



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



Kararlı FOTD Sistemler için CSR Temeline Dayalı Bir PI Arama Tekniği

Cem ONAT¹

¹Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
02040, Adıyaman

e-posta : conat@adiyaman.edu.tr, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4295-4860>

Anahtar Kelimeler

Öz

PI kontrol, Tasarım, WGC metot, CSR merkezi, Zaman gecikmesi

Bu çalışmada, kontrol mühendisliğinde temel öneme sahip kararlı-birinci mertebeden (FOTD) sistemlerin PI (Oransal-İntegral) kontrolü için algoritmik bir arama tekniği sunulmuştur. Arama tekniği, kararlı kılan kontrolcü parametreleri bölgesinin CSR (Konveks Kararlılık Bölgesi) merkezi temeline dayanmaktadır. Önerilen teknik, CSR merkez kontrolcüsünün etrafındaki uydu kontrolcülerini sınavarak iki adımda yerleşme performansını minimize eden PI kontrolcüyü bulmaktadır. Literatürdeki güncel metotlar ile yapılan karşılaştırmalı simülasyon önerilen teknik ile bulunan kontrolcünün üstün performans sergilediğini göstermektedir.

* conat@adiyaman.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1570074



A PI Searching Technique Based on CSR for Stable FOTD Systems

Keywords

PI control, Design, WGC method, CSR center, Time delay

Abstract

In this study, an algorithmic search technique is presented for PI (Proportional-Integral) control of stable-first-order (FOTD) systems, which is of fundamental importance in control engineering. The search technique is based on the CSR (Convex Stability Region) center of the stabilizing controller parameters region. The proposed technique finds the PI controller that minimizes the settling time performance in two steps by testing the satellite controllers around the CSR central controller. Comparative simulation with current methods in the literature shows that the controller found with the proposed technique exhibits superior performance.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 18.10.2025

Kabul Tarihi : 26.12.2025

Research Article

Submission Date : 18.10.2025

Accepted Date : 26.12.2025

Extended Abstract

Time delay is a very critical issue in control systems because it directly affects the dynamic response of the system. Time delay (or dead time) refers to how long a change applied to the input of the system is delayed from being reflected in the output. This delay can degrade control system performance, stability and accuracy (George and Ganesan 2020). Time delay is one of the most important factors that determine how quickly a system can reach a desired state. Delays cause the system to respond more slowly to the intended output, and as a result, the system may not achieve the desired performance goals. Also, in a feedback system, when the system's response is delayed, the controller may take incorrect corrective actions. This may cause the system to oscillate, fluctuate or become unstable. Particularly high time delays can cause the system itself to behave in an oscillatory or chaotic manner (Aryan, Raja and Vilanova, 2022).

Accounting for time delay is crucial to properly designing a control system. The delay may cause standard control methods (e.g. PID controllers) to not work correctly. In this case, delay-specific methods or forward-looking control strategies should be applied. However, since time delay introduces nonlinear expressions into the system model, it makes the system model more complex (Das, Chakraborty and Naskar, 2023; Sain and Mohan, 2021). Especially in real-time systems such as automation, robotics, telecommunications, network control systems, and autonomous vehicles, time delays are a critical factor. When systems require fast and accurate responses, time delay can completely disrupt the system's function. To make a general evaluation at this point: Time delay is an important factor that seriously affects stability and performance in control systems, and therefore, it is necessary to accurately model the delay and implement appropriate control strategies.

PID (Proportional-Integral-Derivative) controllers are one of the most widely used control mechanisms in industrial and automation applications. These controllers are very popular due to their simple structure and wide range of effectiveness. PID controllers combine the three basic components (ratio, integral, derivative) used in feedback control systems and provide the targeted performance with the combination of these components. PID controllers ensure that a system reaches the desired reference point (set value) and remains stable there. The correct combination of proportional (P), integral (I) and differential (D) components ensures that the system reaches the reference value quickly, minimizes the margin of error and prevents unnecessary oscillations (Onat, Hamamcı and Obuz, 2012). On the other hand, in noisy systems, the derivative term may negatively affect performance. For this reason, the majority of PID controllers used in practice have their derivative component turned off. In other words, PI controller application is much more common than PID.

The weighted geometric center (WGC) method is an effective method for PI control of time-delay systems. The method, which graphically uses the stabilizing controller parameter region, has been used in many applications so far. Onat (2014) designed a controller for condensing boilers using the weighted geomet-

ric center method Özyetkin, Onat and Tan (2018) designed a PI-PD controller using this method. On the other hand, in many controller design studies, the weighted geometric center controller was used for comparison (Zheng, Huang and Zhang, 2019; Ghous, Xiang and Karimi, 2018; Yang and Gao., 2014; Vasickaninova, Bakošová, Čirka, Kalúz M. and Oravec , 2018; Onat, Daskin, Turan and Özgüven, 2021).. The weighted geometric center controller provides reasonable performance, but the use of all points forming the boundaries of the stability region during its design makes the method quite complicated. Another graphical method based on the stabilizing controllers region is the central method of the convex stability region (CSR) (Onat, 2019). In this method, the center can be calculated much more easily than the controller-weighted geometric center.

In this study, a PI controller search technique based on the center of the convex stability region (CSR) is proposed for PI control of first-order stable time-delay systems. The proposed algorithmic search technique is implemented in four steps. In the first step, the convex stability region and its center are calculated in the PI controller parameters (k_p - k_i) plane. In the second step, satellite controllers are defined through polar coordinate system parameters around the central controller of the convex region. In the third step, the unit step responses of the satellite controllers and the central controller are obtained and compared. In the last step, the best performing satellite controller is appointed as the central controller. The operations are continued cyclically until an acceptable unit step response is obtained.

This paper, which proposes a search technique for PI control of stable-time-delayed first-order systems, is organized as follows: In the next section, the proposed algorithmic technique is introduced. Then, the proposed technique was applied and the controller performances were obtained comparatively. In the last section, the results obtained are interpreted.

1. Giriş

Zaman gecikmesi, kontrol sistemlerinde çok kritik bir konudur çünkü sistemin dinamik tepkisini doğrudan etkiler. Zaman gecikmesi (veya ölü zaman), sistemin girişine uygulanan bir değişikliğin çıkışa yansımalarının ne kadar süreyle ertelendiğini ifade eder. Bu gecikme kontrol sistemi performansını, kararlılığını ve doğruluğunu bozabilir (George ve Ganesan, 2020). Zaman gecikmesi, bir sistemin istenen duruma ne kadar hızlı ulaşabileceğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Gecikmeler, sistemin hedeflenen çıkışa daha yavaş tepki vermesine neden olur ve bunun sonucunda sistem istenen performans hedeflerini gerçekleştiremeyebilir. Ayrıca geri beslemeli bir sistemde, sistemin tepkisi geciktiğinde, kontrolör yanlış düzeltici eylemler yapabilir, bu da sistemin salınımlara, dalgalanmalara veya kararsızlığa neden olmasına yol açabilir. Özellikle yüksek zaman gecikmeleri, sistemin kendi başına titreşimli veya kaotik bir şekilde davranmasına neden olabilir (Aryan, Raja ve Vilanova, 2022).

Zaman gecikmesinin hesaba katılması, bir kontrol sisteminin doğru bir şekilde tasarlanması için çok önemlidir. Gecikme, standart kontrol yöntemlerinin (örne-

ğin PID kontrolörler) doğru çalışmamasına neden olabilir. Bu durumda, gecikmeye özel yöntemler veya ileriye dönük kontrol stratejileri uygulanmalıdır. Ancak sistem modeline zaman gecikmesi doğrusal olmayan ifadeler getirdiğinden sistem modelini daha karmaşık hale getirmektedir (Das, Chakraborty ve Naskar, 2023; Sain ve Mohan, 2021). Özellikle otomasyon, robotik, telekomünikasyon, ağ kontrol sistemleri ve otonom araçlar gibi gerçek zamanlı sistemlerde, zaman gecikmeleri kritik bir faktördür. Sistemler hızlı ve doğru tepkiler gerektirdiğinde, zaman gecikmesi sistemin işlevini tamamen bozabilir. Bu noktada genel bir değerlendirme yapmak gerekirse; zaman gecikmesi, kontrol sistemlerinde kararlılığı ve performansı ciddi şekilde etkileyen önemli bir faktördür ve bu yüzden, gecikmenin doğru bir şekilde modellenmesi ve uygun kontrol stratejilerinin uygulanması gereklidir.

PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüler, endüstriyel ve otomasyon uygulamalarında en yaygın kullanılan kontrol mekanizmalarından biridir. Bu kontrolcüler, basit yapıları ve geniş bir yelpazede etkin olmaları nedeniyle çok popülerdir. PID kontrolcüler, geri besleme kontrol sistemlerinde kullanılan üç temel bileşeni (oran, integral, türev) bir arada bulundurur ve bu bileşenlerin kombinasyonu ile hedeflenen performansı sağlar. PID kontrolcüler, bir sistemin istenilen referans noktaya (set değerine) ulaşmasını ve orada kararlı kalmasını sağlar. Oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) bileşenlerin doğru kombinasyonu, sistemin hızlı bir şekilde referans değerine ulaşmasını, hata payının minimuma inmesini ve gereksiz salınımların önlenmesini sağlar. Diğer taraftan gürültülü sistemlerde türev terimi performansı olumsuz etkileyebilir (Onat, Hamamcı ve Obuz, 2012). Bu sebeple uygulamada kullanılan PID kontrolcülerin büyük bir çoğunluğu türevsel bileşeni kapalıdır. Başka bir ifade ile PID'ye göre PI kontrolcü uygulaması çok daha yaygındır.

Zaman gecikmeli sistemlerin PI kontrolü konusunda, ağırlıklı geometrik merkez (WGC) yöntemi etkili bir metottur (Onat, 2013). Kararlı kılan kontrolcü parametreleri bölgesini grafiksel olarak kullanan metot şimdiye kadar birçok uygulamada kullanılmıştır. Onat (2014), ağırlıklı geometrik merkez metodunu kullanarak yoğunlaşmış kazanlar için kontrolcü tasarlamıştır. Özyetkin, Onat ve Tan (2018) bu metodu kullanarak PI-PD kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Diğer taraftan pek çok kontrolcü tasarım çalışmasında ağırlıklı geometrik merkez kontrolcüsü karşılaştırma için kullanılmıştır (Zheng, Huang ve Zhang, 2019; Ghous, Xiang ve Karimi, 2018; Yang ve Gao., 2014; Vasickaninova, Bakošová, Čirka, Kalúz M. ve Oravec, 2018; Onat, Daskin, Turan ve Özgüven, 2021). Ağırlıklı geometrik merkez kontrolcü makul bir performans sağlamaktadır ancak tasarımı sırasında kararlılık bölgesinin sınırlarını oluşturan tüm noktaların hesapta kullanılması yöntemi oldukça karmaşık kılmaktadır. Kararlı kılan kontrolcüler bölgesini temel alan bir başka grafik yöntem de konveks kararlılık bölgesinin (CSR) merkezi yöntemidir (Onat, 2019). Bu yöntemde, merkez kontrolcü ağırlıklı geometrik merkeze göre çok daha kolay hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada, birinci derece kararlı zaman gecikmeli sistemlerin PI kontrolü için konveks kararlılık bölgesinin (CSR) merkezini temel alan bir PI kontrolcü

arama tekniği önerilmiştir. Önerilen algoritmik arama tekniği dört adımda uygulanmaktadır. Birinci adımda PI kontrolcü parametreleri (k_p - k_i) düzleminde konveks kararlılık bölgesi ve onun merkezi hesaplanır. İkinci adımda, konveks bölgenin merkez kontrolcüsü etrafında kutupsal koordinat sistemi parametreleri aracılığıyla uydu kontrolcüler tanımlanır. Üçüncü adımda uydu kontrolcülerin ve merkez kontrolcünün birim adım cevapları elde edilir ve karşılaştırılır. Son adımda, en iyi performans gösteren uydu kontrolcüsü merkez kontrolcü olarak atanır. Döngüsel olarak işlemler kabul edilebilir birim adım cevabı elde edilinceye kadar devam edilir.

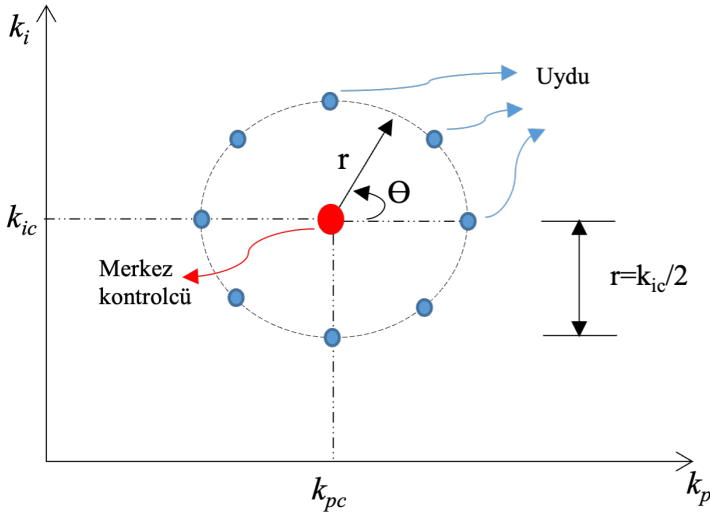
Kararlı-zaman gecikmeli birinci dereceden sistemlerin PI kontrolü için bir arama tekniği öneren bu makale şöyle organize edilmiştir: Bir sonraki bölümde önerilen algoritmik teknik tanıtılmıştır. Ardından önerilen teknik uygulanmış ve kontrolcü performansları karşılaştırmalı elde edilmiştir. Son bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. PI Arama Tekniği

İlk olarak belirtmek gerekir ki “CSR temeline dayalı yeni bir arama tekniği sunan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur”. Kararlı kılan parametreler bölgesinin hesabına dayanan PI kontrolcü tasarımı yöntemleri (Onat, 2013) tatmin edici performans sonuçları verse de civarındaki kontrolcülerin daha iyi performans gösterme durumu her zaman vardır. Çünkü grafik temelli bu tasarım yaklaşımları herhangi bir şekilde optimizasyon sunmazlar. Ancak optimizasyon algoritmalarına çok iyi bir başlangıç arama noktası sunarlar. CSR merkezi kolay hesabı yüzünden bunun için biçilmiş kaftandır. Bu çalışmada önerilen PI kontrolcüsü arama tekniği SCR merkezinin hesabını temel almaktadır. Teknik dört aşamada uygulanmaktadır.

1.Adım: Kararlı kılan kontrolcüler bölgesi kök sınır yer eğrisi metodu (Menak ve Tan, 2024) ile hesaplanır. Ardından kararlılık alanının dönüm ve köşe noktaları kullanılarak konveks alan belirlenir. Konveks alanın köşe noktalarının koordinat değerleri kullanılarak merkez noktadaki kontrolcü (merkez kontrolcü parametreleri: k_{pc} ve k_{ic}) belirlenir.

2. Adım: Polar koordinat sistemi kullanılarak belirli hassasiyette uydu kontrolcüler hesaplanır. Burada θ ve r sırasıyla polar koordinat vektörünün yön bilgisini tayin eden açı ve büyüklüğünü tayin eden genlik değeridirler. θ açısının değeri istendiği kadar küçük seçilebilir. Ancak bunun hesaplama yükünü artıracak göz ardı edilmemelidir. Şekil 1’de verilen örnek gösterim için θ açısının 45° ’lık aralık değerleri ile uydu kontrolcülerin hesaplandığı görülmektedir. Bunun yanında, polar koordinat sisteminin yarıçapı olarak merkez kontrolcünün k_{ic} parametresinin yarısı ($r=k_{ic}/2$) kullanılır. Polar koordinat sistemine göre elde edilen noktalar Şekil 1’de verilmektedir.

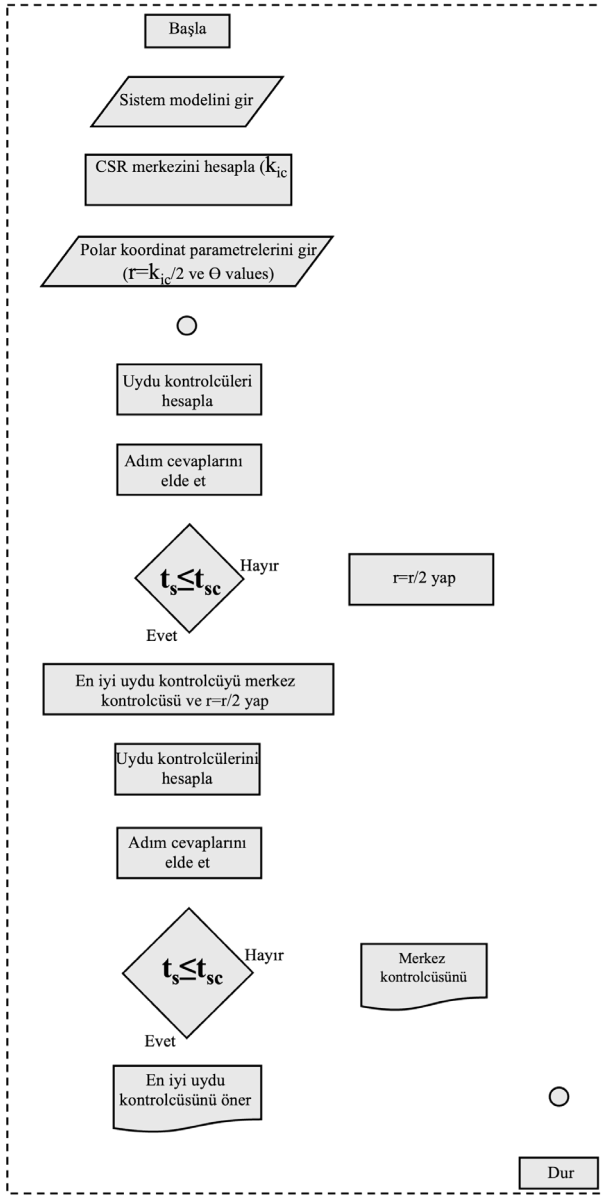


Şekil 1. Polar koordinat sistemi ve uydu kontrolcüler.

3. Adım: Bu aşamada, merkez kontrolcü ile uydu kontrolcülerin birim adım cevapları elde edilir. En iyi yerleşme zamanı performansı sergileyen kontrolcü uydu kontrolcülerden biri olursa merkez kontrolcüsü olarak atanır ve Adım 2 'ye dönülür. En iyi performansı merkez kontrolcü sergilerse eğer $r=r/2$ olarak atanıp Adım 2'ye dönülür. Bu şekilde, aynı merkezde daha dar bir alanda uydu kontrolcüler üretilmiş olur. Algoritmanın bu adımında gerçekleştirilen işlem sonlu bir sayı kadar tekrar edilebilir. Bu çalışmada ele alınan örnek sistem için iki defa tekrarlanması yeterli olmuştur. Bu tekrar sayısı da polar koordinat sisteminin açılma aralığının seçiminde olduğu işlem yükünü makul seviyede tutmak amacıyla sınırlandırılması gerekmektedir. *Uyarı:* Bu çalışmada, metodu oldukça yalın bir biçimde tanıtmak amacıyla kontrolcü performans göstergesi olarak sadece yerleşme zamanı performansı kullanılmıştır. Buna karşılık, kontrol tasarımcısının sistemden beklentileri doğrultusunda, tüm geçici rejim cevabı karakteristiklerini ve ISE (Toplam karesel hata) gibi metrikleri belirli ağırlık değerleri oranında hesaba katan daha karmaşık yapıda bir performans göstergesi kullanarak da önerilen algoritma kullanılabilir.

4. Adım: En iyi yerleşme zamanı performansı sunan uydu kontrolcü önerilen kontrolcü olarak yazdırılır.

Tüm bu adımları içeren algoritmik bilgi akış şeması Şekil 2'de verilmektedir. Bu çalışmada başarı göstergesi olarak yerleşme zamanının minimizasyonu kullanılmıştır. Gerekli durumlarda diğer geçici rejim performans göstergelerinin belirli kat-sayılar dahilinde kullanıldığı daha karmaşık başarı göstergeleri de kullanılabilir.



Şekil 2. PI arama algoritması

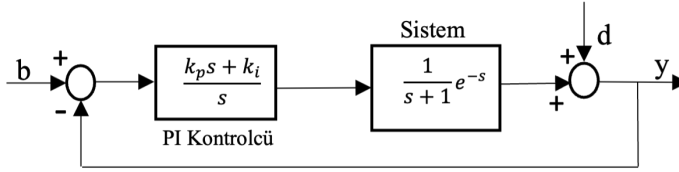
3. Simülasyon Uygulaması

Denklem 1’de verilen birinci mertebeden sistemi göz önüne alalım. Sistem açık çevrim kararlı ve bir saniyelik ölü zamana sahiptir. Birinci mertebeden sistemler kontrol tasarımında temel öneme sahiptir. Birinci mertebeden sistemler üzerin-

den yapılan tüm tasarım ve sentez çalışmaları istendiğinde yüksek mertebeden sistemlere genişletilebilir.

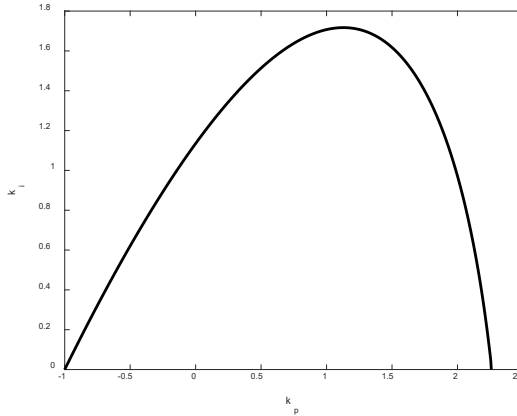
$$G(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{1}{s+1} e^{-s} \quad (1)$$

Kapalı çevrim kontrol sistemi Şekil 3'te verilmektedir. PI kontrolcünün transfer fonksiyonu, $PI(s) = N_k(s)/D_k(s)$, paralel formdadır. Burada b ve d sinyalleri sırasıyla referans giriş ve bozucu giriş sinyalleridir.



Şekil 3. Kapalı çevrim kontrol sistemi

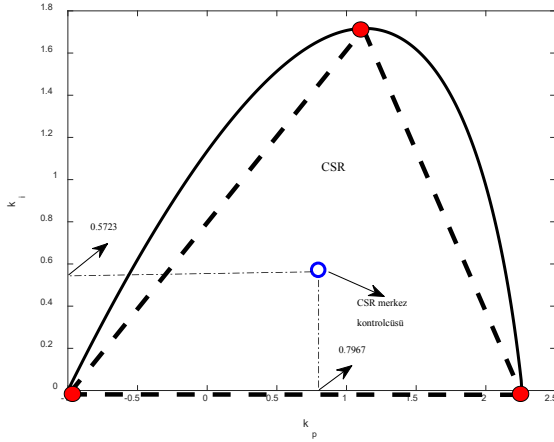
Kararlı kılan kontrol parametreleri bölgesi kararlılık kök yer eğrisi (stability boundary locus) metodu ile elde edilir. Bu metodun detayları için (Irgan, Menak ve Tan, 2024) çalışmasına bakınız. Denklem 1'de verilen sistemin kararlı kılan PI kontrolcü parametreleri bölgesi Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Kararlı kılan kontrolcü parametreleri bölgesi

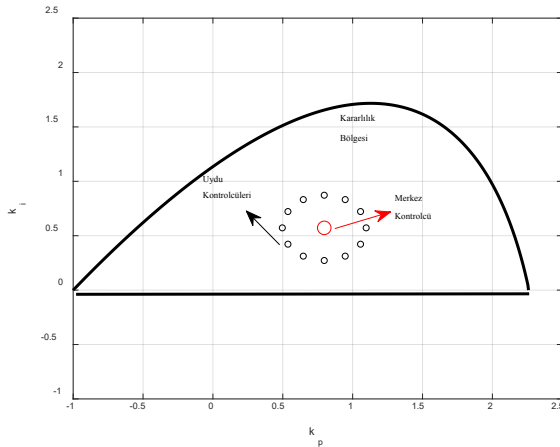
Ardından, kararlı kılan kontrolcüler bölgesinin köşe ve dönüm noktalarını kullanarak konveks kararlılık bölgesi ve onun merkezi hesaplanır. Elde edilen konveks bölge ve onun merkez noktası Şekil 5'de verilmektedir. Ayrıca bir karşılaştırma imkanı yaratması bakımından ağırlıklı geometrik merkez noktası kontrolcüsü de hesaplanmıştır. Ağırlıklı geometrik merkez kontrolcüsünün detay hesaplamaları için (Onat, 2013) çalışmasına bakınız. Çalışılan model için ağırlıklı geometrik

merkez kontrolcüsünün parametreleri $kp_{wgc}=0.44277$ ve $ki_{wgc}=0.46858$ 'dir. CSR merkezindeki kontrolcü parametreleri ise $kp_{csr}=0.7967$ ve $ki_{csr}=0.5723$ olarak hesaplanmıştır.

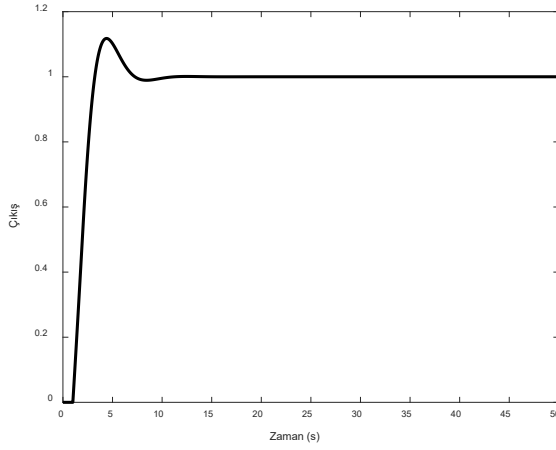


Şekil 5. Konveks kararlılık bölgesi ve merkez kontrolcüsü

Önerilen arama tekniği, merkez CSR kontrolcü hesabından sonra iki adımda uydu kontrolcülerini hesaplar. Buna göre ilk adımda elde edilen ilk halka uydu kontrolcüler Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 7 en iyi yerleşme performansı sağlayan uydu kontrolcünün birim adım performansı verilmektedir. Birinci adımda bulunan en iyi uydu kontrolcü parametreleri $kp_{u1}=0.4967$ ve $ki_{u1}=0.5723$ 'dir. Birinci adımın en iyi uydu kontrolcüsünün yerleşme zamanı performansı 6.59 s'dir.

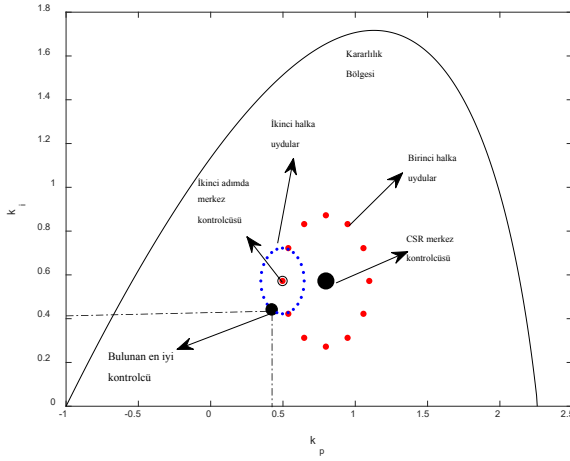


Şekil 6. Merkez kontrolcü ve uydu kontrolcülerini



Şekil 7. Birinci adımda elde edilen en iyi uydu kontrolcünün birim basamak cevabı

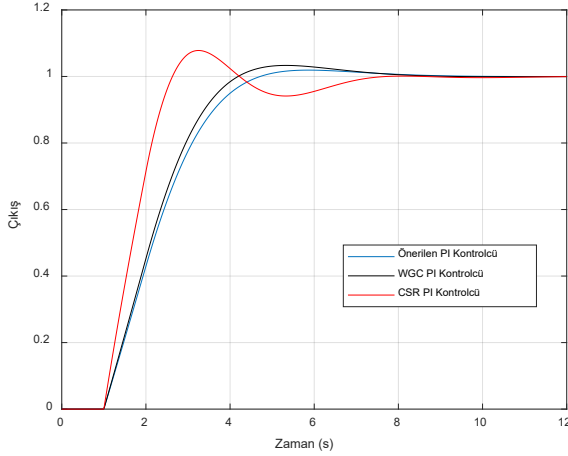
Önerilen arama algoritması iki adımda kontrolcü bulmaktadır. Son adımda, bulunan $kp_{u1}=0.4967$ ve $ki_{u1}=0.5723$ uydu kontrolcüsü merkeze alınarak onun uydu kontrolcülerini elde edilir. Buna göre algoritmanın son adımında hesaplanan ikinci halka uydu kontrolcüler Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. İkinci halka uydu kontrolcüler.

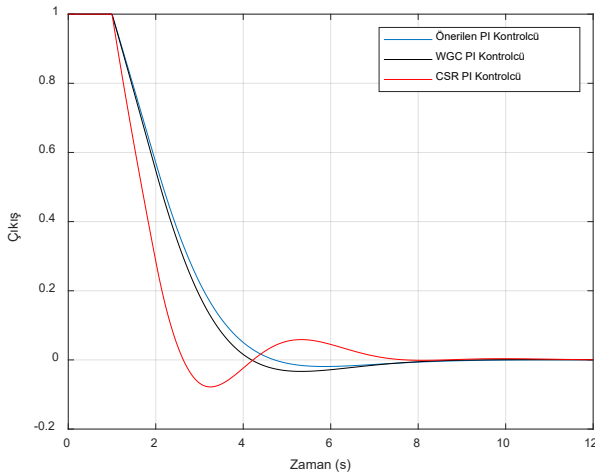
Önerilen arama algoritmasının verdiği en iyi PI kontrolcünün parametreleri $kp_{u2}=0.4217$ ve $ki_{u2}=0.4424$ 'dür. Elde edilen kontrolcünün referans izleme performansını karşılaştırmalı olarak elde edebilmek için referans giriş işareti (b) olarak birim basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen referans izleme performansı WGC ve CSR merkez kontrolcülerinin cevapları ile birlikte Şekil 9'da

verilmektedir. Buna göre önerilen kontrolcü 4.35 s'lik yerleşme performansı sunarken sadece %1.9'luk bir aşım yapmıştır. WGC ve CSR kontrolcülerinin yerleşme zamanı performansları ise sırasıyla 6.56 s ve 6.69 s'dir.



Şekil 9. Kontrolcülerin birim basamak giriş için referans izleme performansları.

Şekil 10'da kontrolcülerin bozucu reddi performansı sunulmaktadır. Bunun için bozucu girişine (d) adım zamanı sıfır olarak ayarlanmış adım fonksiyonu uygulanmıştır. Buna göre önerilen kontrolcü bozucu girişini 4.35 s'de %2'lik banda sokmayı başarmıştır. WGC ve CSR kontrolcülerinin bu performanstaki metrikleri ise sırasıyla 6.56 s ve 6.67 s'dir.



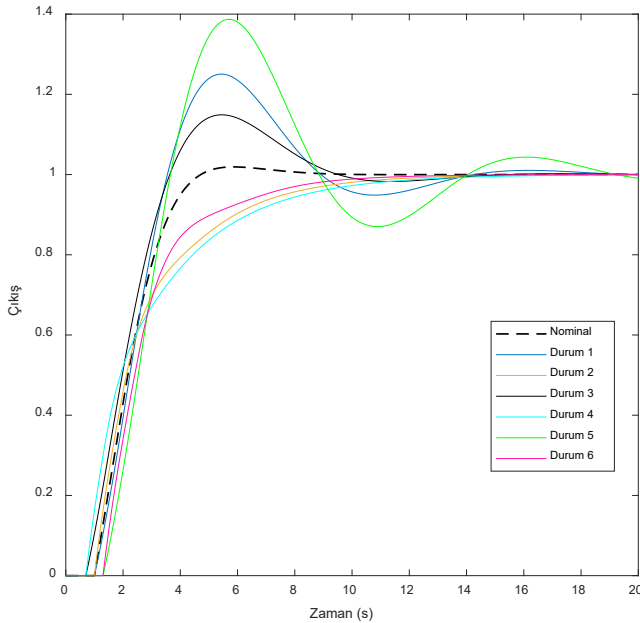
Şekil 10. Kontrolcülerin birim basamak giriş için bozucu reddi performansları.

3.1 Robustluk Testi

Kontrolcülerin robustluk performanslarını ortaya koymanın etkili bir yolu Kharitonov polinomları ile test etmektir (Sharma, Yadav ve Sharma, 2023). Bu çalışmada referans alınan sistemin %30 parametre belirsizliği için Kharitonov polinomları iki adettir. Bunlar $s+0.7$ ve $s+1.3$ polinomlarıdır. Ayrıca zaman gecikmesi değerinin de %30 belirsizlik durumu Kharitonov polinomlarına entegre edilirse toplamda altı adet transfer fonksiyonu elde edilir. Robustluk testinde kullanılacak bu belirsiz sistem transfer fonksiyonları etiketli biçimde Tablo 1'de verilmektedir. **Önerilen kontrolcünün %30 belirsizlik durumunu içeren 6 durum için referans izleme performansı Şekil 11'de verilmektedir.** Bu simülasyonda, referans giriş işareti (b) olarak 0'ıncı saniyede etkili olan birim basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Robustluk testi sonucunda PI kontrolcünün altı farklı durum için de kontrol etkisini yitirmediği görülmektedir. Burada en tehlikeli durumlar zaman gecikmesinin üst değerinde ortaya çıkmıştır.

Tablo 1. Robustluk testinde kullanılan sistem transfer fonksiyonları

Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6
$\frac{1}{1.3s + 0.7} e^{-s}$	$\frac{1}{0.7s + 1.3} e^{-s}$	$\frac{1}{1.3s + 0.7} e^{-0.7s}$	$\frac{1}{0.7s + 1.3} e^{-0.7s}$	$\frac{1}{1.3s + 0.7} e^{-1.3s}$	$\frac{1}{0.7s + 1.3} e^{-1.3s}$



Şekil 11. Robustluk testi referans izleme performansı

4. Sonuç

Bu çalışmada kararlı-zaman gecikmeli birinci mertebeden sistemlerin PI kontrolü için bir arama algoritması sunulmuştur. Arama algoritması konveks kararlılık bölgesinin merkezini referans almak suretiyle civarındaki uydu kontrolcülerini işlemektedir. Oldukça yalın bir arama tekniği olarak, önerilen algoritmik metod kontrol mühendisliğinde temel öneme sahip birinci mertebe sistemlerin kontrolünde güzel bir referans kontrolcü sunar. Literatürde güncel metodlarla birlikte yapılan karşılaştırmalı simülasyonlar önerilen tekniğin etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada ortaya koyulan PI kontrolcü arama algoritması iki konu başlığında gelecek çalışmalarda ileriye taşınabilir. Bunlardan birincisi, yapay zeka tabanlı istatistiksel değerlendirme ile kararlı kılınan kontrolcüler bölgesinin potansiyelinin belirlenmesinde benzer yapıda bir algoritmanın kullanılabilir olmasıdır. Diğeri ise önerilen arama algoritması; PD, PID ve PI-PD kontrolcü yapıları için farklı zaman gecikmeli sistemleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir olmasıdır.

Kaynakça

Aryan P., Raja G L. ve Vilanova R., (2023). Experimentally verified optimal bi-loop re-located IMC strategy for unstable and integrating systems with dead time, *Journal of Systems Science*, 54(7), 1531-549. <https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2180782>

Das D., Chakraborty S. ve Naskar A K., (2023). Controller design on a new 2DOF PID structure for different processes having integrating nature for both the step and ramp type of signals, *International Journal of Systems Science*, 54(7), 1423-1450. <https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2177903>

George T. ve Ganesan V., (2020). Optimal tuning of PID controller in time delay system: a review on various optimization techniques, *Chemical Product and Process Modeling* 17(1). <https://doi.org/10.1515/cppm-2020-2001>

Ghous I., Xiang Z. ve Karimi H R., (2015). State Feedback H_∞ Control For 2-D Switched Delay Systems with Actuator Saturation in the Second FM Model, *Circuits Syst Signal Process*, 34, 2167-2192 DOI <https://doi.org/10.1007/s00034-014-9960-9>

Irgan H., Menak R. ve Tan N., (2024). A comparative study on PI-PD controller design using stability region centroid methods for unstable, integrating and resonant systems with time delay, *Measurement and Control*, 2024, 1-21 <https://doi.org/10.1177/00202940241253114>

Sharma K., Yadav A. K., Sharma B. B., (2023), Kharitonov theorem-based robust control approach for sustainable microgrid against DoS cyber-attack, *Digital Chemical Engineering*, 7, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100099>

Onat C., Hamamci S E. ve Obuz S., (2012) A practical PI tuning approach for time delay systems. Boston, USA: IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120622-3-US-4021.00027>

Onat C., (2014). WGC based robust and gain scheduling PI controller design for condensing boilers *Adv. Mech. Eng.* 6 659051 <https://doi.org/10.1155/2014/659051>

Onat C., Daskin M., Turan A. ve Özgüven Ö., (2021). Manyetik levitasyon sistemleri için ağırlıklı geometrik merkez yöntemi ile PIPD kontrolcü tasarımı. *Mühendis ve Makina*, 62, 556-579.

Onat, C. (2013) A new concept on PI design for time delay systems: weighted geometrical center, *International Journal of Innovative Computing, information and control*, 9(4), 1539- 1556.

Ozyetkin, M., Onat, C. ve Tan, N. (2018) PID tuning method for integrating processes having time delay and inverse response, *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 274-279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.077>

Sain D. ve Mohan B M., (2021). Modeling, simulation and experimental realization of a new nonlinear fuzzy PID controller using Center of Gravity defuzzification, *ISA Transactions*, 110, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.048>

Vasičkaninová A., Bakošová M., Čírka L., Kalúz M. ve Oravec J., (2018). Robust controller design for a laboratory heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 128, 1297-1309. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.086>

Yang X. ve Gao H., (2014). Multiple model approach to linear parameter varying time-delay system identification with EM algorithm, *Journal of the Franklin Institute*, 351, 5565–5581. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.09.015>

Zheng M., Huang T. ve Zhang G., (2019). A New Design Method for PI-PD Control of Unstable Fractional-Order System with Time Delay, *Complexity*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3253497>