



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması

LQR and GA based PID parameter optimization: liquid level control application

Yazarlar (Authors): Gökhan YÜKSEK¹, Ahmet Naci METE², Alkan ALKAYA³

ORCID¹: 0000-0002-6832-8622

ORCID²: 0000-0002-0406-8577

ORCID³: 0000-0002-8235-6726

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yüksek G., Mete A. N. ve Alkaya A., "PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1111-1119, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.603344

PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması

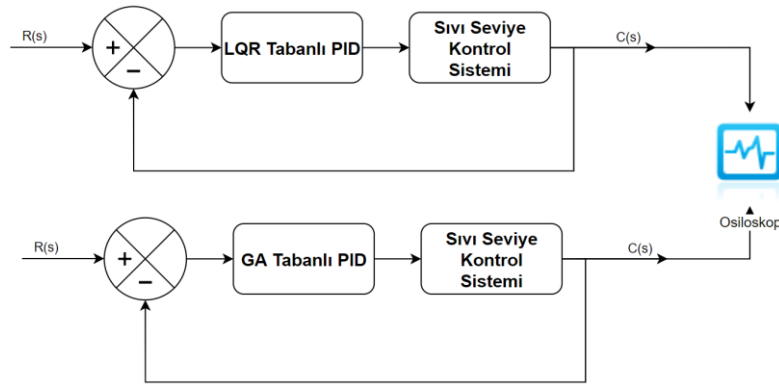
LQR and GA based PID Parameter Optimization: Liquid Level Control Application

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Doğrusal Karesel Düzenleyici / Linear Quadratic Regulator
- ❖ Genetik Algoritma / Genetic Algorithm.
- ❖ PID Ayarlama / PID Tuning

Grafik Özet (Graphical Abstract)

İki farklı yöntem kullanılarak tasarlanan PID denetleyicilerin deneysel olarak karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil. LQR Tabanlı PID vs GA Tabanlı PID / Figure.0 LQR Based PID vs GA Based PID

Amaç (Aim)

Bu çalışmada iki farklı metot kullanılarak PID parametre ayarlaması yapılmıştır. / In this study, PID parameter tuning was made by using two different methods.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İlk olarak Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı kullanılarak maliyet fonksiyonu minimize edilmiş ve optimal parametreler elde edilerek LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Ardından LQR maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. / Firstly, LQR based PID controller is designed by minimizing the cost function by obtaining Linear Quadratic Regulator (LQR) approach. Then Genetic Algorithm (GA) was used for minimizing the LQR cost function and GA based PID controller was designed.

Özgünlük (Originality)

Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetimsel ve deneysel olarak test edilmiş ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. / The designed PID controllers have been simulated and experimentally tested in a liquid level control system and performance comparisons have been made.

Bulgular (Findings)

Deneysel sonuçlar, GA tabanlı PID'nin performansının LQR tabanlı PID'den performans indisleri açısından daha başarılı olduğunu göstermektedir. / Experimental results show that the performance of the GA based PID is better than LQR based PID in terms of performance indices.

Sonuç (Conclusion)

GA Tabanlı PID için normalize edilmiş ITSE indisi 0.6479 ile daha başarılı performans sergilemiştir. / Normalized ITSE index of 0.6479 is achieved for better performing GA based PID.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Gökhan YÜKSEK, Ahmet Naci METE*, Alkan ALKAYA

Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 07.08.2019 ; Kabul/Accepted : 22.10.2019)

ÖZ

Bu çalışmada iki farklı metot kullanılarak PID parametre ayarlaması yapılmıştır. İlk olarak Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı kullanılarak maliyet fonksiyonu minimize edilmiş ve optimal parametreler elde edilerek LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Ardından LQR maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetimsel ve deneysel olarak test edilmiş ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, GA tabanlı PID'nin performansının LQR tabanlı PID'den performans indisleri açısından daha başarılı olduğunu göstermektedir. GA Tabanlı PID için normalize edilmiş ITSE indisi 0.6479 ile daha başarılı performans sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal karesel düzenleyici, PID ayarlama, genetik algoritma.

LQR and GA based PID Parameter Optimization: Liquid Level Control Application

ABSTRACT

In this study, PID parameter tuning was made by using two different methods. Firstly, LQR based PID controller is designed by minimizing the cost function by obtaining Linear Quadratic Regulator (LQR) approach. Then Genetic Algorithm (GA) was used for minimizing the LQR cost function and GA based PID controller was designed. The designed PID controllers have been simulated and experimentally tested in a liquid level control system and performance comparisons have been made. Experimental results show that the performance of the GA based PID is better than LQR based PID in terms of performance indices. Normalized ITSE index of 0.6479 is achieved for better performing GA based PID.

Keywords: Linear quadratic regulator, PID tuning, genetic algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel PID denetleyiciler basitliği, kolay uygulanabilirliği ve ucuz maliyeti sebepleriyle süreç endüstrisinde en sık kullanılan kontrol tekniklerinden birisidir [1]. Ancak PID denetleyici tasarımında karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi PID parametrelerinin gerçek zamanlı uygulamalar için optimum olarak ayarlanmasıdır. Geleneksel PID denetleyicilerin değişen süreç dinamiklerine karşı yeterince gürbüz olmayışı nedeniyle istenilen performans hedeflerinin başarımında yetersiz kalışları, araştırmacıları PID denetleyicilerde optimal tasarım yöntemleri üzerine çalışmalar yapmaya yöneltmiştir [2]. Literatürde bu konuda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Parametre ayarlama yöntemleri olarak bu çalışmalar üç ana başlık altında sınıflandırılabilirler; deneysel metodlar (Ziegler-Nichols (ZN)), analitik metodlar (Root Locus), ve optimizasyon tabanlı metodlar (İteratif Geribeslemeli Ayarlama (IFT)) [3]. Tüm bu metodlar arasında en bilinen ve en çok kullanılan ZN metodudur [4]. Süreç endüstrisinin çok geniş bir alanında

başarılı uygulamaları vardır. Fakat gürbüz bir teknik olmadığından dolayı sistem dinamikleri değiştiğinde geçiş rejimi cevabı kabul edilebilir sınırların ötesine çıkabilmektedir. Süreç endüstrisindeki sistemlerin büyük çoğunluğunun zamanla değişen dinamik sistemler olduğu göz önüne alındığında, sistemin çevresel etkilerden en az etkilenecek şekilde kontrol edilmesi için uyarlamalı ve optimal kontrol ayarlama teknikleri, ZN metoduna göre daha başarılı olmaktadır [5].

Son yıllarda PID parametrelerinin ayarlanmasında yapay zekâ algoritmaları sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Nagaraj ve arkadaşlarının çalışmalarında PID parametre ayarlamasında yapay zekâ kullanımının çok fazla avantajı olduğuna değinilmiştir. Yüksek dereceli sistemlere uygulanabilirliği, farklı kontrol tekniklerinin dengeli şekilde birlikte kullanımına olanak sağlaması, hızlı hesaplama ile çok kısa süre içerisinde optimizasyonun gerçekleşmesi gibi avantajlar yapay zekâyı bu alanda ilgi çekici hale getirmektedir [6]. Lin ve Liu'nun çalışmalarında adaptif genetik algoritma ile PID parametrelerini ayarlayarak yükselme zamanı, sistemin referans sinyali ve çıkışı arasındaki hata sinyalinin mutlak zaman integrali ve kontrol sinyalinin karesinin ağırlık matrisleriyle çarpılarak toplanmasıyla elde edilen

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mete@mersin.edu.tr

bir maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan maliyet fonksiyonunun global minimumu bulunarak optimal PID parametreleri ayarlanmış ve geleneksel metotlara göre daha başarılı sonuçlar alındığı gösterilmiştir [3]. Wati ve Hidayat'ın çalışmasında kullanılan genetik algoritma için minimize edilecek maliyet fonksiyonu olarak sistemin birim basamak cevabından elde edilen maksimum tepe aşma noktası ve durulma süresi kullanılmıştır. Bu iki parametre hata olarak alınmış ve global minimum yakalanmaya çalışılmıştır [7]. Bu konuda kullanılan diğer bir yapay zekâ yöntemi ise yapay balık sürüsü algoritmasıdır. Cheng and Hong'un çalışmasında besin konsantrasyon fonksiyonu olarak İntegral Zaman Mutlak Hata (ITAE) indisini kullanılmıştır. Bu indisin minimize edilmesiyle PID parametreleri ayarlanmıştır [8]. Fang ve Chen'in çalışmasında PID parametre ayarlaması, başka bir yapay zekâ uygulaması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak hidrolik türbin hızı kontrolü için gerçekleştirilmiştir. Maliyet fonksiyonu olarak maksimum tepe aşımı, durulma süresi ve kalıcı durum hatası kullanılmış ve ITAE kriteri ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir [9]. Sravan ve arkadaşlarının çalışmalarında ise doğrusal ters sarkaç için PID denetleyici parametreleri GA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada maliyet fonksiyonu olarak ITAE kriteri kullanılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmanın sonucunda geleneksel ZN metoduna göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [10].

Son yıllarda PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR metodu kullanılarak PID denetleyiciye optimallik ve gürbüzlük (robust) özellikleri kazandırılmaya çalışılmaktadır. LQR denetleyicilerde sistem performansı ile kontrol enerjisi arasında bir ödünleşim mevcuttur. Bu iki kriter arasındaki denge ise Q ve R ağırlık matrisleri kullanılarak maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ile sağlanmaktadır. PID parametrelerinin de aynı yöntemle elde edilebileceği çalışmalarla ispatlanmıştır. Al-Smadi ve Mahmoud, çalışmalarında LQR denetleyiciler için kullanılan maliyet fonksiyonunu kullanarak PID denetleyici parametrelerini elde etmiş ve fotovoltaik sistemlerin gerilim kontrolünde kullanmıştır. Çalışma sonucunda Maksimum Güç Noktası İzleme algoritması ile işaret edilen gücü bu yöntemle de elde etmişlerdir [11]. Saleem ve Rizwan ise LQR tabanlı PID metodunu DC-DC Buck dönüştürücünün çıkış gerilim regülasyonunu geliştirmek için kullanmış ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [12].

GA ve diğer global optimizasyon teknikleri optimal kontrol tekniklerinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Wang ve arkadaşları çalışmalarında GA kullanarak LQR ağırlık matrislerini optimal olarak elde etmiştir [13]. Das ve arkadaşları ise çalışmalarında PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR maliyet fonksiyonunun yanı sıra, maliyet fonksiyonunun ağırlık matrislerine karar vermek için de genetik algoritmadan faydalanmışlardır [14].

Yapılan bu çalışmada iki farklı optimal PID denetleyicinin bir sıvı seviye kontrol sistemindeki performans karşılaştırması yapılmıştır. İlk olarak ağırlık matrislerine matematiksel olarak karar verilen LQR

maliyet fonksiyonundan faydalanılarak LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılarak optimum maliyet fonksiyonu elde edilmiş ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Deneysel sistem olarak süreç endüstrisinde, yiyecek işleme, içecek, süt ürünleri, filtreleme, atık su arıtımı, ilaç endüstrisi, su arıtma sistemleri, endüstriyel kimyasal işleme ve sprey kaplama ve otomatik sıvı dağıtım ve doldurma cihazları gibi kullanım alanları oldukça yaygın olan tank sıvı seviye kontrol sistemi seçilmiştir. Deneysel sonuçlar performans indisleriyle kıyaslanmıştır.

Bu çalışmanın sonraki bölümleri şu şekilde organize edilmiştir; 2. Bölümde PID denetleyiciler hakkında genel bilgi verilmiş, 3. Bölümde LQR tabanlı PID denetleyici tasarımı için gereken matematiksel çıkarımlar sunulmuş, 4. Bölümde GA tabanlı PID tasarımı için algoritma akış şeması verilmiş ve bu çalışmada kullanılan maliyet fonksiyonu açıklanmış, 5. Bölümde deneysel çalışma için kullanılan sıvı seviye sisteminin modellenmesi anlatılmış, benzetim çalışmalarının sonuçları 6. Bölümde, deneysel çalışmaların sonuçları ise 7. Bölümde verilmiş, son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve iki metodun performans kıyaslamaları yapılmıştır.

2. LQR TABANLI PID DENETLEYİCİ (LQR BASED PID CONTROLLER)

PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR maliyet fonksiyonu kullanılabilir. Bu şekilde optimal PID denetleyici tasarımı mümkün olmaktadır. Saha ve arkadaşlarının çalışmalarında PID parametre ayarlanmasında LQR yaklaşımı verilmiştir [15]. Bu yaklaşımda, PID optimal denetleyici kazanımlarını elde etmek için hata, hata oranı ve hatanın integrali durum değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Şekil 1'de LQR tabanlı PID parametre ayarlaması için blok diyagramı verilmiştir. Durum değişkenleri;

$$x_1(t) = \int e(t)dt \quad (1)$$

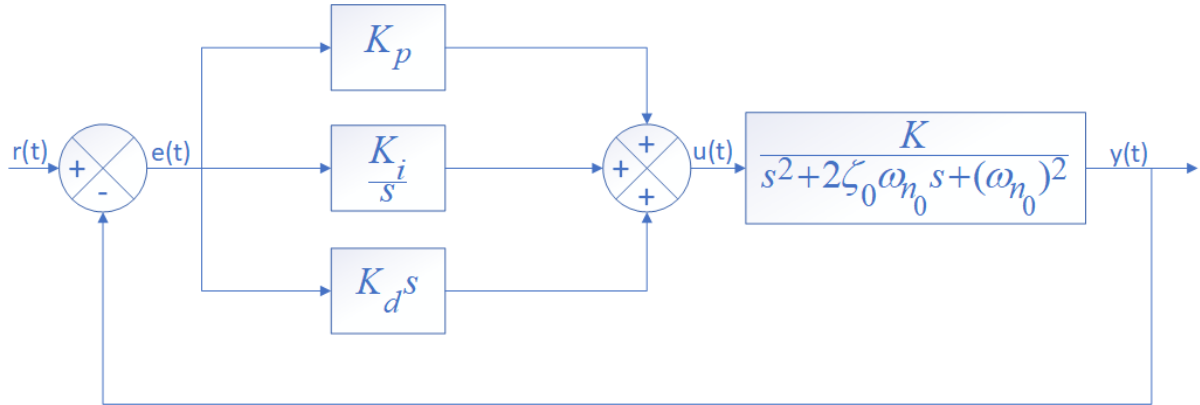
$$x_2(t) = e(t) \quad (2)$$

$$x_3(t) = \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

olarak tanımlanmışlardır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi süreç modeli 2. dereceden tek girişli ve tek çıkışlı olarak kabul edilmiştir. Hata sinyali $e(t)$ ile kontrol sinyali $u(t)$ arasındaki ilişki $r(t) = 0$ için;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta_0\omega_{n_0}s + (\omega_{n_0})^2} = \frac{-E(s)}{U(s)} \quad (4)$$



Şekil 1. LQR tabanlı PID parametre ayarlanması için blok diyagramı (Block diagram for LQR based PID parameter tuning)

$$[s^2 + 2\zeta_0\omega_{n_0}s + (\omega_{n_0})^2]E(s) = -KU(s) \quad (5)$$

şeklinde elde edilir.

(5) numaralı denkleme ters Laplace dönüşümü uygulandığında (6) numaralı denklem edilir.

$$\ddot{e} + 2\zeta_0\omega_{n_0}\dot{e} + (\omega_{n_0})^2e = -Ku \quad (6)$$

(1)-(3) denklemleri ile verilen durum değişkenleri için sürece ait kontrol edilebilir kanonik formdaki durum uzay modeli;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & (-\omega_{n_0})^2 & -2\zeta_0\omega_{n_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} u \quad (7)$$

şeklini alır.

Genel durum uzay modeli $\dot{x} = Ax + Bu$ olmak üzere sistem matrisi A ve giriş matrisi B ;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & (-\omega_{n_0})^2 & -2\zeta_0\omega_{n_0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

şeklinde dir.

Sistemden optimal performans elde etmek amacıyla LQR maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi gerekmektedir. LQR maliyet fonksiyonu denklem (9)'da verilmiştir.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (9)$$

Denklem (10)'da verilen Sürekli Cebirsel Riccati denkleminin çözümüyle (9) ile verilen maliyet fonksiyonunu minimize eden kontrol girişi (11)'deki gibi elde edilir.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Fx(t) \quad (11)$$

Burada P Sürekli Cebirsel Riccati denkleminin simetrik pozitif tanımlı çözümü, Q yarı pozitif tanımlı bir matris ve R ise süreç tek girişli olduğu için pozitif bir sabittir. Genel olarak optimal kontrol girişini elde edebilmek için R matrisi sabit tutulurken Q matrisi değiştirilir.

Denklem (11)'den durum geri-besleme kazanç vektörü;

$$F = R^{-1}[0 \quad 0 \quad -K] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix}$$

$$= -R^{-1}K[P_{13} \quad P_{23} \quad P_{33}]$$

$$= -[K_i \quad K_p \quad K_d] \quad (12)$$

olarak elde edilir. Durum geri besleme kazancının ilk elemanı integratör kazancı, ikinci elemanı oransal kontrol kazancı, son elemanı ise türevsel kontrol kazancıdır. Bu durumda kontrol sinyali denklem (13) ile ifade edilir.

$$u(t) = -Fx(t) = [K_i \quad K_p \quad K_d] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}$$

$$= K_i \int e(t)dt + K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (13)$$

Simetrik pozitif tanımlı matrisin 3. sütunu PID denetleyici parametrelerini vermektedir. Bu parametreler;

$$P_{13} = \frac{K_i}{R^{-1}K},$$

$$P_{23} = \frac{K_p}{R^{-1}K},$$

$$P_{33} = \frac{K_d}{R^{-1}K}, \quad (14)$$

şeklinde dir.

Kapalı döngü sistem matrisi A_c denklem (15) ile verilmiştir.

$$A_c = A - BF = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ A_{c31} & A_{c32} & A_{c33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Burada,

$$A_{c31} = -R^{-1}K^2 P_{13}$$

$$A_{c32} = (-\omega_{n_0})^2 - R^{-1}K^2 P_{23}$$

$$A_{c33} = -2\zeta_0\omega_{n_0} - R^{-1}K^2 P_{33}$$

olarak hesaplanır. Bu durumda kapalı döngü sistemin karakteristik denklemi (16) ile verilmiştir.

$$\Delta(s) = |sI - A_c|$$

$$= s^3 + (-A_{c33})s^2 + (-A_{c32})s + (-A_{c31}) \quad (16)$$

Kapalı döngü sistem için istenen sönümlenme oranı ζ_c ve doğal frekans ω_{nc} olmak üzere istenen karakteristik denklem $\Delta_i(s)$ şu şekilde ifade edilsin;

$$\Delta_i(s) = (s^2 + 2\zeta_c\omega_{nc}s + \omega_{nc}^2)(s + d\zeta_c\omega_{nc})$$

$$= s^3 + ((2+d)(\zeta_c\omega_{nc})s^2 + ((\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2)s + d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3) \quad (17)$$

Burada d , 3. kutup değerinin dominant kutupların reel kısmına olan uzaklığını belirleyen bir parametre olarak tanımlanmıştır. Bu parametrenin en az 3-5 aralığında seçilmesiyle 3. kutbun geçiş rejimi cevabına etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olacaktır.

(16) ve (17) ile verilen karakteristik denklemlerin katsayılarının eşleştirilmesiyle (18)'de verilen eşitlikler elde edilir.

$$-A_{c33} = (2+d)\zeta_c\omega_{nc}$$

$$-A_{c32} = ((\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2) \quad (18)$$

$$-A_{c31} = d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3$$

Buradan P matrisinin 3. satırının elemanları (19) ile verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{13} = \frac{d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3}{R^{-1}K^2}$$

$$P_{23} = \frac{(\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2 - (\omega_{n0})^2}{R^{-1}K^2} \quad (19)$$

$$P_{33} = \frac{(2+d)\zeta_c\omega_{nc} - 2\zeta_0\omega_{n0}}{R^{-1}K^2}$$

Son olarak Q matrisi ise;

$$Q_{11} = R^{-1}K^2P_{13}^2$$

$$Q_{22} = R^{-1}K^2P_{23}^2 - 2(P_{12} - (\omega_{n0})^2P_{23}) \quad (20)$$

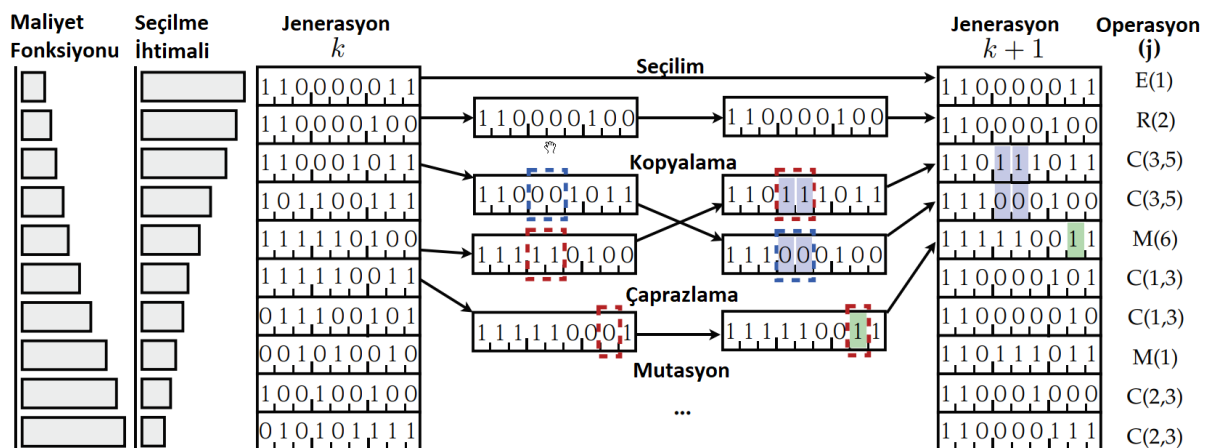
$$Q_{33} = R^{-1}K^2P_{33}^2 - 2(P_{23} - 2\zeta_0\omega_{n0}P_{33})$$

bağıntılarıyla elde edilir.

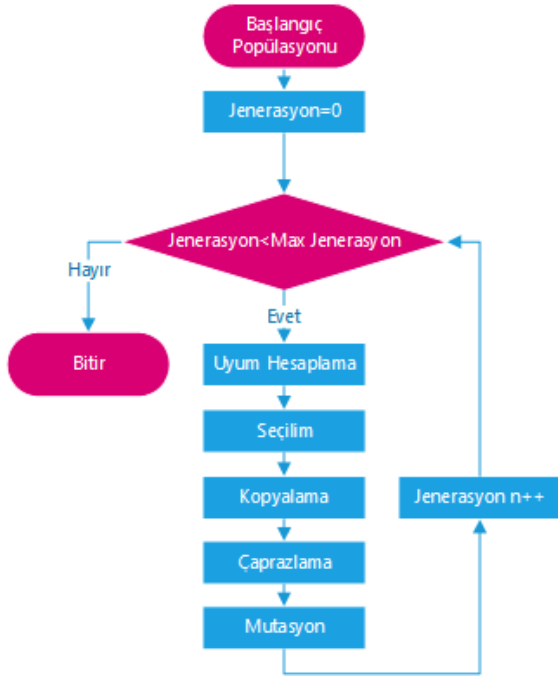
3. GENETİK ALGORİTMA TABANLI PID DENETLEYİCİ (GENETIC ALGORITHM BASED PID CONTROLLER)

Genetik Algoritma, Darwin'in doğal seçim ilkesine dayanan stokastik bir global uyarlamalı arama optimizasyon tekniğidir. Arama süreci, rekabet ortamında daha güçlü bireyin kazanabileceği biyolojik bir sürecin olduğu sürece benzetilmektedir. GA ilk olarak popülasyon adı verilen kromozomlarla temsil edilen bir dizi çözüme göre başlatılır. Her bir çözüm, uygulama verilerine bağlı olarak birler ve sıfırlar, gerçek sayılar veya diğer formların ikili bir dizisi ile gösterilebilir. Bu algoritmalarda, bir grup birey arasında en uygun olanı hayatta kalır ve gelişmiş uygunluk değerleri olan bireylerin yeni nesillerini oluşturmak için kullanılır.

Diğer optimizasyon tekniklerinden farklı olarak GA bir problemin çözümünü temsil eden birkaç kromozom içeren bir başlangıç popülasyonu ile başlar ve her çözüm bir uyum fonksiyonu tarafından değerlendirilir. Temel olarak, GA dört temel işlemde oluşur: seçim, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon. Seçim, en uygun kişilere daha fazla üreme şansı verir. Geçiş sırasında bazı üreyen bireyler genetik özelliklerini geçip değiştirirler. Mutasyonlar küçük bir oranda meydana gelebilir ve genetik materyalde rastgele bir değişikliğe neden olabilir, bu da popülasyonda çeşitliliğin oluşmasına katkıda bulunur. Evrim süreci, GA'yı arama alanındaki daha ümit vaat eden bölgeler boyunca yönlendirmektedir. Bu dört temel işlemin uygulanması, ebeveynlerinden daha iyi olabilecek yeni bireylerin oluşturulmasını sağlar. Bu algoritma birçok nesiller için tekrarlanır ve nihayet soruna en uygun çözümü temsil eden kişilere ulaşırken durur. Şekil 2'de GA'nın evrimi verilmiştir. k jenerasyonundaki bireylerin her biri, genetik operasyonlar için seçim olasılıklarıyla ters orantılı olan, uyum fonksiyonlarına göre artan sırada değerlendirilir ve sıralanır.



Şekil 2. GA evrim şeması (GA evolution scheme) [16]



Şekil 3. GA akış diyagramı (GA flowchart)

Ardından Şekil 3'te verilen akış diyagramında görüleceği üzere, bireyler seçim, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon kullanarak $k + 1$ popülasyonunun ilerlemesi için bu ağırlıklı olasılığa dayanarak seçilir. Bu, $k + 1$ oluşumunu oluşturur ve dizi, popülasyon istatistikleri birbirine yaklaşıncaya veya başka bir uygun durma kriterine ulaşılan kadar tekrarlanır. GA tabanlı PID denetleyici tasarımında uyum fonksiyonu tasarımcı tarafından belirlenmektedir. İstenilen şartları sağlamak için uyum fonksiyonu olarak denklem (21)'de LQR maliyet fonksiyonu verilmiştir. Bu fonksiyonda tek durum olarak seçilen hata için optimizasyon uygulanmaktadır.

$$J = \int_0^T Q(w_r - y)^2 + Ru^2 dt \quad (21)$$

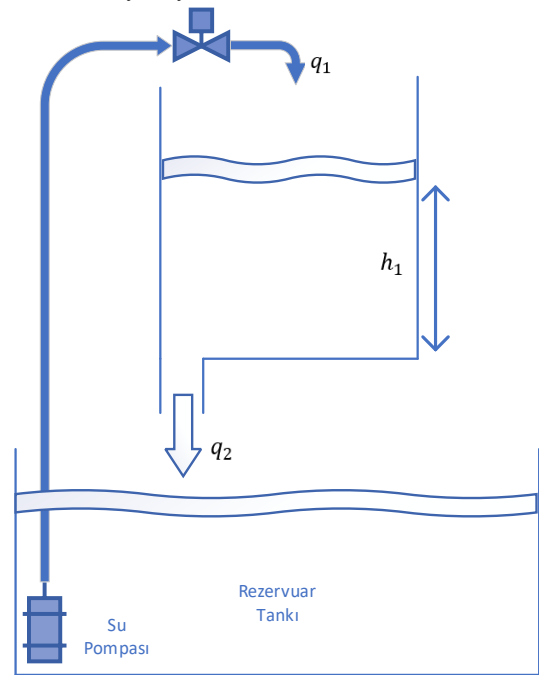
Şekil 4'te GA tabanlı PID denetleyici ile kontrol edilen sisteme ait blok diyagram verilmiştir. Optimizasyon süresince her iterasyonda, popülasyon sayısı kadar J uyum fonksiyonu elde edilmektedir. Her bir J , farklı P , I ve D değerlerinin test uygulaması ile elde edilmektedir. Bu J değerlerinden en küçük olanı bir sonraki iterasyonun başlangıç popülasyonunda kullanılmaktadır. Son iterasyona gelindiğinde global minimum elde edilmeye çalışılmaktadır. GA tabanlı PID optimizasyonunda tasarım parametreleri başlangıç popülasyonu ve jenerasyon sayısıdır.



Şekil 4. GA tabanlı PID denetleyici blok diyagramı (Block diagram for GA based PID)

4. SIVI SEVİYE KONTROL SİSTEMİNİN MODELLENMESİ (MODELLING of the LIQUID LEVEL CONTROL SYSTEM)

Çalışmada Şekil 5'te şematiği verilen Feedback 33-041 Tank Seviye Kontrol Sistemi kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Tank sisteminin sıvı seviye ölçümü için basınç sensörü kullanılmıştır. Sensörden alınan veriler DAQ kartı ile bilgisayar ortamına gerçek zamanlı olarak aktarılmış ve gerçek zamanlı kontrol sağlanmıştır. Sistemde rezervuar tankında bulunan su, pompa vasıtasıyla q_1 akış hızıyla tanka aktarılmaktadır. Aktarılan su, tankın alt bölümünde bulunan drenaj borusundan q_2 akış hızıyla tekrar rezervuar tankına boşalmaktadır. Kontrol sisteminin amacı h_1 seviyesini referans noktasında tutmaktır. Akış miktarları ve sıvı seviyesi arasındaki ilişki denklem (22)'te verilmiştir. Burada A tank yüzey alanını temsil etmektedir.



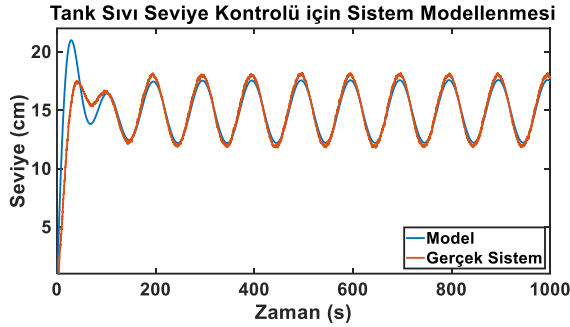
Şekil 5. Tank sistemi şematiği (Tank System Scheme)

$$A \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_2 \quad (22)$$

Sistemin matematiksel modeli sistem tanılama yazılım aracılığı ile elde edilmiştir. Öncelikle basınç sensörlerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Ardından rastgele bir senaryo ile açık döngü sisteme giriş gerilimi uygulanmış ve çıkışta sıvı seviye verileri alınmıştır. Elde edilen giriş ve çıkış verileri SIT'e girilmiş ve birçok model arasından en uygun olanı seçilmiştir. Sisteme ait transfer fonksiyonu denklem (23)'te verilmiştir.

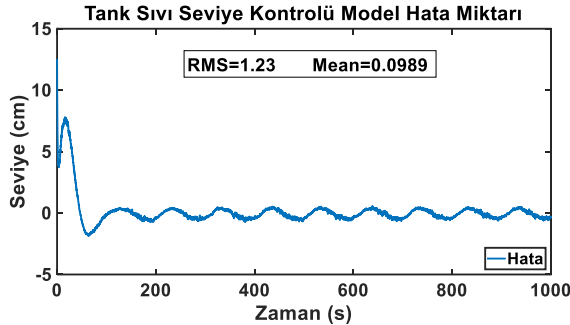
$$G(s) = \frac{0.2638s + 0.00029}{s^2 + 0.01588s + 0.000072} \quad (23)$$

Elde edilen transfer fonksiyonu ile deneysel sistem açık döngü olarak karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucu Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Matematiksel model ve deneysel sistemin karşılaştırılması (Comparison of the mathematical model and the experimental system)

Şekil 7'de sistem modeli ile gerçek sistemin cevapları arasındaki hata değeri verilmiştir. Çalışmada hatanın RMS değeri 1.23 ortalama değeri ise 0.0989 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Matematiksel model ile deneysel sistem arasındaki hata miktarı (Error between the mathematical model and the experimental system)

5. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Çalışma sonucu elde edilen PID parametreleri öncelikle benzetim çalışmaları ile denenmiştir.

5.1. LQR Tabanlı PID Denetleyici (LQR Based PID Controller)

Tank sisteminin matematiksel modelinden $\omega_{n_0} = 0.0085$, $\zeta_0 = 0.9358$ ve $K_0 = 0.2638$ olarak elde edilmiştir. İstenen kapalı döngü sistem dinamikleri ise $\omega_{n_c} = 0.3$, $\zeta_c = 0.595$, $d = 3$ ve $K_c = 0.05$ olarak belirlenmiş ve bu şartları sağlayacak PID parametreleri (25)'teki gibi elde edilmiştir. Parametrelerin seçiminde deneysel sistemin fiziksel sınırları göz önünde bulundurulmuştur. LQR tabanlı PID parametre ayarlamaya yaklaşımı kullanıldığında sistem matrisleri;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.000072 & -0.01588 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix}$$

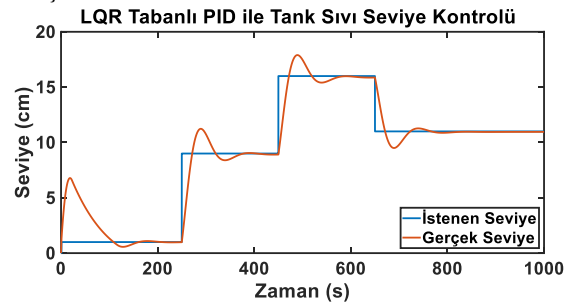
şeklinde elde edilir ve buradan;

$$\begin{bmatrix} K_p & K_i & K_d \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= [0.2043 \quad 0.0210 \quad 0.6352]$$

PID parametreleri elde edilir.

LQR tabanlı PID parametre ayarlamasından elde edilen sonuçlarla benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan senaryo, deneysel sistem baz alınarak oluşturulmuştur. Deneysel sistemde basınç sensörünün en iyi kalibrasyonu 250 sn. olarak belirlenmiş ve sistemin başlangıç noktası 250. sn. olarak kabul edilmiştir. Oluşturulan senaryoda 250. saniyede istenen sıvı seviyesi aniden 9 cm'ye yükseltilmiştir. Çalışmayı değişken koşullarda test etmek amacıyla istenen sıvı seviyesi 450. saniyede 15 cm'ye çıkartılmış ve 750. saniyede 11 cm'ye düşürülmüştür. Şekil 8'de görüldüğü gibi LQR tabanlı PID ile kalıcı durum hatası sıfıra indirgenmiş ve istenen geçici durum cevabı elde edilmiştir.

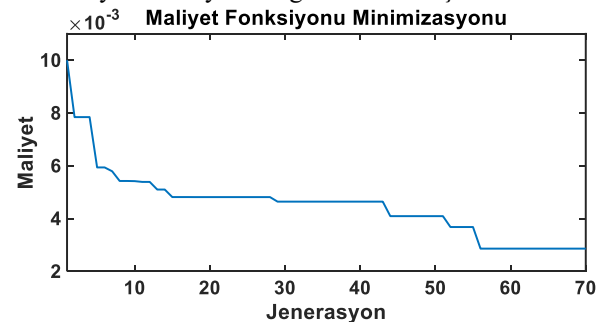


Şekil 8. LQR tabanlı PID denetleyicisi için benzetim çalışması sonucu (Simulation result for LQR Based PID)

5.2. GA Tabanlı PID Denetleyici (GA Based PID Controller)

Bu çalışmada GA maliyet fonksiyonu olarak (21) ile verilen LQR kontrol tekniğinde kullanılan maliyet fonksiyonu kullanılarak uyum fonksiyonu elde edilmiştir.

Popülasyon sayısı 25, maksimum jenerasyon ise 70 olarak alınmıştır. Deneysel sistemin fiziksel sınırlarının dışına çıkılmaması ve en iyi geçiş cevabını yakalamak amacıyla farklı R ve Q ağırlık matrisleri kullanılarak PID parametreleri ayarlanmaya çalışılmıştır. R=0.001 ve Q=0.0001 değerlerinde elde edilen PID parametrelerinin en iyi sonucu verdiği, Şekil 9'da verilen maliyet fonksiyonu minimizasyon grafiğinden elde edilmiştir. Maliyet fonksiyonu J, 0.0312 değerine kadar indirgenmiştir. Şekil 10'da her bir jenerasyonda elde edilen maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



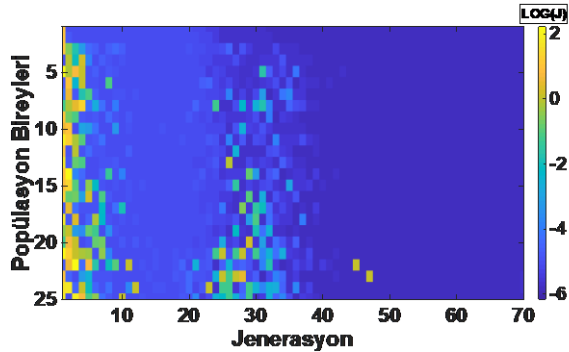
Şekil 9. Maliyet fonksiyonu minimizasyonu (Cost function minimization)

Bu çalışma sonucunda elde edilen PID parametreleri;

$$[K_p \ K_i \ K_d] \quad (26)$$

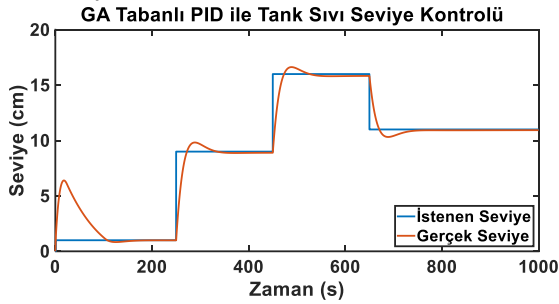
$$= [0.3242 \ 0.0144 \ 0.0012]$$

şeklinde elde edilmiştir.



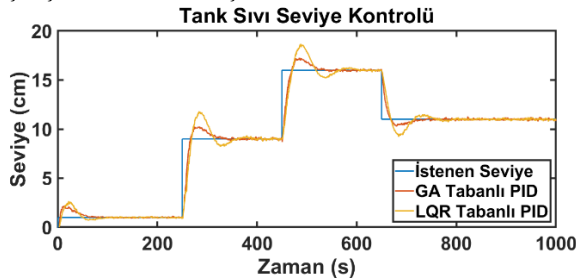
Şekil 10. GA tabanlı PID optimizasyonunda her bir jenerasyona karşılık gelen maliyet fonksiyonları (Cost functions corresponding to each generation in GA-Based PID optimization)

GA tabanlı PID parametre ayarlanmasından elde edilen PID denetleyici için benzetim çalışması sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. LQR Tabanlı PID denetleyici için yapılan deneydeki senaryo kullanılmış ve başarılı sonuç elde edilmiştir.



Şekil 11. GA tabanlı PID denetleyici için benzetim çalışması sonucu (Simulation result for GA Based PID)

Şekil 12'de LQR tabanlı PID denetleyici ve GA tabanlı PID denetleyicinin benzetim sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 12. GA tabanlı PID denetleyici ve LQR tabanlı PID denetleyici benzetim sonucu karşılaştırılması (Comparison of simulation results for GA Based PID and LQR Based PID)

Benzetim çalışmaları sonuçlarından GA tabanlı PID denetleyicili sistemin basamak tepkilerinin daha düşük maksimum tepe aşımı ve durulma süresine sahip olduğu görülmüştür.

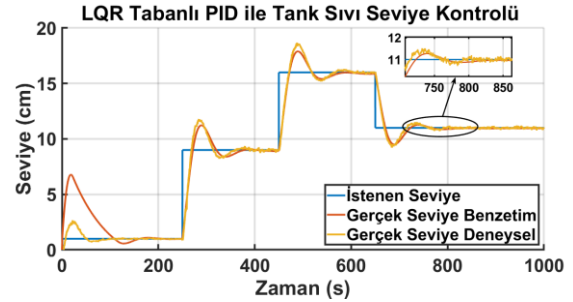
6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneysel sistem olarak Şekil 13'te verilen Feedback 33-041 Tank Seviye Kontrol Sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada da benzetim çalışmasında kullanılan senaryo referans olarak uygulanmıştır. Şekil 14'te LQR tabanlı PID denetleyicinin benzetim ve deneysel çalışma sonuçları beraber verilmiştir.



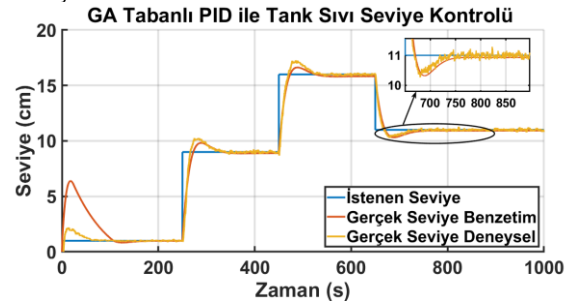
Şekil 13. Feedback 33-041 tank sistemi (Feedback 33-041 tank system)

LQR tabanlı PID denetleyicili sisteme ait benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarının basamak tepkilerindeki tepe noktaları arasındaki küçük farklar dışında tamamen örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 14. LQR tabanlı PID denetleyici benzetim ve deneysel çalışma sonucu karşılaştırmaları (Comparison of simulation and experimental results for LQR Based PID)

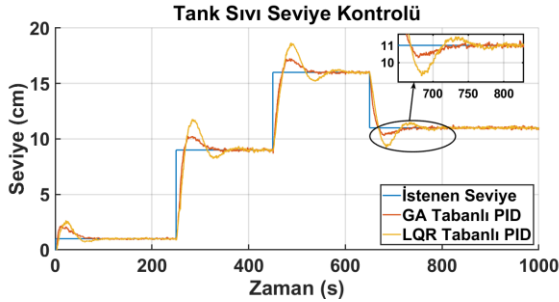
Şekil 15'te GA tabanlı PID denetleyici için benzetimsel ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılması olarak verilmiştir.



Şekil 15. GA tabanlı PID denetleyici benzetim ve deneysel çalışma sonucu karşılaştırılması (Comparison of simulation and experimental results for GA Based PID)

Şekil 15'den de görüleceği gibi benzetimsel sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Son olarak Şekil 16'da GA tabanlı PID ve LQR tabanlı PID denetleyicinin deneysel olarak karşılaştırılması verilmiştir. Basamak tepkilerine ait maksimum tepe aşımı ve durulma süresi değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda GA tabanlı PID denetleyicinin, maksimum aşma miktarının daha az olduğu ve daha kısa sürede kalıcı duruma ulaştığı görülmüştür.



Şekil 16. GA tabanlı PID denetleyici ve LQR tabanlı PID denetleyicinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of experimental results for GA Based PID and LQR Based PID)

Çizelge 1. LQR tabanlı PID ve GA tabanlı PID karşılaştırılması (Comparison of LQR Based PID and GA Based PID)

	Maks. tepe aşımı	Durulma Süresi
LQR PID	%30.77	102.3 sn.
GA PID	%13.66	70.6 sn.

Her iki denetleyici için performans indisleri IAE, ITAE, ITSE ve IATE değerleri normalize edilmiş olarak Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Performans indisleri (Performance indices)

	ITSE	ITAE	IAE	ISE
LQR PID	1	0.5518	1.4e-3	3.7e-3
GA PID	0.6479	0.4424	0.97e-3	2.5e-3

Alınan sonuçlardan GA tabanlı PID parametre optimizasyonunun LQR tabanlı optimizasyona göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı ve Genetik Algoritma kullanılarak iki farklı PID denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetim ve deneysel çalışmalarla test edilmiş ve performans kıyaslamaları yapılmıştır. Basamak cevaplarında LQR tabanlı PID denetleyici ile kıyaslandığında, GA tabanlı

PID denetleyici basamak tepkisinde hem daha düşük maksimum aşma yüzdesine sahiptir hem de daha kısa sürede kalıcı duruma ulaşmaktadır. Performans indisleriyle (ITSE, ITAE, IAE ve ISE) yapılan karşılaştırmada GA tabanlı PID denetleyicinin daha başarılı olduğu görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Koivo H. N. and Tanntu J. T., "Tuning of PID Controllers: Survey of Siso and Mimo Techniques," *IFAC Proc.*, 2017.
- [2] Ghosh A., Krishnan T. R., and Subudhi B., "Brief Paper - Robust proportional-integral-derivative compensation of an inverted cart-pendulum system: an experimental study," *IET Control Theory Appl.*, 2012.
- [3] Lin G. and Liu G., "Tuning PID controller using adaptive genetic algorithms," in *ICCSE 2010 - 5th International Conference on Computer Science and Education, Final Program and Book of Abstracts*, 2010.
- [4] Hägglund T. and Åström K. J., "Revisiting The Ziegler-Nichols Tuning Rules For Pi Control," *Asian J. Control*, 2008.
- [5] Chunchen W., Feng C., Guang Z., Ming Y., Li L., and Taihu W., "Design of Genetic Algorithm Optimized PID Controller for Gas Mixture System," in *2017 IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2017.
- [6] Nagaraj B., Subha S., and Rampriya B., "Tuning algorithms for PID controller using soft computing techniques," *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur. IJCSNS*, 2008.
- [7] Wati D. A. R. and Hidayat R., "Genetic algorithm-based PID parameters optimization for air heater temperature control," in *Proceedings of 2013 International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems, Robionetics*, 2013.
- [8] Cheng Z. and Xu H., "PID Controller Parameters Optimization Based on Artificial Fish Swarm Algorithm," *Fifth Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom.*, 2012.
- [9] Fang H. and Chen L., "Application of an enhanced PSO algorithm to optimal tuning of PID gains," in *2009 Chinese Control and Decision Conference, CCDC*, 2009.
- [10] Sravan B., Babu T. S., and Rajasekar N., "Tuning PID Controller for Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm," *Adv. Syst. Control Autom.*, 395-404, 2018.
- [11] Al-Smadi M. K., Hu Y., and Mahmoud Y., "LQR-based PID Voltage Controller for Photovoltaic Systems," *44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 1854-1859, 2018.
- [12] Saleem O. and Rizwan M., "Performance optimization of LQR-based PID controller for DC-DC buck converter via iterative-learning-tuning of state-weighting matrix," *Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields*, 32: 2019.

- [13] Wang T., Wang Q., Hou Y., and Chaoyang D., "Suboptimal controller design for flexible launch vehicle based on genetic algorithm: selection of the weighting matrices Q and R," *IEEE Int. Conf. Intell. Comput. Intell. Syst.*, 2: 720–724, 2009.
- [14] Das S., Pan I., Halder K., and Gupta A., "LQR based improved discrete PID controller design via optimum selection of weighting matrices using fractional order integral performance index," *Appl. Math. Model.*, 2013.
- [15] Saha S., Das S., Das S., and Gupta A., "A conformal mapping based fractional order approach for sub-optimal tuning of PID controllers with guaranteed dominant pole placement," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2012.
- [16] Brunton S. and Kutz N., *Data Driven Science and Engineering. Cambridge University Press*, 978-1-108-42209-3, 2019.