve çıkışı ise Tank 1 yani L_1 'deki sıvı seviyesidir. Bu nedenle matematiksel eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = f(L_1, V_p) \quad (1)$$

Tank 1 için hareket denklemi eşitliği türetilirken, hareket dengesi ilkesi Tank 1'deki su seviyesine uygulanabilir.

$$A_{t1} \frac{\partial L_1}{\partial t} = F_{i1} - F_{o1} \quad (2)$$

Burada A_{t1} Tank 1'in içi kesit alanıdır. F_{i1} ve F_{o1} sırasıyla içeri akış hızı ve dışarı akış hızıdır. Tank 1'e uygulanan akış hızının uygulan pompa voltajıyla doğru orantılı olduğu varsayılır;

$$F_{i1} = K_p V_p \quad (3)$$

Küçük delikler için Bernoulli denklemini uygulayarak, Tank 1'den dışarı akış hızı, V_{o1} , aşağıdaki ilişki ile ifade edilebilir:

$$V_{o1} = \sqrt{2gL_1} \quad (4)$$

Tank 1 sistemi için bir lineer seviye kontrolörü tasarlamak ve uygulamak için açık döngü Laplace transfer fonksiyonu türetilmelidir. Ancak tanım gereği, böyle bir transfer fonksiyonu sadece sistemin dinamiklerini bir lineer diferansiyel denklemden temsil edebilir. Bu nedenle, Tank 1'in doğrusal olmayan hareket denklemi, hareketsiz bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmalıdır. Tanım olarak, nominal bir çalışma noktasındaki (V_{p0}, L_{10}) statik denge, sabit pompa voltajı V_{p0} tarafından oluşturulan sabit bir su akışı nedeniyle Tank 1 seviyesinin sabit bir L_{10} konumunda olması ile karakterize edilir. Tank 1'deki su seviyesi durumunda, çalışma aralığı, istenen denge noktasından (V_{p0}, L_{10}) küçük çıkış yüksekliklerine, L_{11} ve küçük çıkış voltajlarına, V_{p1} 'e karşılık gelir. Bu nedenle, L_1 ve V_p , aşağıda gösterildiği gibi iki miktarın toplamı olarak ifade edilebilir:

$$L_1 = L_{10} + L_{11} \quad (5)$$

$$V_p = V_{p0} + V_{p1} \quad (6)$$

Elde edilen doğrusallaştırılmış hareket denklemi, sistemin denge noktası (V_{p0}, L_{10}) ile ilgili küçük sapmalarının bir fonksiyonu olmalıdır. Bu nedenle, ortaya çıkan doğrusal hareket denklemi aşağıdaki formatta ifade edilmelidir:

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = f(L_1, V_p) \quad (7)$$

İki değişkene sahip olan herhangi bir fonksiyonun doğrusallaştırılmasında Taylor serisi yaklaşımından yararlanılmaktadır. Burada tanımlanan f fonksiyonu L_1 ve V_p ile tanımlanmış iki değişkene sahiptir. $(L_1, V_p) = (L_{10}, V_{p0})$ noktasındaki küçük değişimler için birinci dereceden Taylor serisi yaklaşımıyla Denklem 8 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial^2}{\partial L_1 \partial V_p} f(L_1, V_p) \cong f(L_{10}, V_{p0}) + \left(\frac{\partial}{\partial L_1} f(L_{10}, V_{p0}) \right) (L_1 - L_{10}) + \left(\frac{\partial}{\partial V_p} f(L_{10}, V_{p0}) \right) (V_p - V_{p0}) \quad (8)$$

Taylor serisi yaklaşımı ile elde edilen doğrusal hareket denkleminde, sistemin Laplace alanındaki açık döngü transfer fonksiyonu aşağıdaki ilişki ile tanımlanabilir:

$$G_1(s) = \frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} \quad (9)$$

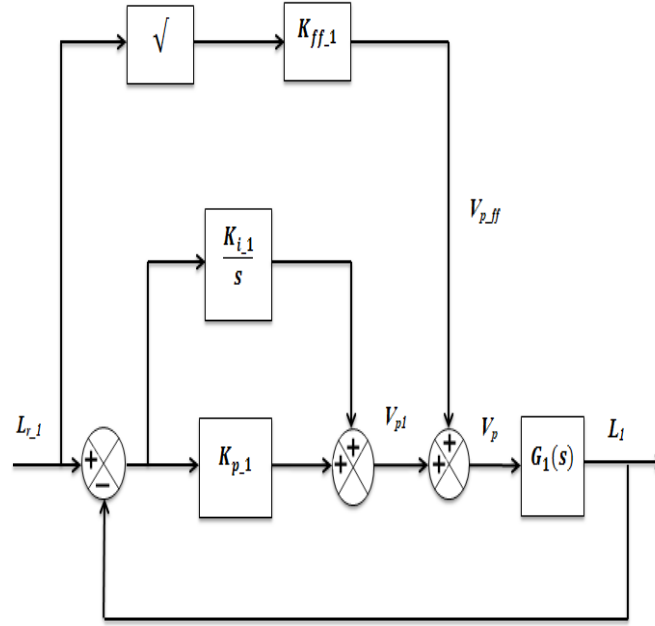
Sistem parametrelerine göre Tank 1 sistemi için istenen açık çevrim transfer fonksiyonu Denklem 10'daki gibi elde edilebilmektedir.

$$G_1(s) = \frac{K_{dc1}(s)}{\tau_1 s + 1} \quad (10)$$

Burada K_{dc1} açık döngü transfer fonksiyonu DC kazancıdır ve τ_1 zaman sabitidir.

2.2 İleri Beslemeli PI Kontrol Yöntemi

Bir kontrol pompa voltajı kullanılarak su seviyesinin veya yüksekliğini düzenlemek için farklı tipte kontrolcü tasarımları yapılabilmektedir. İlk olarak kontrol yapısı Şekil 2’de belirtilen ileri beslemeli oransal integral kontrolcüsüdür (PI-FF).



Şekil 2. Tank-1 deneyi için ileri beslemeli PI kontrol blok diyagramı

Sıfır kararlı durum hatası için, Tank 1 su seviyesi, şekilde gösterildiği gibi ileri besleme eyleminin eklenmesiyle pozitif oransal integral (PI) kapalı döngü şeması aracılığıyla kontrol edilir, voltaj ileri besleme kontrolcüsünün matematiksel eşitliği Denklem 11’ de sunulmuştur.

$$V_{pff} = K_{ff1} \sqrt{L_{r1}} \quad (11)$$

$$V_p = V_{p1} + V_{pff} \quad (12)$$

İleri besleme eylemi, Tank 1 alt çıkış deliği yoluyla su çekilmesini (yerçekimine bağlı olarak) telafi ederken, PI kontrolörü dinamik bozucu etkileri (dynamic disturbances) telafi eder. Şekil 2’ de belirtilen ileri beslemeli PI kontrolüne ait transfer fonksiyonu Denklem 13’ deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$G_1(s) = \frac{L_1(s)}{V_{p1}(s)} \quad (13)$$

Sıvı seviye Tank 1 deneyi ileri beslemeli PI kontrolör ile gerçekleştirildikten sonra sistem dinamiğinde göz önünde bulundurularak CNPIR kontrolör kullanılmıştır. Böylelikle yapılan gerçek zamanlı deneylerle her iki kontrol yapısı karşılaştırılmıştır.

2.3. CPIR Kontrol Yöntemi

Kapalı döngüye sahip CPIR kontrolörü Şekil 3’te gösterilmektedir. İntegral gecikmeli (Integral Retarded (IR)) kontrolörü, hız ölçümleriyle beslenen iç döngüye karşılık gelir. Ayarlanacak üç parametre, yani K_i ve K_{ir} kazançları ve h zaman gecikmesini içerir. Dış döngü ise K_p kazançlı oransal bir kontrolör aracılığıyla kapatılır ve konum ölçümleriyle beslenir. Zaman etkili CPIR kontrolörün matematiksel ifadesi Denklem 14 ile tanımlanmaktadır.

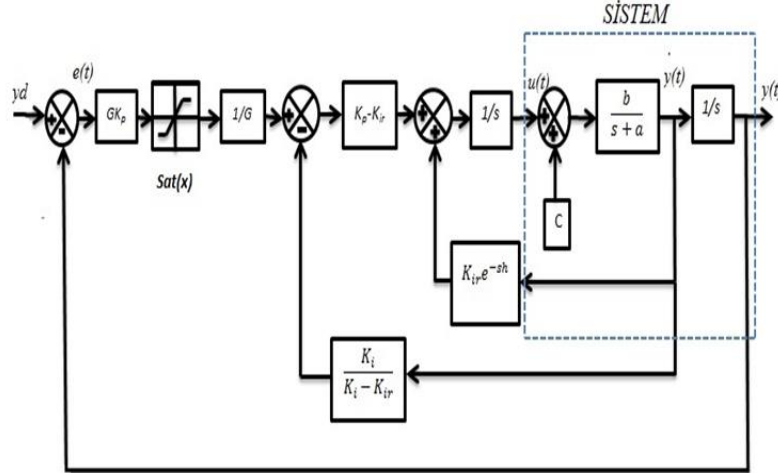
$$\dot{u}(t) = (K_i - K_{ir})K_p e(t) + K_{ir}\dot{y}(t - h) - K_i\dot{y}(t) \quad (14)$$

Burada $\dot{y}(t)$ çıkış parametresinin türevi bir başka değişle Tank 1 için sıvı seviyesini değişimini göstermektedir. Kapalı döngü sistemin karakteristik kuasipolinomu doğrudan Şekil 3 yardımıyla elde edilmiş ve Denklem 15’de sunulmuştur. Şekil 3’te görülen y_d referans girişi bir başka değişle Tank 1 için istenilen sıvı seviyesini, $y(t)$ ise çıkış büyüklüğünü yani Tank 1 için elde edilen sıvı seviyesini ifade etmektedir.

$$p(s) = s^3 + as^2 + bK_i s + bK_p(K_i + K_{ir}) - bK_{ir}se^{-sh} \quad (15)$$

Bununla birlikte iç hız döngüsü yarı polinomsu ifadesi ise Denklem 16 ile tanımlanabilmektedir.

$$v(s) = s^2 + as + bK_i \pm bK_{ir}se^{-sh} \quad (16)$$



Şekil 3. CPPIR kontrolcü blok diyagramı

Bu durumda CNPIR kontrol yasası en genel haliyle Denklem 17 ile tanımlanabilmektedir.

$$\dot{u}(t) = [(K_i - K_{ir})/G]SAT(GK_p e(t)) + K_{ir}\dot{y}(t - h) - K_i\dot{y}(t) \quad (17)$$

Şekil 3'te gösterilen ve Denklem 17'de belirtilen doygunluk fonksiyonu ise Denklem 18 ile ifade edilmektedir.

$$SAT(x) = \{x, |x| \leq 1 - 1, x < -1, x > 1 \quad (18)$$

Denklem 17'de verilen G küçültme faktörüdür. Konum hatası $e(t)$ yeterince küçükse $x = GK_p e(t)$ doygunluk sınırlarına ulaşamaz ve dış döngü ile iç döngü birlikte çalışır. Böylece G ve $1/G$ birbirini yok eder. Konumlandırma görevi büyük bir konum hatası oluşturduğunda $SAT(x) = 1$ ya da $SAT(x) = -1$ olmaktadır. Bu durumda dış döngü kesilir ve yalnızca iç hız döngü çalışır. Sistem sabit bir hıza ulaşır. Konum hatası daha sonra küçüldüğünde, doyma bloğu doğrusal bölgesinde çalışır ve iki döngü birlikte faaliyete geçer.

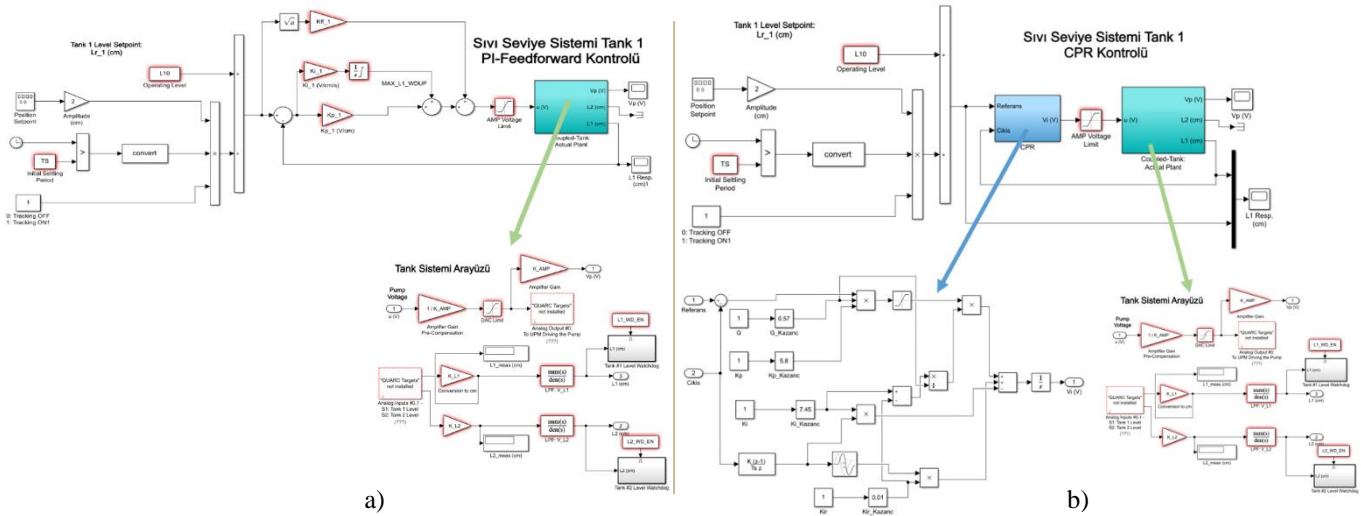
3. Bulgular

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi Şekil 4'te gösterilmiştir. Söz konusu sistem Quanser firması tarafından üretilmiş olup Matlab Simulink ile çalışabilmektedir. Sistem için gerekli olan veriler Quanser Q2 veri iletişim kartı kullanılarak alınmaktadır.

Sıvı seviye gerçek zamanlı konum kontrol deneyleri için FF-PI ve CPR kontrol denetleyicileri Şekil 5'te gösterilen Matlab-Simulink programından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te görülebileceği üzere öncelikle her iki kontrolcü tasarımı için referans konum değişimleri tanımlanmıştır. Bu referans konum değişimleri Tank 1'de bulunan sıvı seviyesiyle farkı alınarak öncelikle hata değişimleri elde edilmiştir. Bu hata değişimleri her iki kontrolcüye girdi olarak verilmiştir. Kontrolcülerin hata değişimlerine bağlı olarak tanımlanan matematiksel eşitliklere bağlı olarak sistem için pompa kontrol işaretleri tanımlanabilmektedir. Bu kontrolcü işaretleri doğrudan sisteme pompa vasıtasıyla uygulanarak sıvı seviye değişimleri incelenebilmiştir.



Şekil 1. Deneylerin gerçekleştirildiği Quanser sıvı seviye sistemi



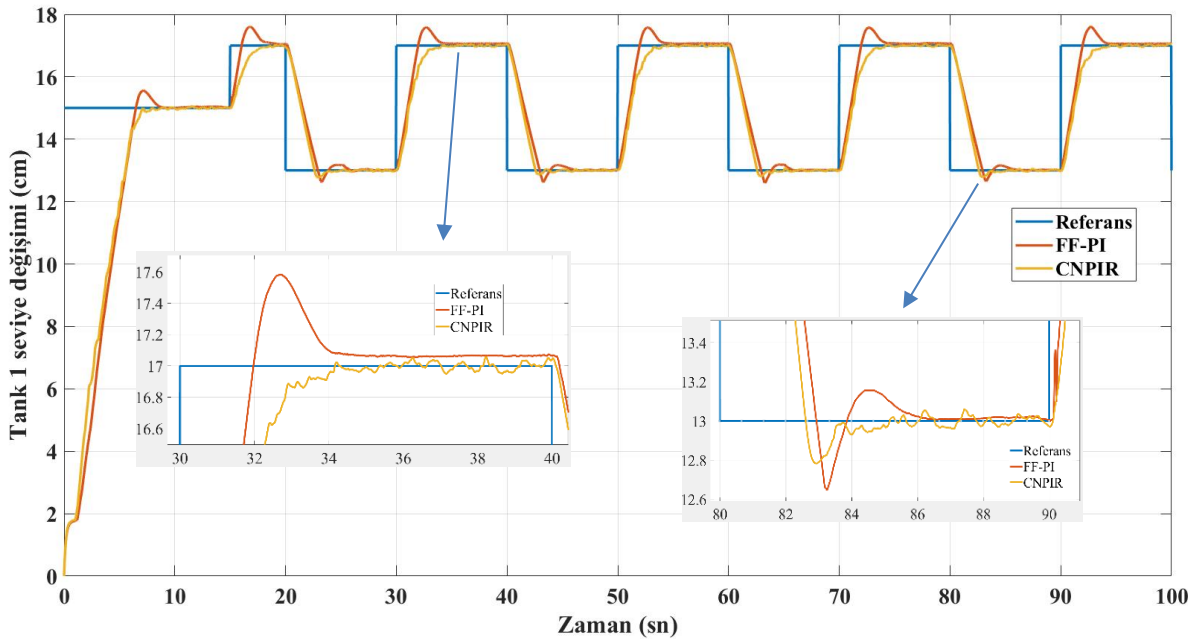
Şekil 2. a) FF-PI ve b) CPR kontrol yöntemlerinin test edilmesi için oluşturulan benzetim ortamı

Sistem dinamiği göz önünde bulundurularak her iki denetleyici için en iyi parametre değerleri sisteme verildiğinde CNPIR kontrol yönteminin FF PI denetleyicisi kontrol performansları Şekil 6’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Yapılan deneylerde denetleyicileri için belirlenen en iyi kontrolcü parametreleri Tablo 2’de sunulmuştur. Söz konusu en iyi duyarlılık sahip parametreleri elde edebilmek için öncelikle simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında deneme yanılma yöntemi kullanılarak uygun parametre aralıkları tanımlanmıştır. Gerçek zamanlı deneylerde bu parametrelere küçük değişimler tanımlanarak optimum kontrolcü kazanç değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2. En iyi sıvı seviye Tank 1 konum kontrol parametreleri

FF PI parametreleri					
	$K_{p1} = 7.2152$		$K_{i1} = 9.1061$		$K_{ff1} = 2.391$
CNPIR kontrol parametreleri					
Kare dalga	$G = 0.442$	$h = 0.002$	$K_p = 0.88$	$K_i = 26$	$K_{ir} = 0.01$
Sinüs dalga	$G = 0.57$	$h = 0.002$	$K_p = 5.8$	$K_i = 7.45$	$K_{ir} = 0.01$



Şekil 3. Tank-1 seviye değişimleri ve kontrolcü performansları

Önerilen CNPIR denetleyicisinin FF-PI kontrolüne göre etkinliğini göstermek için Denklem 19’ da formülü ifade edilen integral kare hatası (ISE) değerleri hesaplanmıştır. Bu makalede h gecikme parametresinin değişimine, bozucu etki verilmesine, bozucu etkinin uygulanma süresine göre sistemin kontrol edilebilme becerisi integral kare hatasına göre karşılaştırılmıştır.

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (19)$$

Tablo 3. Kontrol denetleyicisine göre ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	630	552.9

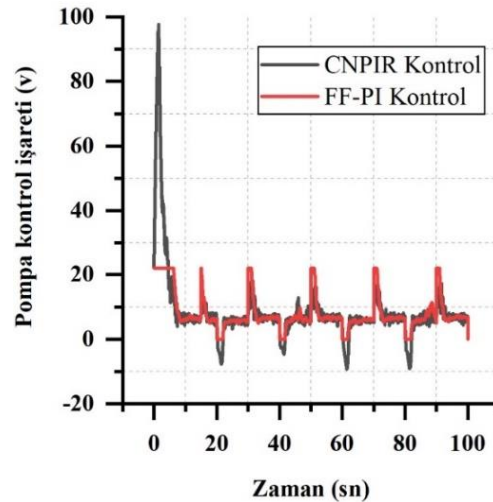
Sisteme bozucu etki verilmeden kontrol denetleyicilerine kıyasla Şekil 6’da elde edilen grafiğin ISE hata değerleri Tablo 3’te verilmiştir. Görüldüğü üzere önerilen CNPIR kontrol tekniğinde daha düşük bir ISE hata değeri elde edilmiştir.

CNPIR kontrol denetleyicisi ile tasarlanan sisteminin h gecikme parametresinin değişimine göre elde edilen ISE hata değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde ISE hata değeri, h gecikme parametresinin 200 mili saniye ve sonrasında daha fazla olduğu görülmektedir. Hata değerinin artması sistemin cevap zamanıyla ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. CNPIR h parametresi değişimine göre ISE hata

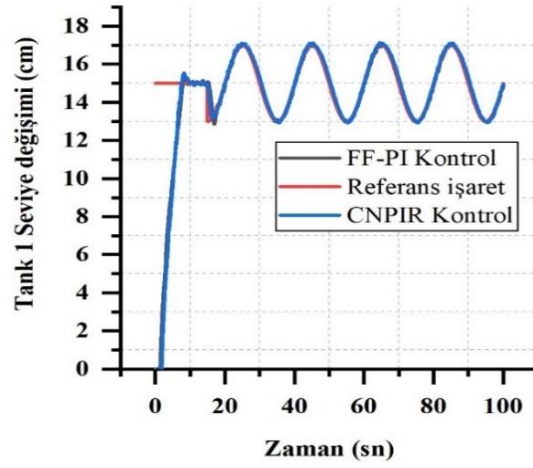
Denetleyici	h değeri	ISE
CNPIR	2 ms	552.9
CNPIR	10 ms	552.5
CNPIR	90 ms	552.7
CNPIR	100 ms	557.2
CNPIR	200 ms	577.4
CNPIR	300 ms	596.7
CNPIR	1 s	694.1

CNPIR kontrol yönteminin FF PI denetleyicisine göre daha iyi performans gösterebileceğini ispatlayabilmek amacıyla tasarlanan sıvı seviye konum kontrol deneyi ile karşılaştırılmış olup CNPIR denetleyicisinin aşım yapmadan referansı takip edebildiği ve kalıcı hal hata performansın FF PI denetleyicisine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. CNPIR denetleyicisi ile FF PI denetleyici işaretleri Şekil 7’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

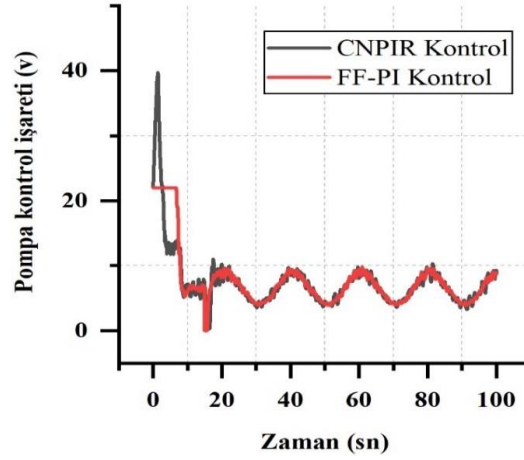


Şekil 7. Tank 1 seviye kontrol işaretleri

Tank 1 seviye kontrol deneyinde CNPIR denetleyicisinin FF PI denetleyicisine göre performansının daha iyi olduğunu pekiştirmek için sisteme sinüzoidal bir işaret verildiğinde elde edilen Tank 1 seviye değişimi ve kontrol performansları Şekil 8’deki gibi elde edilmiştir.



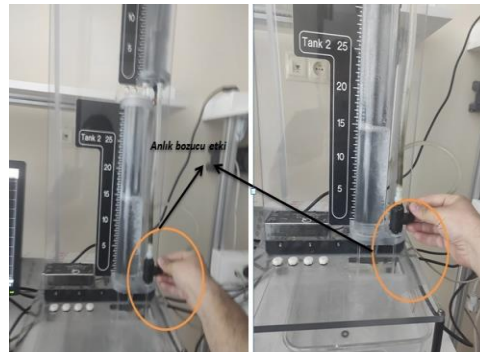
Şekil 8. Tank 1 seviye değişimleri ve kontrolcü performansları



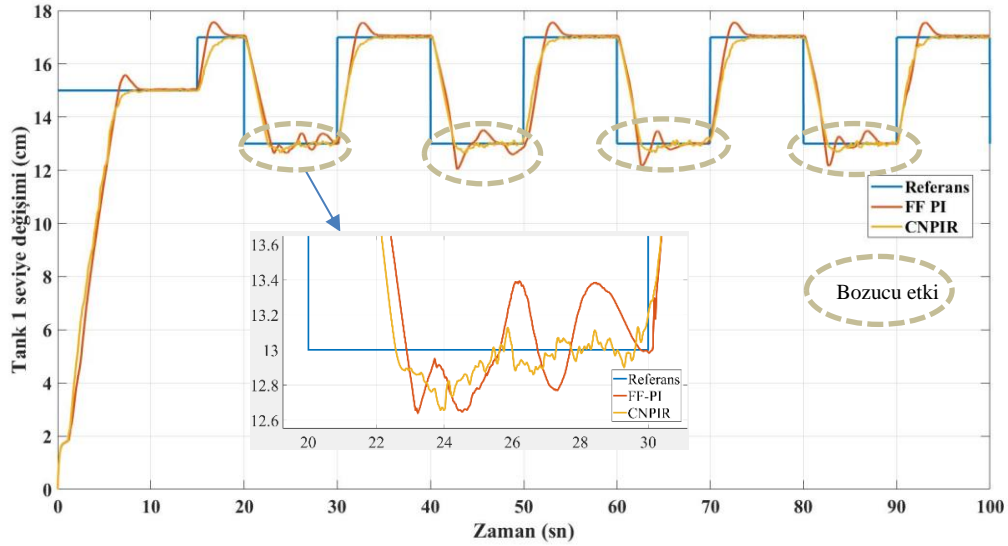
Şekil 9. Tank-1 seviye kontrol işaretleri

Kontrolcülerin performanslarına göre Tank 1 sıvı seviye sisteminde kontrolcü işaret değişimleri Şekil 9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

CNPIR denetleyicisi ve FF PI denetleyicinin anlık bozucu etkilere karşı performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 10'da gösterildiği gibi deney düzeneğinde farklı sürelerde ve aralıklarda anlık bozucu etki verilmiştir. Bozucu etki Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilen aralıklarda uygulanmıştır. Söz konusu bozucu etkilerin verilebilmesi için Şekil 10'da gösterildiği gibi Tank 1'in alt tabanında bulunan harici çıkış musluğu kullanılmıştır. Bu musluk Şekil 11'de gösterilen her bir aralıkta 10 saniye boyunca tam açık pozisyona getirilerek Tank 1'deki sıvı seviyesi aniden azaltılmıştır. Ani değişen bozucu etkinin genliği ve büyüklüğü doğrudan ölçülemediğinden bu durum sistem tarafından belirlenemeyen bir bozucu etki haline gelmiştir.



Şekil 10. Tank-1 sıvı seviye kontrolü anlık bozucu etki verilmesi

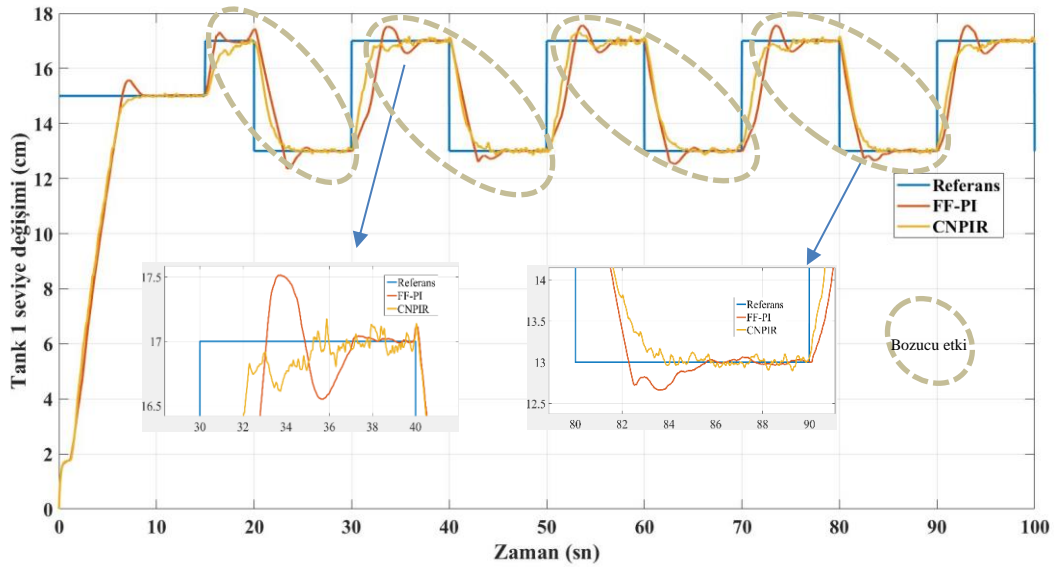


Şekil 4. Tank 1 bozucu etki seviye değişimleri ve kontrolcü performansları

Şekil 11'de gösterildiği gibi uygulanan bozucu etkiye Tank 1 kontrol sisteminin tepkisi, kontrol denetleyicilerinden elde edilen ISE hata değerine göre Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Bozucu etki durumunda ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	638.3	579.3

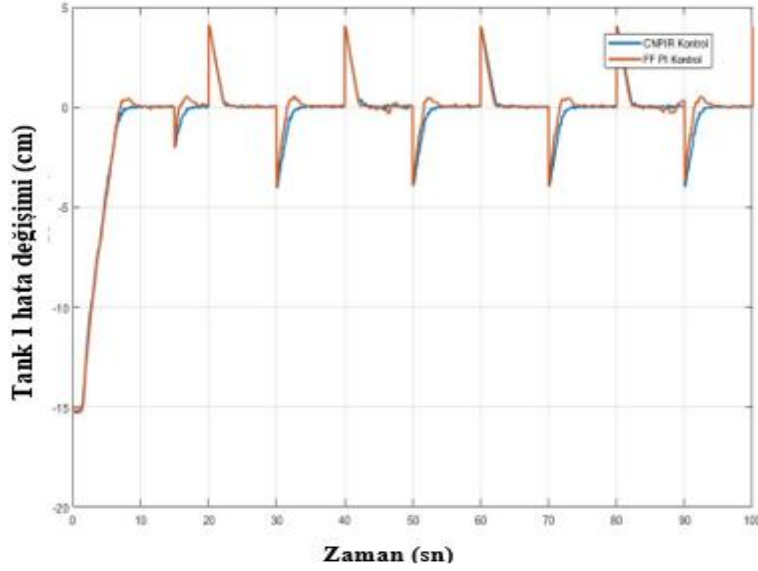


Şekil 5. Tank 1 bozucu etki artırılma neticesinde kontrol sisteminin tepkisi

Şekil 12'de gösterilen her bir aralıkta 18 saniye olacak şekilde bozucu etki uygulanmıştır. Uygulanan bozucu etkinin FF-PI ve CNPIR denetleyicilerine göre kontrol sistemine etkisi açısından ISE hata değeri karşılığı Tablo 6'da verilmiştir.

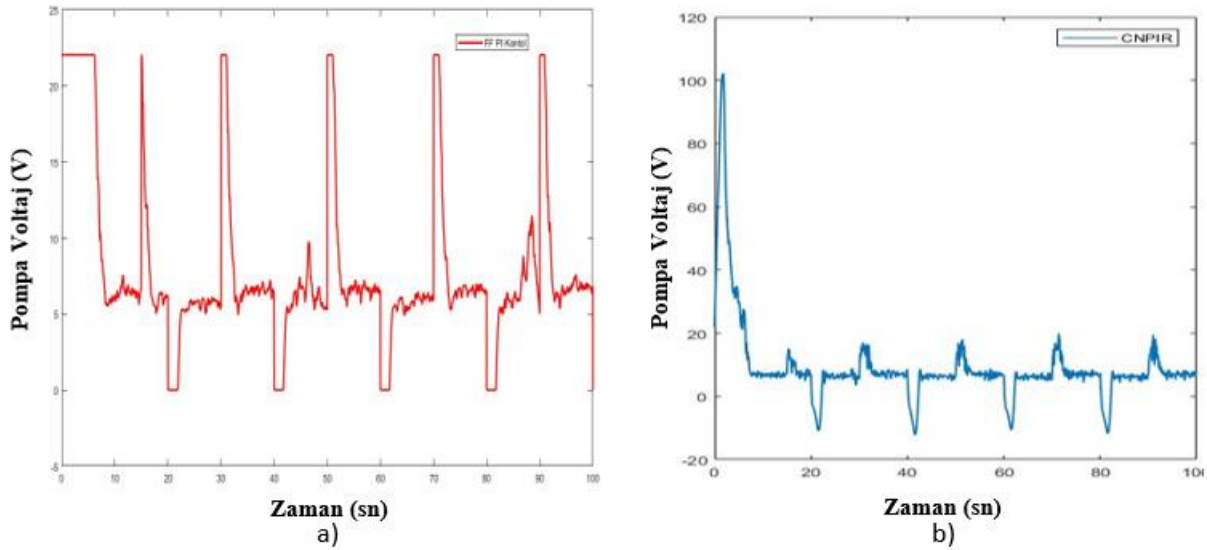
Tablo 6. Bozucu etki süresi ve aralığı artırılma durumunda ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	658.7	598.5



Şekil 6. Tank 1 seviye kontrolünde meydana gelen hata değişimleri

Farklı sürelerde ve aralıkta uygulanan bozucu etkiye karşı CNPIR denetleyicinin FF PI kontrol denetleyicisine göre daha iyi performans gösterdiği açıktır. Bozucu etkiye karşı CNPIR denetleyici daha az salınım yaptığı ve sisteme daha hızlı tepki verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca aşım yapmadan referans işaretini takip etmesi FF PI denetleyiciye göre iyi bir performans gösterdiğinin kanıtıdır. Şekil 11’de görülebileceği üzere her bir aralıkta 10 saniye süren bozucu etkide CNPIR kontrolcüsü hatayı ez aza indirgeyerek zaman geçirmeden sıvı seviyesini referans değere yaklaştırmak için kontrol işareti üretmiş ve sistemin referans değerinde kalması için zorlamıştır. Bozucu etkinin uygulanma süresi ve aralığı Şekil 12’de gösterilen artırılma durumunda CNPIR kontrol denetleyicisi bozucu etkiye FF-PI denetleyicisine kıyasla daha iyi tepki verebildiği sonucuna varılmıştır. Kontrolcülerin bozucu etkiye karşı seviye hata değişimleri ve sıvı seviye kontrolcü işaret değişimleri ise sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14’te gösterilmiştir. Elde edilen grafikler ve ISE hata değerleri incelendiğinde önerilen CNPIR kontrol tekniğinin FF-PI denetleyicisine göre sıvı seviye Tank 1 sistemini daha iyi kontrol edilebildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. a) FF PI Kontrol; b) CNPIR kontrol Tank-1 bozucu etki seviye kontrol işareti

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada sıvı seviye sisteminin dinamik analizleri yapılmış olup, sistemin konum kontrol performansını arttırmak amacıyla farklı kontrol metodlarından faydalanılmaya çalışılmıştır. Sıvı seviye sistemi için öncelikle FF PI denetleyicisi test edilmiş olup daha sonra kontrol sistemi için dinamik modellemesi tam anlamıyla göz önünde bulundurulmuş ve temelinde gecikme olan CNPIR kontrol tekniği kullanılmıştır. Yapılan gerçek zamanlı testlerin sonuçlarına göre, klasik PI kontrolcüsü uygulanabilirlik açısından basit olsa da kontrol başarımı açısından nispeten etkisiz kalmıştır. Ancak kontrol sistemine yönelik uygun bir dinamik modelin tespiti ve özellikle bu modelin CNPIR kontrol tekniğinin kullanılması halinde, bilhassa sistemin konum kontrol performansının güçlendirdiği

anlaşılmıştır. CNPIR denetleyicinin doğruluğunu ve performans açısından Klasik PI denetleyicisine göre üstün olduğunu pekiştirmek amacıyla dinamik modellide dikkate alınan sıvı seviye kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerle CNPIR denetleyicisinin doğruluğu ve üstünlüğü ispatlanmıştır.

Referanslar

- Abdallah, C., Dorato, P., Benites-Read, J., & Byrne, R. (1993, June). Delayed positive feedback can stabilize oscillatory systems. In 1993 American Control Conference (pp. 3106-3107). IEEE.
- Dan, C. and Dale E. S., (2002). Robust Nyquist array analysis based on uncertainty descriptions from system identification, *Automatica*, 38(3), 467-475.
- Galip Ulsoy, A. (2015). Time-delayed control of SISO systems for improved stability margins. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 137(4).
- Gouta, H., Said, S.H., Barhoumi, N. & Sahli, F.M. (2015). Observer-based back-stepping controller for a state-coupled two-tank system. *IETE Journal of Research*, 61(3), 259-268.
- Lian, S.T., Marzuki, K. & Rubiyah, Y. (1998) Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithms with an application to a coupled-tank liquid-level control system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11(4), 517-529.
- Liang, L. (2011). The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system. *Proc. of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 2894-2897.
- López, K., Garrido, R., & Mondié, S. (2018). Cascade proportional integral retarded control of servodrives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232(6) 662-671.
- N. Munro, "The systematic design of PID controllers using Nyquist stability," 2001 European Control Conference (ECC), 2001, pp. 528-533.
- Nalbantoğlu, M., & Güler, Y. (2017). SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 89-100.
- Nesimioğlu, B. S. (2016). Düşük Mertebeden Zaman Gecikmeli Sistemlerin Oransal Kontrolörler İle Kararlı Kılınması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Niculescu, S. I., & Michiels, W. (2004). Stabilizing a chain of integrators using multiple delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(5), 802-807.
- Roy, A. and Iqbal, K., (2005). PID controller tuning for the first-order-plus-dead-time process model via Hermite-Biehler theorem. *ISA Transactions*, 44(3), 363-378.
- Suh, I., & Bien, Z. (1979). Proportional minus delay controller. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(2), 370-372.
- Sundaravadivu, K., Jeyakumar, V. & Saravanan, K. (2011). Design of Fractional Order PI controller for liquid level control of spherical tank modeled as Fractional Order System. *Proc. of 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 522-525.
- Tallman, G. & Smith, J. (1958). Analog study of dead-beat posicast control. *IRE T Autom Control*, 4(1) 14-21.
- Xu, T., Yu, J., & Meng, X. (2020). Adaptive disturbance attenuation control of two tank liquid level system with uncertain parameters based on Port-Controlled Hamiltonian. *IEEE Access*, (8), 47384-47392.