



Analytical approach on the design of fractional order proportional-integral controller for second order plus time delay models

Bilal Şenol^{1*}, Uğur Demiroğlu², Radek Matušů³

¹İnönü University, Faculty of Engineering, Computer Engineering Department, 44280, Malatya, Turkey

²Firat University, Technical Sciences Vocational High School, Department of Computer Technologies, 23119, Elazığ, Turkey

³Tomas Bata University in Zlin, Faculty of Applied Informatics, Centre for Security, Information and Advanced Technologies, 760 05, Zlin, Czech Republic

Highlights:

- Proposed method designs FOPI controller for SOPTD models.
- A new perspective on tuning frequency specifications is brought.
- Results showed the success of the proposed method.

Keywords:

- SOPTD plant
- FOPI controller
- analytical design
- frequency properties
- BODE's ideal loop

Article Info:

Research Article

Received: 14.02.2021

Accepted: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879929

Correspondence:

Author: Bilal Şenol

e-mail: bilal.senol@inonu.edu.tr

phone: +90 505 298 4717

Graphical Abstract

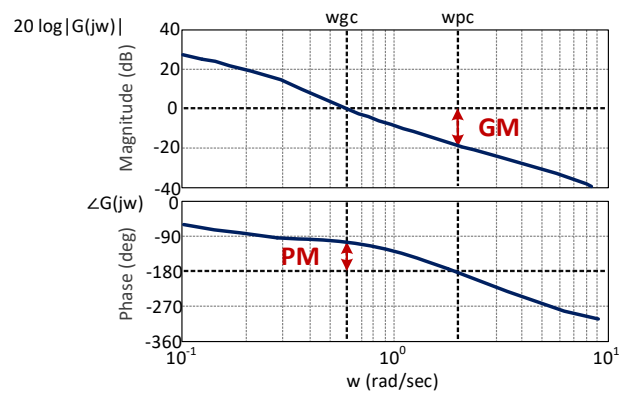


Figure A. Frequency properties explained on a Bode plot.

Purpose: This paper presents the design scheme to tune fractional order proportional-integral controller for models described by second order plus time delay transfer functions.

Theory and Methods:

Main purpose of the design is to tune the gain crossover frequency, the phase crossover frequency and the phase margin simultaneously towards researchers' desire. Tuning these frequency properties will let us control the output behavior of the system. Main contribution of the method comes from computation of the frequency specifications simultaneously and the flattening procedure of the phase curve. In spite of the similar existing studies, the phase curve is simply flattened by tuning the above mentioned frequency specifications. For example, we can flatten the phase curve by extending the distance between ω_{gc} and ω_{pc} reducing the PM in Figure A. In this way, the curve can be flattened without mathematical complexity.

Results:

The proposed method is applied on two different models selected from the literature. By the analytically derived equations, desired frequency specifications are successfully achieved. With the proper selection of these specifications, the phase curve is considerably flattened thus, the systems gained improved robustness against variations in the plant or controller gain.

Conclusion:

Simulation results showed that the proposed method successfully achieved desired design specifications and significantly improved the robustness of the system.



İkinci derece zaman gecikmeli modeller için kesir dereceli oransal-integral denetleyici tasarımında analitik yaklaşım

Bilal Şenol^{1*}, Uğur Demiroğlu², Radek Matuš³

¹Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

³Tomas Bata University in Zlin, Faculty of Applied Informatics, Centre for Security, Information and Advanced Technologies, 760 05, Zlin, Czech Republic

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Önerilen yöntem SOPTD modeller için FOPI denetleyici tasarlamaktadır
- Frekans özelliklerinin ayarlanması için yeni bir yaklaşım getirilmiştir
- Sonuçlar, önerilen yöntemin başarısını göstermiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.02.2021

Kabul: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879929

Anahtar Kelimeler:

SOPTD model,
FOPI denetleyici,
analitik tasarım,
frekans özellikleri,
BODE'nin ideal çevrimi

ÖZ

Bu yayın, ikinci derece zaman gecikmeli modellerin kararlılık ve dayanıklı performansı için kesir dereceli oransal-integral denetleyicinin adım adım tasarımına odaklanmaktadır. Analitik olarak elde edilmiş denklemler geliştirilmiştir ve söz konusu modeller için kullanılabilir. Yöntemin ana hedefi, Bode çizimindeki kazanç ve faz kesim frekansları arasında kalan faz eğrisini düzleştirmektir. Bu şekilde, kazanç değişimlerine karşı dayanıklılık sağlanacaktır. Bunun yanı sıra, tüm sistemin kararlılığı temin edilecektir. Tasarım aşamasında, literatürde var olan çalışmaların aksine sadece kazanç kesim frekansı değil, kazanç ve faz kesim frekanslarının her ikisi de ele alınmıştır. Ayrıca, faz düzleştirme işlemi faz türevinin sıfıra eşitlenmesi ile sağlanmamıştır. Bu yayın, probleme farklı bir bakış açısı getirmektedir. İki farklı denetleyici hesaplanmıştır. İlk denetleyici, istenen kazanç kesim frekansı ve faz payı özelliklerini sağlamaktadır. İkinci ise faz kesim frekansı ve kazanç payını temin etmektedir. Daha sonra bu denetleyiciler bağlanmıştır ve her iki durumu da sağlayan tek bir denetleyici elde edilmiştir. Önerilen denklemler, literatürden iki farklı model üzerine uygulanmış ve sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir.

Analytical approach on the design of fractional order proportional-integral controller for second order plus time delay models

H I G H L I G H T S

- Proposed method designs FOPI controller for SOPTD models.
- A new perspective on tuning frequency specifications is brought.
- Results showed the success of the proposed method

Article Info

Research Article

Received: 14.02.2021

Accepted: 09.05.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.879929

Keywords:

SOPTD plant,
FOPI controller,
analytical design,
frequency properties,
BODE's ideal loop

ABSTRACT

This paper focuses on step by step design of fractional order proportional-integral controller for the stability and robust performance of second order plus time delay plant. Analytically obtained equations are generalized and can be used for mentioned plants. Main aim of the method is to flatten the phase curve of the Bode plot between phase and gain crossover frequencies. Thus, robustness to gain variations is provided. Besides, stability of the whole system is ensured. In contrast to existing studies in the literature, not only the gain crossover frequency, both gain and phase crossover frequencies are considered in the design procedure. Also, the phase flattening is not achieved by equalizing the phase derivative to zero. The paper brings a different point of view to the problem. Two different controllers are calculated. The first one achieves desired gain crossover frequency and phase margin properties. Second one ensures the phase crossover frequency and the gain margin. Then, these controllers are connected and there obtained an only controller satisfying both conditions. Proposed equations are applied on two different models from the literature and the results are given graphically.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *bilal.senol@inonu.edu.tr, ugurdemiroglu@firat.edu.tr, rmatusu@utb.cz /

Tel: +90 505 298 4717

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, gerçek süreçlerin modellenmesi ve analizi için kesir dereceli hesaplamaların kullanılmasında yükselen bir eğilim görülmektedir. 17. YY'da, L'Hopital ve Leibniz arasındaki yazışma ile ortaya çıkan bu yeni fikir, günümüzde oldukça ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Kesir dereceli hesaplamaların klasik yöntemlere kıyasla bazı avantajlarını ortaya çıkaran çalışmaların yayınlanması da bu ilgiyi artırmıştır [1, 2]. Bir kesir dereceli sistem, üsleri keyfi seçilmiş reel sayılar olabildiği bir diferansiyel denklem ile modellenmektedir [3]. Kesir dereceli matematik yaklaşımı fizik [4], devre teorisi [5], mekatronik [6], sinyal işleme [7], kaos teorisi [8] vb. birçok alanda geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu yeni yaklaşım son zamanlarda kontrol teorisinde de kendini göstermiştir [9, 10].

Kontrol sistem tasarımında kararlılık ve dayanıklılık şüphesiz hedeflenen iki önemli özelliktir. Bu özellikleri sağlamak için de ana etken denetleyici tasarımıdır. Literatürde, kararlılık ve dayanıklılık konularında çok sayıda çalışma ve önerilmiş farklı denetleyici çeşitleri bulmak mümkündür [1, 11–13]. Oransal-integral-türev (PID) denetleyiciler yıllardır farklı sistemlerin denetlenmesinde kullanılmaktadır [14–16]. Bu denetleyici mantığı kesir dereceli matematik düşüncesiyle yeniden yorumlanmış ve kesir dereceli PID (FOPID) denetleyiciler ortaya çıkmıştır [1, 17]. Son zamanlarda, istenen kararlılık ve dayanıklılığı sağlamak için FOPID denetleyicilerin parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması oldukça ilgi çeken bir konu olmuştur ve bu konuda birçok çalışma yayınlanmıştır. Örneğin, bozucu etkiyi reddetme etkisi gösteren bir FOPID denetleyici tasarımı [18]'de yapılmıştır. FOPID denetleyici parametreleri, en iyi ağırlık seçimi ile ikinci dereceden doğrusal regülatör (LQR) kullanılarak [19]'da ayarlanmıştır. Çok değişkenli bir FOPID denetleyici tasarımı, doğrusal matris eşitsizlikleri (LMI) yaklaşımı ile [20]'de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kesir dereceli modeller için FOPID denetleyici tasarım algoritması [21]'de sunulmuştur. Konu ile ilgili daha pek çok çalışmaya atıf vermek mümkündür. PID denetleyicilerin bir çeşidi olan oransal-integral (PI) denetleyiciler de kesir dereceli matematik akımından etkilenmiş ve kesir dereceli PI (FOPI) olarak ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde FOPI denetleyiciler ile ilgilenen çok sayıda çalışma mevcuttur [22]. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) yöntemi ile FOPI denetleyici tasarımı [23]'te, PI ve FOPI denetleyiciler için karşılaştırmalı bir çalışma [24]'te ve zaman gecikmeli modeller için FOPI denetleyici tasarımı [25, 26]'da bulunabilir. Sözü edilen çalışmalar ve daha birçok çalışma ile FOPI denetleyiciler kendilerine önemli bir yer edinmişlerdir.

İkinci derece zaman gecikmeli (SOPTD) modeller literatürde gerçek süreçleri ifade etmek için geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Söz konusu modeller, termal [27], kimyasal [15, 28], elektronik [29] vb. süreçlerin yanı sıra birçok çalışmanın da ana konusu olmuştur. Örneğin, SOPTD modeller için farklı optimizasyon algoritmaları ile FOPID denetleyici tasarımı [30]'da, tekil asimetric röle geri besleme testi ile SOPTD model tasarımı [31]'de ve SOPTD modellerin frekans özellikleri tabanlı çalışmalar [32, 33]'te

bulunabilir. Bu yayında, SOPTD modellerin kararlılık ve dayanıklılığını sağlamak için FOPI denetleyici parametrelerinin ayarlanması hedeflenmiştir. Tasarım yöntemi, ideal bir sistemin davranışlarını frekans bölgesinde sağlamak üzerine inşa edilmiştir. Bilindiği gibi bir sistemin frekans bölgesi özelliklerinin sistem davranışı üzerinde etkileri olmaktadır. Sistemin frekans bölgesi analizi sistem transfer fonksiyonunda $s = j\omega$ değişikliği uygulanarak yapılabilir. Zaman bölgesi analizinin oldukça karmaşık işlemler içermesi ve özellikle kesir dereceli modeller için zorluklar göstermesi nedeniyle literatürde daha çok frekans bölgesi yaklaşımları gerçekleştirilmektedir. Bu yayında olduğu gibi frekans bölgesi özelliklerinin sağlanması için analitik hesaplamaların frekans bölgesinde yapılması daha uygun olacaktır. Önerilen yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, araştırmacının arzu ettiği kazanç kesim frekansı ve faz payı değerlerini sağlamak için bir FOPI denetleyici tasarlanmaktadır. İkinci aşamada yine araştırmacının isteği doğrultusunda faz kesim frekansı değerini sağlayan bir denetleyici hesaplanmaktadır. FOPI denetleyicide hesaplanması gereken üç parametre bulunmakta. İlk iki aşamada denetleyicinin oransal ve integral katsayılarını veren denklemler hesaplanmaktadır. Denklem sisteminin tamamlanması için iki denklemde de yer alan ortak bir parametre olan kesir derecesine ihtiyaç doğmuştur. Üç bilinmeyenli denklem sistemindeki son denklem, denetleyicinin kesir derecesini temsil etmektedir. Yaklaşımın son aşamasında yukarıda sayılan özellikleri aynı anda sağlamak için bu iki denetleyici ortak bir reel üs ile birleştirilmektedir. Dolayısıyla, istenen frekans özelliklerini sağlayan bir FOPI denetleyici ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, yayının ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Önceki paragrafta verilen frekans özellikleri, sistem davranışı hakkında ipucu verebilmekte ve sistem kararlılık ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Bu nedenle, frekans özelliklerinin istenen şekilde ayarlanması, üzerinde çalışılan ve önemli bir konu olmuştur. Literatürdeki birçok çalışmada sistem dayanıklılığının sağlanması için sistem fazının istenen şekilde ayarlanması üzerinde durulmuştur. Sistem faz eğrisinin düzleştirilmesi ile faz değerinin değişimi kontrol altına alınmakta ve sistemin kararsızlık sınırına geçmesi engellenebilmektedir. Bu işlem genellikle kazanç kesim frekansındaki faz değerinin türevinin sifıra eşitlenmesi ile elde edilmektedir [34–36]. Bu şekilde, faz eğrisi söz konusu frekans değerinde düzleşmekte ve kapalı çevrim sistem kazanç değişimlerine karşı dayanıklı hale gelmektedir. Ayrıca, sistemin birim basamak tepkisi iso-sönümlenme (iso-damping) özelliği göstermekte, yani sistemin DC kazancında olabilecek değişikliklere karşı dayanıklılığını korumaktadır [35, 36]. Iso-damping özelliği Bode grafiğindeki faz eğrisinin şekillendirilmesi ile sağlanmaktadır [37, 38]. Bu yayındaki amaç da benzer şekilde faz eğrisinin şekillendirilmesi ile sistem kararlılık ve dayanıklılığını sağlamaktır fakat yukarıda verilen çalışmalardan farklı bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntem daha önce birinci derece zaman gecikmeli (FOPTD) modeller için FOPI denetleyici tasarımında [26] ve SOPTD modeller için kesir dereceli oransal-türev (FOPD) denetleyici tasarımında [33] kullanılmıştır ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Literatürdeki benzer çalışmaların birçoğunda

denetleyici tasarımı, kazanç kesim frekansının istenen değerde tutulması amacıyla yapılmıştır. Bu yayındaki yenilik, sadece kazanç kesim frekansının değil, kazanç ve faz kesim frekanslarının ve faz payı değerlerinin istenen değerde olacak şekilde denetleyici tasarımı yapılmasıdır. Böylece, sistemin kararlılık ve dayanıklılığı daha etkili şekilde sağlanabilmektedir. Benzer çalışmaların aksine bu yayında, matematiksel olarak karmaşıklığa yol açan faz türevinin sifıra eşitlenmesi yaklaşımı kullanılmamıştır. Faz eğrisi, sadece yukarıda sayılan frekans özellikleri ayarlanarak düzleştirilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. İlk iki aşamada tasarlanan iki denetleyicinin birleştirilmesi için ortak bir reel üs değerine ihtiyaç olması, kesir dereceli bir denetleyici kullanılmasını gerektirmektedir. Bu ortak reel üs, FOPI denetleyicinin λ parametresidir. Bu yayında SOPTD modellerin kararlılık ve dayanıklılığını sağlamak için bir FOPI denetleyici tasarım şeması verilmiştir. Yöntem söz konusu modeller için analitik olarak türetilmiş ve genelleştirilmiş denklemleri vermektedir. Bilindiği üzere literatürde bu tip hesaplamalar için analitik yöntemlerin yanında sezgisel ve sezgisel olmayan optimizasyon algoritmaları da kullanılmaktadır. Analitik hesaplamalar matematik denklemlerden adım türetilerek yapılmakta, optimizasyon algoritmaları ise daha çok deneme yanılma yöntemleri ile çalışmaktadır [39, 40]. Deneme yanılma yöntemlerinde doğru sonucu bulmak nispeten daha fazla zaman almakta ve her zaman aynı sonuç elde edilememektedir. Analitik hesaplamalarla türetilen denklemler yardımıyla her zaman aynı sonuç elde edilmektedir ve süreç daha az zaman almaktadır. Bu da analitik yaklaşımın güvenilirliğini artırmaktadır. Önerilen yöntemin etkisi literatürden seçilmiş iki örnek model üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar anlaşılır şekilde grafiksel olarak verilmiştir. Yayının ilerleyen bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde SOPTD model ve FOPI denetleyici gösterimleri verilmiştir. Yayının ana motivasyonu ve frekans özellikleri bu bölümde yer almaktadır. Üçüncü bölümde önerilen tasarım yöntemi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde uygulama örnekleri verilmiştir ve son bölümde sonuçlar ve tartışmalar belirtilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER (THEORETICAL BACKGROUND)

FOPI denetleyicinin analitik tasarımı frekans bölgesi yaklaşımına dayanmaktadır. Bu nedenle bazı ön bilgiler vermekte yarar vardır. Aşağıda verilen gösterim ve tanımlamalar yayının ilerleyen bölümlerinde de kullanılacaktır. Bir SOPTD model Eş. 1’de verildiği gibi gösterilebilir.

$$P(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-Ls} \quad (1)$$

Benzer şekilde, FOPI denetleyicinin genel gösterimi Eş. 2’deki gibidir.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} = k_p + k_i s^{-\lambda}, \quad \lambda \in (0-2). \quad (2)$$

Denetleyicinin uygun reel üs değerinin $\lambda \in (0-2)$ aralığında olduğu önceki çalışmalarda gösterilmiştir [35]. Eş. 1 ve Eş. 2’de verilen model ve denetleyiciden oluşan sistem Eş. 3’te gösterildiği şekilde elde edilmiş olur.

$$G(s) = C(s)P(s) \quad (3)$$

Sistemin frekans bölgesi cevabı, yukarıdaki denklemlerde $s = j\omega$ değişikliği uygulanarak elde edilebilir. Bu şekilde, model ve denetleyicinin frekans cevabı Eş. 4 ve Eş. 5’teki gibi hesaplanır.

$$P(j\omega) = \frac{K}{(T_1(j\omega)+1)(T_2(j\omega)+1)} e^{-L(j\omega)} \quad (4)$$

$$C(j\omega) = k_p + \frac{k_i}{(j\omega)^\lambda} = k_p + k_i (j\omega)^{-\lambda}, \quad \lambda \in (0-2) \quad (5)$$

$P(j\omega)$ ve $C(j\omega)$ kullanılarak sistemin frekans cevabı ise Eş. 6 ile elde edilir.

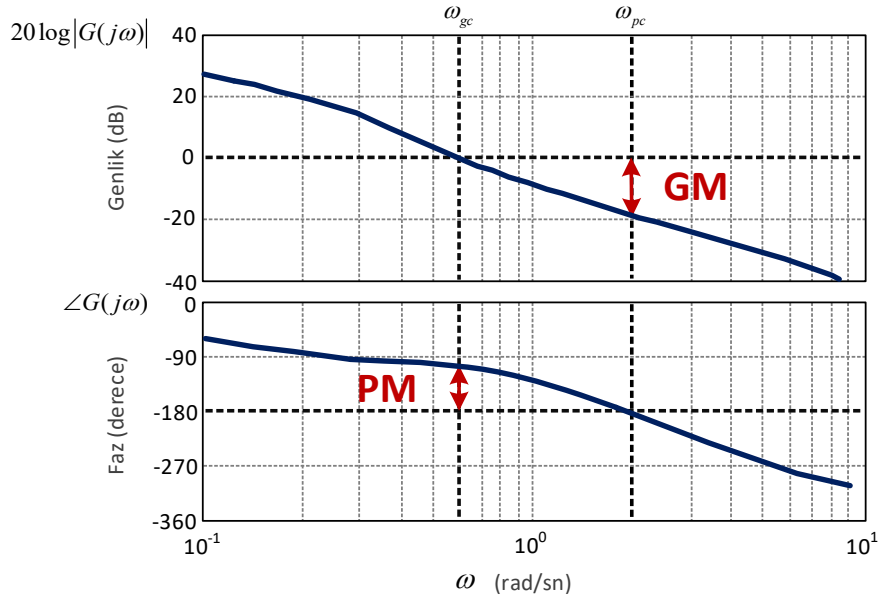
$$G(j\omega) = C(j\omega)P(j\omega) \quad (6)$$

e sabitinin kompleks üssü ve j operatörünün reel üssü Eş. 7 ve Eş. 8 yardımıyla hesaplanabilir.

$$e^{jL\omega} = \cos(L\omega) + j \sin(L\omega) \quad (7)$$

$$j^\lambda = \cos(\pi\lambda/2) + j \sin(\pi\lambda/2) \quad (8)$$

Bu yayında sunulan tasarım yöntemini daha iyi anlamak için genel bir Bode diyagramının özelliklerinin hatırlatılmasında yarar olacaktır. Şekil 1’de örnek bir Bode diyagramı verilmiştir. Şekil 1’de, kazanç ve faz kesim frekans değerleri sırasıyla ω_{gc} ve ω_{pc} olarak gösterilmiştir. Benzer olarak, faz ve kazanç payı değerleri de PM ve GM olarak işaretlenmiştir. Amaç, şekilde ω_{gc} frekansından sonraki faz eğrisini düzeltmektir. Bu şekilde sistemin kazanç değişimlerine karşı dayanıklılığı artırılmış olacaktır. Daha önce de belirtildiği gibi benzer çalışmalarda faz düzeltirme işlemi, istenen frekans değerinde sistem fazının türevinin sifıra eşitlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu frekans değeri “teğet frekansı” (tangent frequency) olarak adlandırılmakta ve genellikle kazanç kesim frekansı olarak seçilmektedir. Bu yayında sunulan yöntemdeki farklı bakış açısı ile türevlemenin getirdiği matematiksel karmaşıklık önemli ölçüde azalmıştır. Yöntem, Şekil 1’deki grafik üzerinden açıklanabilir. Faz eğrisi, ω_{gc} , ω_{pc} ve PM değerlerinin uygun şekilde ayarlanması ile düzleştirilebilir. Örnek olarak, ω_{gc} ve ω_{pc} arasındaki mesafe artırılır ve PM değeri azaltılırsa faz eğrisi nispeten düzleştirilebilir. Bu şekilde herhangi bir matematiksel işlem kullanılmadan eğrinin şekillendirilmesi mümkün olabilmekte ve sistem dayanıklılığının kazanç değişimlerine karşı toleransı ayarlanabilmektedir. Sonraki bölümde önerilen tasarım yöntemi sunulmuştur.



Şekil 1. Örnek bir Bode diyagramı (A typical Bode diagram)

3. FOPI DENETLEYİCİ TASARIMI (FOPI CONTROLLER DESIGN)

Bu bölümde FOPI denetleyicinin tasarım adımları verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalara geçmeden önce model ve denetleyici transfer fonksiyonlarının genlik ve faz hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Eş. 7’de verilen trigonometrik eşitlik yardımıyla SOPTD modelin frekans bölgesi cevabı Eş. 9’da gösterildiği gibi genişletilebilir.

$$\begin{aligned}
 P(j\omega) &= \frac{K}{(T_1(j\omega)+1)(T_2(j\omega)+1)} e^{-L(j\omega)} \\
 &= \frac{K}{(1+jT_1\omega)(1+jT_2\omega)} e^{-jL\omega} \\
 &= \left[\frac{K - KT_1T_2\omega^2}{(1+T_1^2\omega^2)(1+T_2^2\omega^2)} + j \left(\frac{K(T_1+T_2)\omega}{(1+T_1^2\omega^2)(1+T_2^2\omega^2)} \right) \right] e^{-jL\omega} \quad (9) \\
 &= |P(j\omega)| e^{j\angle P(j\omega)} \\
 &= \sqrt{\frac{K^2}{(1+T_1^2\omega^2)(1+T_2^2\omega^2)}} e^{-j(\arctan\left(\frac{K(T_1+T_2)\omega}{K-KT_1T_2\omega^2}\right) + L\omega)}
 \end{aligned}$$

Böylece, modelin genlik ve faz değerleri,

$$|P(j\omega)| = \sqrt{\frac{K^2}{(1+T_1^2\omega^2)(1+T_2^2\omega^2)}} \quad (10)$$

$$\angle P(j\omega) = -\arctan\left(\frac{K(T_1+T_2)\omega}{K-KT_1T_2\omega^2}\right) - L\omega \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Benzer şekilde, Eş. 8’de verilen kompleks operatörün reel üs eşitliği yardımıyla FOPI denetleyicinin frekans bölgesi cevabı Eş. 12’de verildiği şekilde genişletilebilir.

$$\begin{aligned}
 C(j\omega) &= k_p + \frac{k_i}{(j\omega)^\lambda} = k_p + k_i\omega^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2) \\
 &\quad -jk_i\omega^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2) \quad (12)
 \end{aligned}$$

FOPI denetleyicinin genlik ve faz değerleri de Eş. 13 ve Eş. 14 şeklinde elde edilmiştir.

$$|C(j\omega)| = \sqrt{(k_p + k_i\omega^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2))^2 + (-k_i\omega^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2))^2} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 \angle C(j\omega) &= \arctan\left(\frac{-k_i\omega^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2)}{k_p + k_i\omega^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2)}\right) \\
 &= -\arctan\left(\frac{k_i\omega^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2)}{k_p + k_i\omega^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2)}\right) \quad (14)
 \end{aligned}$$

Model ve denetleyiciden oluşan sistemin genlik ve faz değerleri ise Eş.15 ve Eş. 16 yardımıyla hesaplanabilir.

$$|G(j\omega)| = |C(j\omega)P(j\omega)| = |C(j\omega)||P(j\omega)| \quad (15)$$

$$\angle G(j\omega) = \angle C(j\omega)P(j\omega) = \angle C(j\omega) + \angle P(j\omega) \quad (16)$$

Yukarıda verilen bilgilerin ardından denetleyici tasarım aşamasına geçilebilir. Kazanç kesim frekansının ω_{gc} , faz payının PM, faz kesim frekansının ω_{pc} ve kazanç payının GM olduğu varsayılınsın.

3.1. İlk Denetleyici (First Controller)

Tasarlanan ilk denetleyicinin aşağıda verilen frekans özelliklerini sağlaması istenmektedir. Kazanç kesim frekansında sistem kazancının Eş. 17'deki gibi olması beklenmektedir.

$$|G(j\omega_{gc})| = 1. \quad (17)$$

Kazanç kesim frekansında sistem fazının ise Eş. 18'deki şartı sağlaması istenmektedir.

$$\angle G(j\omega_{gc}) = PM - \pi. \quad (18)$$

Eş. 15'te $\omega = \omega_{gc}$ değişikliği yapılarak ve Eş. 17 uygulanarak Eş. 19 elde edilmiş olur.

$$|G(j\omega_{gc})| = |C(j\omega_{gc})||P(j\omega_{gc})| = 1$$

$$= \sqrt{(k_p + k_i\omega_{gc}^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2))^2 + (-k_i\omega_{gc}^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2))^2} \cdot (19)$$

$$\times \sqrt{\frac{K^2}{(1+T_1^2\omega_{gc}^2)(1+T_2^2\omega_{gc}^2)}}$$

Benzer şekilde, Eş. 18 ele alınarak sistemin fazı Eş. 20'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\angle G(j\omega_{gc}) = \angle C(j\omega_{gc}) + \angle P(j\omega_{gc}) = PM - \pi$$

$$= -\arctan\left(\frac{k_i\omega_{gc}^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2)}{k_p + k_i\omega_{gc}^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2)}\right) \quad (20)$$

$$- \arctan\left(\frac{K(T_1 + T_2)\omega_{gc}}{K - KT_1T_2\omega_{gc}^2}\right) - L\omega_{gc}$$

Eş. 19 ve Eş. 20'nin beraber çözümü ile ilk FOPI denetleyicinin parametreleri Eş. 21 ve Eş. 22'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$k_p = \pm \frac{\sqrt{1+T_1^2\omega_{gc}^2}\sqrt{1+T_2^2\omega_{gc}^2}}{K\sqrt{1+\tan(\varphi_1)^2}} \quad (21)$$

$$\pm \frac{\sqrt{1+T_1^2\omega_{gc}^2}\sqrt{1+T_2^2\omega_{gc}^2} \cot(\pi\lambda/2) \tan(\varphi_1)}{K\sqrt{1+\tan(\varphi_1)^2}}$$

$$k_i = \mp \frac{\omega_{gc}^\lambda \sqrt{1+T_1^2\omega_{gc}^2}\sqrt{1+T_2^2\omega_{gc}^2} \csc(\pi\lambda/2) \tan(\varphi_1)}{K\sqrt{1+\tan(\varphi_1)^2}}. \quad (22)$$

Eş. 21 ve Eş. 22'de,

$$\varphi_1 = PM - \pi + \arctan\left(\frac{K(T_1 + T_2)\omega_{gc}}{K - KT_1T_2\omega_{gc}^2}\right) + L\omega_{gc} \quad (23)$$

olarak hesaplanmıştır.

3.2. İkinci Denetleyici (Second Controller)

Tasarlanan ikinci denetleyicinin aşağıda verilen frekans özelliklerini sağlaması istenmektedir.

Faz kesim frekansında sistem kazancının Eş. 24'ü sağlaması istenmektedir.

$$|G(j\omega_{pc})| = 10^{GM/20} \quad (24)$$

Ayrıca, faz kesim frekansında sistem fazının ise Eş. 25'te verildiği gibi olması istenmektedir,

$$\angle G(j\omega_{pc}) = -\pi. \quad (25)$$

Eş. 15'te $\omega = \omega_{pc}$ değişikliği yapılarak ve Eş. 24 uygulanarak Eş. 26 elde edilmiş olur.

$$|G(j\omega_{pc})| = |C(j\omega_{pc})||P(j\omega_{pc})| = 10^{GM/20}$$

$$= \sqrt{(k_p + k_i\omega_{pc}^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2))^2 + (-k_i\omega_{pc}^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2))^2} \cdot (26)$$

$$\times \sqrt{\frac{K^2}{(1+T_1^2\omega_{pc}^2)(1+T_2^2\omega_{pc}^2)}}$$

Benzer şekilde, Eş. 25 ele alınarak sistemin fazı Eş. 27'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\angle G(j\omega_{pc}) = \angle C(j\omega_{pc}) + \angle P(j\omega_{pc}) = -\pi$$

$$= -\arctan\left(\frac{k_i\omega_{pc}^{-\lambda} \sin(\pi\lambda/2)}{k_p + k_i\omega_{pc}^{-\lambda} \cos(\pi\lambda/2)}\right) \quad (27)$$

$$- \arctan\left(\frac{K(T_1 + T_2)\omega_{pc}}{K - KT_1T_2\omega_{pc}^2}\right) - L\omega_{pc}$$

Eş. 26 ve Eş. 27'nin beraber çözümü ile ikinci FOPI denetleyicinin parametreleri elde edilmiş olur.

$$k_p = \pm \frac{10^{GM/20} \sqrt{1+T_1^2\omega_{pc}^2}\sqrt{1+T_2^2\omega_{pc}^2}}{K\sqrt{1+\tan(\varphi_2)^2}} \quad (28)$$

$$\pm \frac{10^{GM/20} \sqrt{1+T_1^2\omega_{pc}^2}\sqrt{1+T_2^2\omega_{pc}^2} \cot(\pi\lambda/2) \tan(\varphi_2)}{K\sqrt{1+\tan(\varphi_2)^2}}$$

$$k_i = \mp \frac{10^{GM/20} \omega_{pc}^\lambda \sqrt{1+T_1^2 \omega_{pc}^2} \sqrt{1+T_2^2 \omega_{pc}^2} \csc(\pi\lambda/2) \tan(\varphi_2)}{K \sqrt{1+\tan(\varphi_2)^2}}. \quad (29)$$

Eş. 29 ve Eş. 30'da,

$$\varphi_2 = -\pi + \arctan\left(\frac{K(T_1+T_2)\omega_{pc}}{K-KT_1T_2\omega_{pc}^2}\right) + L\omega_{pc} \quad (30)$$

olarak hesaplanmıştır. Böylece farklı frekans özelliklerini sağlayan iki denklem hesaplanmış oldu. FOPI denetleyici denklemlerinden görüldüğü gibi her iki denetleyici de ortak bir λ değerine bağlıdır. Bu ortak değişkenin bulunması ile iki denetleyici birleştirilebilir.

3.3. Birleştirilmiş Denetleyici (Combined Controller)

Eş. 21 ve Eş. 28'i aynı anda sağlayan ortak λ değerinin bulunması için her iki eşitlikteki k_p parametresinin $\lambda \in (0-2)$ aralığında sayısal çözümünün yapılması gerekmektedir. Bunu yapmak için denklemler birbirine eşitlenir ve değişen λ değerine göre $10^{GM/20}$ eğrisi çizdirilir. Benzer şekilde Eş. 22 ve Eş. 29 birbirine eşitlenerek, $\lambda \in (0-2)$ aralığında $10^{GM/20}$ eğrisinin çizimi ile k_i parametresinin sayısal çözümü yapılabilir. Elde edilen iki eğrinin kesişim noktası ortak reel üs değerini vermektedir. Daha sonra bu λ değeri eşitliklerde yerine koyularak birleştirilmiş denetleyici elde edilmektedir. Sonraki bölümde verilen uygulama örnekleri ile bu süreç daha iyi anlaşılabilir.

4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ (APPLICATION EXAMPLES)

Bu bölümde, FOPI deyetleyici tasarım süreci iki örnek üzerinde uygulanmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

4.1. Örnek 1 (Example 1)

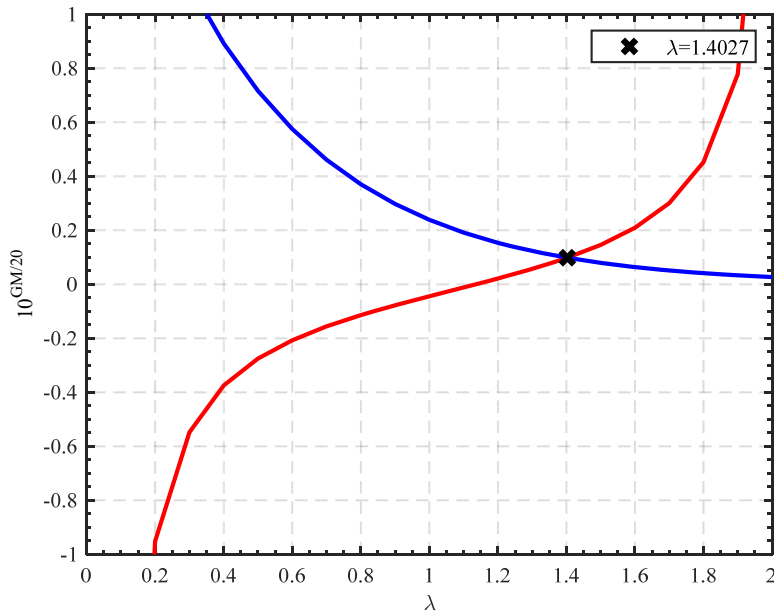
Eş. 31'de verilen SOPTD transfer fonksiyonunu ele alalım [41].

$$P_1(s) = \frac{0,35}{(0,67s+1)(5s+1)} e^{-1,28s} \quad (31)$$

Bu model için tasarlanan FOPI denetleyicinin frekans özelliklerini $\omega_{gc} = 0,1 \text{ rad/sn}$, $\omega_{pc} = 0,9 \text{ rad/sn}$ ve

$PM = 40^\circ$ olarak ayarlaması istenmektedir. Bu değerler seçilirken faz eğrisinin mümkün olduğu kadar düz olabileceği kesim frekansı değerleri ve sistem kararlılığının sağlanabileceği faz payı değeri sezgisel olarak tercih edilmiştir. Ayrıca benzer çalışmalarda tercih edilen değerler de göz önüne alınmıştır. Verilen frekans özelliklerine göre bölüm 3.1 ve bölüm 3.2'de açıklanan iki denetleyici hesaplanmıştır. Daha sonra bölüm 3.3'te verildiği gibi iki denetleyici birleştirilmek üzere FOPI denetleyicinin reel üs değeri λ hesaplanmıştır. Şekil 2'de, her iki denetleyici için $\lambda \in (0-2)$ aralığında çizilen $10^{GM/20}$ eğrileri verilmiştir.

Şekil 2'de kırmızı ile gösterilen eğri, Eş. 21 ve Eş. 28'in eşitlenmesi ile çizilen ilk denetleyiciye ait $10^{GM/20}$ eğrisidir.



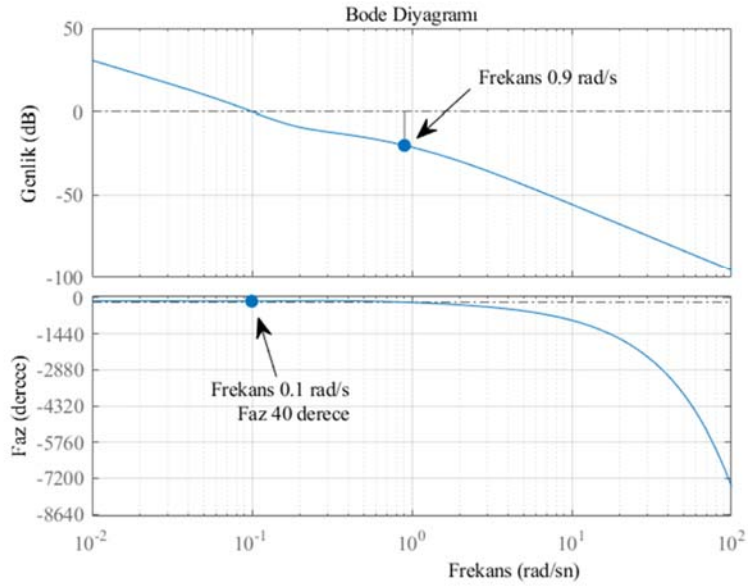
Şekil 2. Her iki denetleyici için $\lambda \in (0-2)$ aralığında $10^{GM/20}$ eğrileri ($10^{GM/20}$ curves at $\lambda \in (0-2)$ for both controllers)

Mavi renk ile gösterilen eğri ise Eş. 22 ve Eş. 29'un eşitlenmesi ile çizilen ikinci denetleyiciye ait $10^{GM/20}$ eğrisidir. Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi bu iki eğrinin kesişim noktası her iki denetleyiciyi de sağlayan ortak λ değeridir. Şekil 2'de görüldüğü gibi eğriler $\lambda = 1,40275$ değerinde kesişmektedir. Böylece, Eş. 32'de verilen FOPI denetleyici elde edilmiş olur.

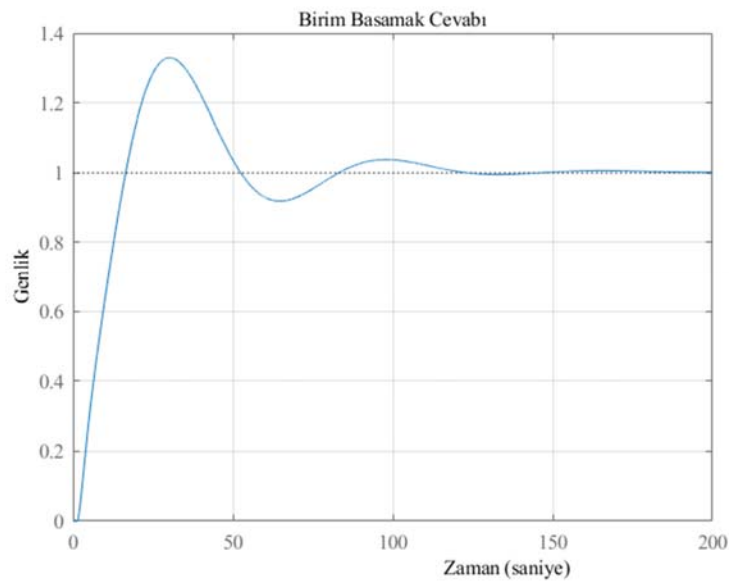
$$C_1(s) = 1,61337 + \frac{0,153458}{s^{1,40275}} \quad (32)$$

Denetleyicinin hesaplanmasından sonra $G_1(s) = C_1(s)P_1(s)$ sisteminin Bode diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.

Bode diyagramından görüldüğü gibi istenen frekans özellikleri başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Ayrıca sistemin faz eğrisi de gözle görülür şekilde düzeltilmiştir. Bu şekilde sistem, kazanç değişimlerine karşı dayanıklılık sağlamıştır. Sistem kararlılığını göstermek için birim basamak tepkisi Şekil 4'te verilmiştir. Bilindiği gibi sistemler üzerinde bazı bozucu etkiler olabilmektedir. Bu tip



Şekil 3. $G_1(s) = C_1(s)P_1(s)$ sistemine ait Bode diyagramı (Bode diagram of the system $G_1(s) = C_1(s)P_1(s)$)



Şekil 4. $G_1(s) = C_1(s)P_1(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi (Step response of the system $G_1(s) = C_1(s)P_1(s)$)

durumlarda sistemin kararlılığını koruması beklenmektedir. Sistem üzerinde kazancın %10'u kadar bir bozucu etki olduğunu varsayalım. Varsayım, [35]'teki örnekle aynı olması için %10 olarak seçilmiştir. Bu durumda elde edilen birim basamak tepkisi Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5'te açıkça görüldüğü üzere kazancın %10'u kadar bir bozucu etki olduğunda sistem kararlılığı devam etmektedir. Elde edilen sonuçları literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmak faydalı olacaktır. FOPI denetleyici tasarımı benzer bir yöntem ile birinci derece zaman gecikmeli (FOPTD) modeller için [34]'te gerçekleştirilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi söz konusu çalışmada faz düzleştirme işlemi kazanç kesim frekansında sistem fazının türevinin sifıra eşitlenmesi ile sağlanmıştır. Ayrıca yayında sunulan yöntem ile sadece kazanç kesim frekansı ve faz payının istenilen şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlara baktığımızda hedeflenen kazanç kesim frekansına yaklaşıldığı ve faz payının istenildiği gibi elde edildiği görülmektedir fakat faz kesim frekansı ile ilgili herhangi bir hedef bulunmamaktadır. Bu da bu makalede sunduğumuz yöntemin bir avantajını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde [35]'teki sonuçlar da incelenebilir. Kazanç kesim değerleri aynı tutularak faz payı değerinin değiştirilmesi ile elde edilen farklı sistemlerin karşılaştırılması faydalı olacaktır. Tablo 1'de faz payının $PM \in [10^\circ - 90^\circ]$ aralığında 10° 'lik artışlarla değiştirilmesi ile elde edilen FOPI denetleyici parametreleri listelenmiştir.

Tablo 1'de değişen PM değerlerine karşı hesaplanan 9 adet FOPI denetleyicinin parametreleri verilmiştir. Elde edilen tüm sistemlerin frekans özelliklerini karşılaştırmak amacıyla Bode diyagramları çizdirilebilir. Bu sistemlerin Bode diyagramları Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 1. Değişen PM değerlerine göre elde edilen k_p , k_i , λ ve GM değerleri

(k_p , k_i , λ and GM values for variations of PM)

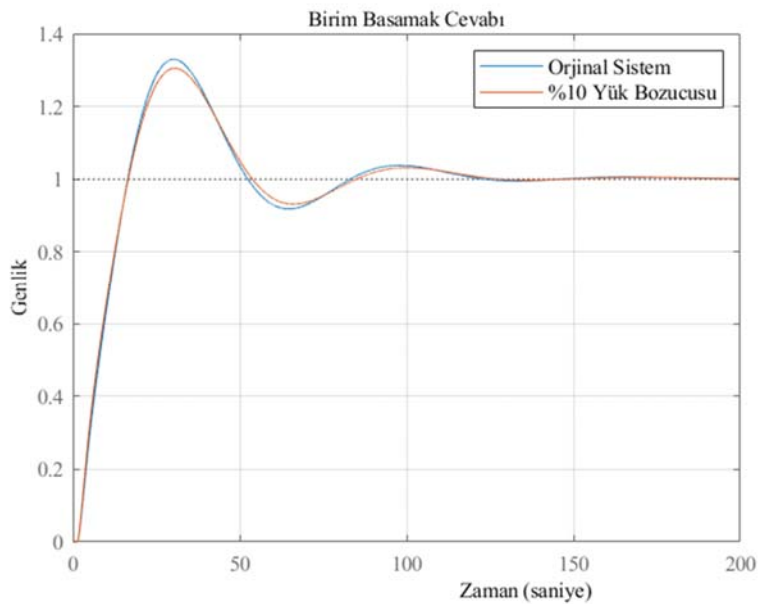
| PM | k_p | k_i | λ | GM |
|------------|----------|----------|-----------|----------|
| 10° | 0,873142 | 0,101754 | 1,57718 | -25,8745 |
| 20° | 1,12286 | 0,119861 | 1,51436 | -23,5175 |
| 30° | 1,37339 | 0,137346 | 1,45691 | -21,6371 |
| 40° | 1,61337 | 0,153458 | 1,40275 | -20,1309 |
| 50° | 1,83303 | 0,167613 | 1,34991 | -18,9286 |
| 60° | 2,02445 | 0,179428 | 1,29637 | -17,9793 |
| 70° | 2,18178 | 0,188768 | 1,23988 | -17,2447 |
| 80° | 2,30153 | 0,195835 | 1,1776 | -16,6932 |
| 90° | 2,3828 | 0,201348 | 1,10552 | -16,2954 |

Görüldüğü üzere, değişen PM değerlerine karşı kazanç kesim ve faz kesim frekans değerleri değişmemiştir. Sistem istenen frekans özelliklerini tüm değerler için sağlamıştır. Benzer şekilde, tüm sistemlerin birim basamak tepkileri de Şekil 7'de gösterilmiştir.

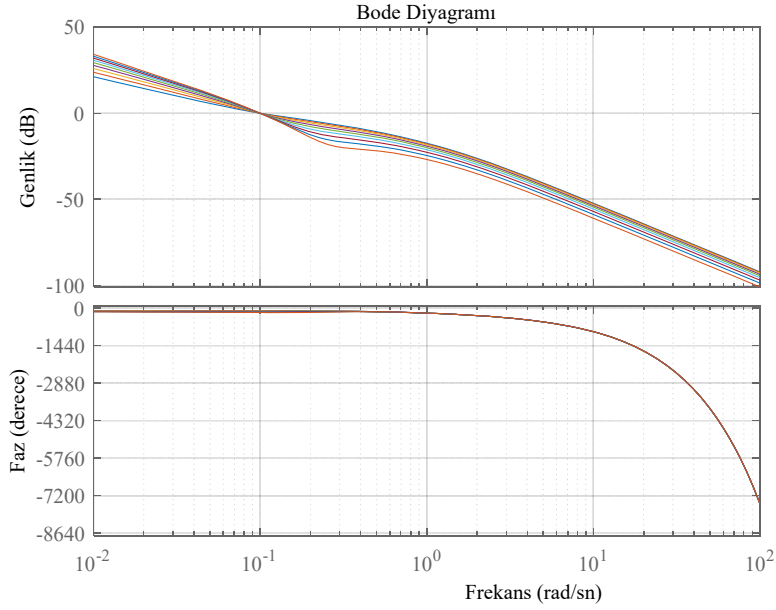
Elde ettiğimiz sonuçlara göre, önerilen yöntem ile tasarlanan FOPI denetleyici, bu örnekte verilen SOPTD model için başarılı şekilde uygulanmıştır. İstenen frekans özellikleri sağlanmış ve sistem dayanıklılığı etkili şekilde artırılmıştır. Yöntemi bir başka model üzerinde uygulamada yarar olacaktır.

4.2. Örnek 2 (Example 2)

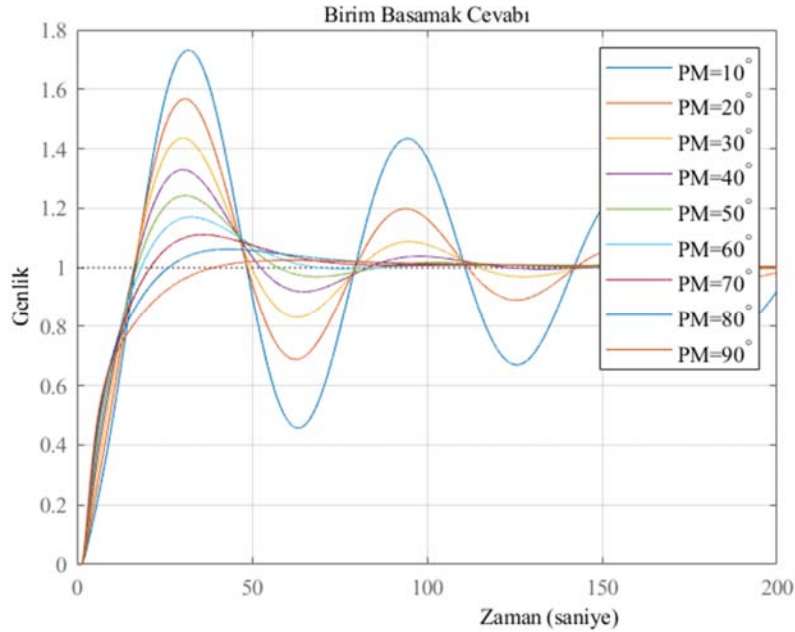
Eş. 33'te verilen SOPTD modeli ele alalım [42].



Şekil 5. Sistem üzerindeki bozucu etkiye karşı birim basamak tepkisi (Step response against the disturbance on the system)



Şekil 6. Tablo 1’de verilen sistemlere ait Bode diyagramları (Bode diagrams of the systems given in Table 1)



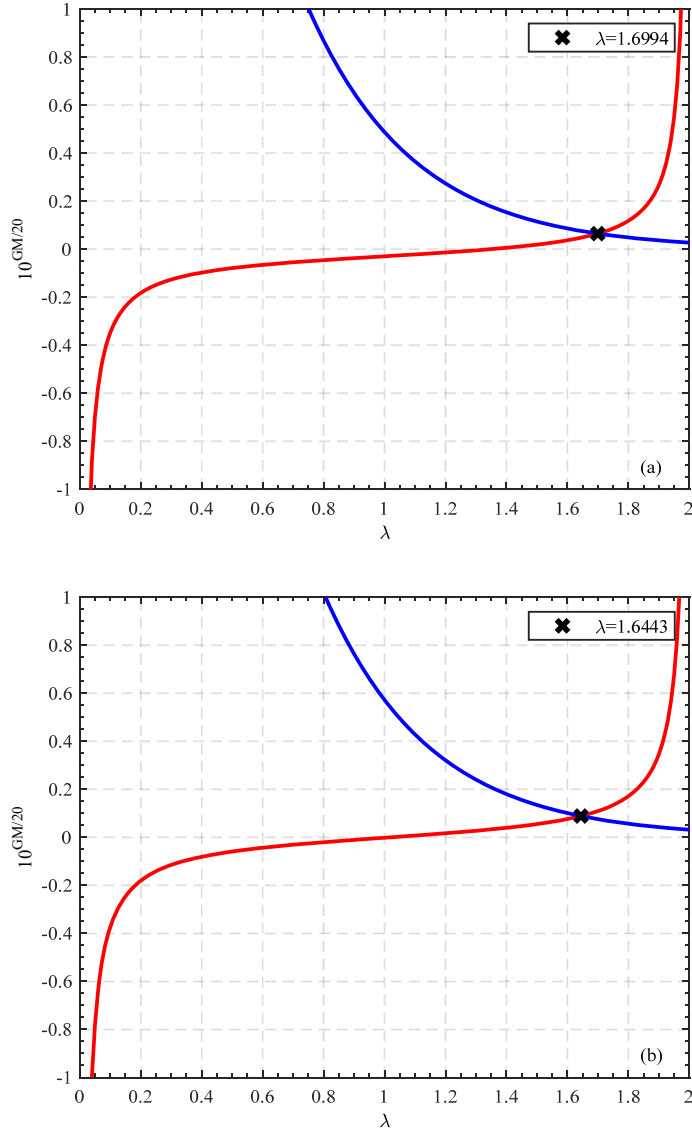
Şekil 7. Tablo 1’de verilen sistemlere ait birim basamak tepkileri (Step responses of the systems given in Table 1)

$$P_2(s) = \frac{5,3871}{(1,8064s + 1)(2,98215s + 1)} e^{-0,265s} \quad (33)$$

Bu örnek için seçilen kazanç ve faz kesim frekansları $\omega_{gc} = 0,1 \text{ rad/sn}$ ve $\omega_{pc} = 1,8 \text{ rad/sn}$ olsun. Faz payı ise önceki örnekte olduğu gibi $PM \in [10^\circ - 90^\circ]$ aralığında 10° ’lik artışlarla değişsin. Değişen PM değerlerine göre elde edilen denetleyici parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablodan rastgele seçilen iki değer üzerinden grafikleri

çizdirelim. $PM = 30^\circ$ ve $PM = 60^\circ$ değerleri için $10^{GM/20}$ eğrilerinin $\lambda \in (0-2)$ aralığında çizimleri sırasıyla Şekil 8a ve Şekil 8b’de verilmiştir.

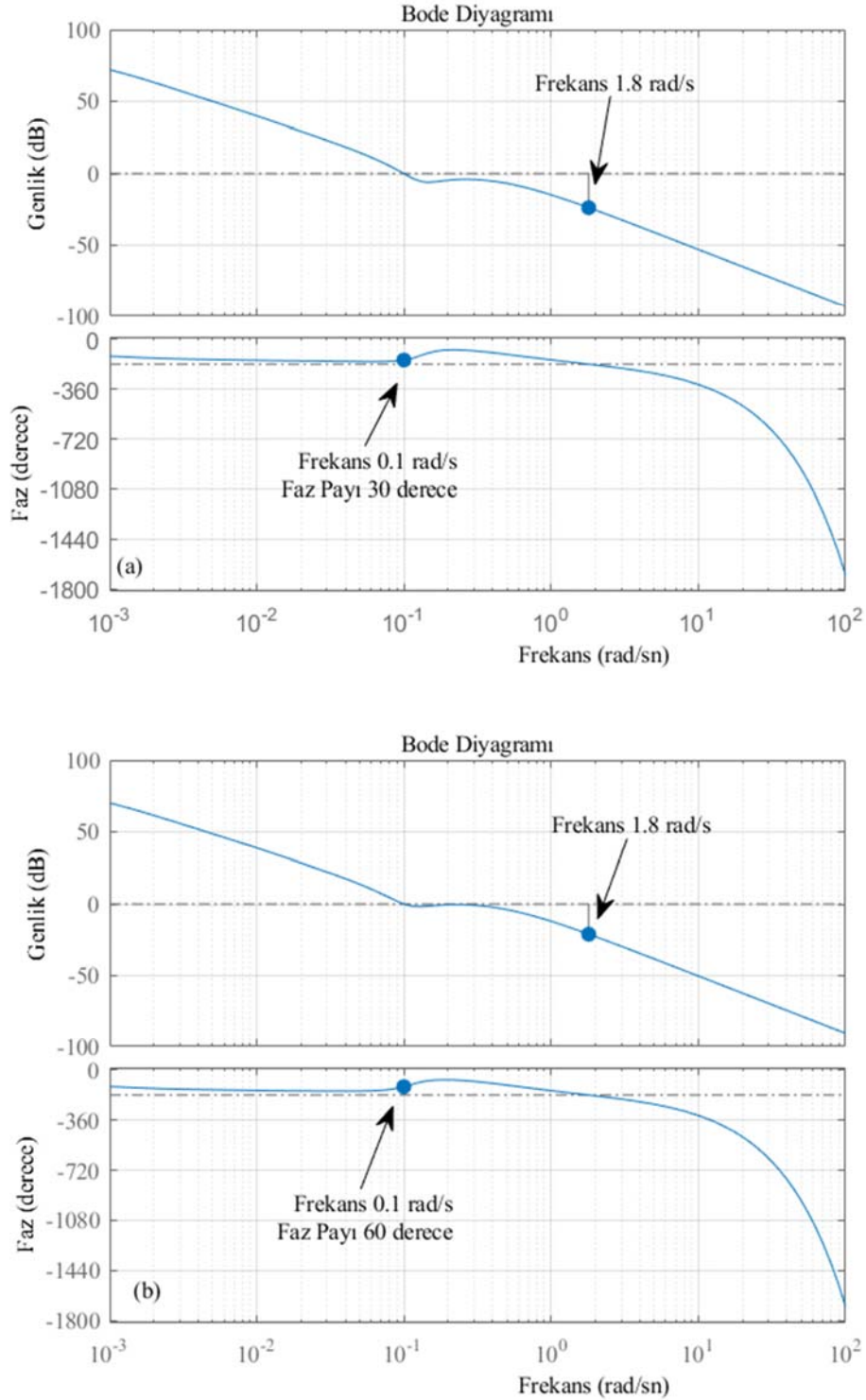
Şekil 8’de görüldüğü ve Tablo 2’de verildiği gibi $PM = 30^\circ$ ve $PM = 60^\circ$ için ortak üs değerleri sırasıyla $\lambda_{PM=30^\circ} = 1,6994$ ve $\lambda_{PM=60^\circ} = 1,6443$ olarak bulunmuştur. Seçilen iki PM değerinde elde edilen sistemlerin Bode diyagramları Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. $PM = 30^\circ$ (a) ve $PM = 60^\circ$ (b) değerleri için $\lambda \in (0-2)$ aralığında $10^{GM/20}$ eğrileri
 ($10^{GM/20}$ curves at $\lambda \in (0-2)$ for $PM = 30^\circ$ (a) and $PM = 60^\circ$ (b))

Tablo 2. Değişen PM değerlerine göre elde edilen k_p , k_i , λ ve GM değerleri
 (k_p , k_i , λ and GM values for variations of PM)

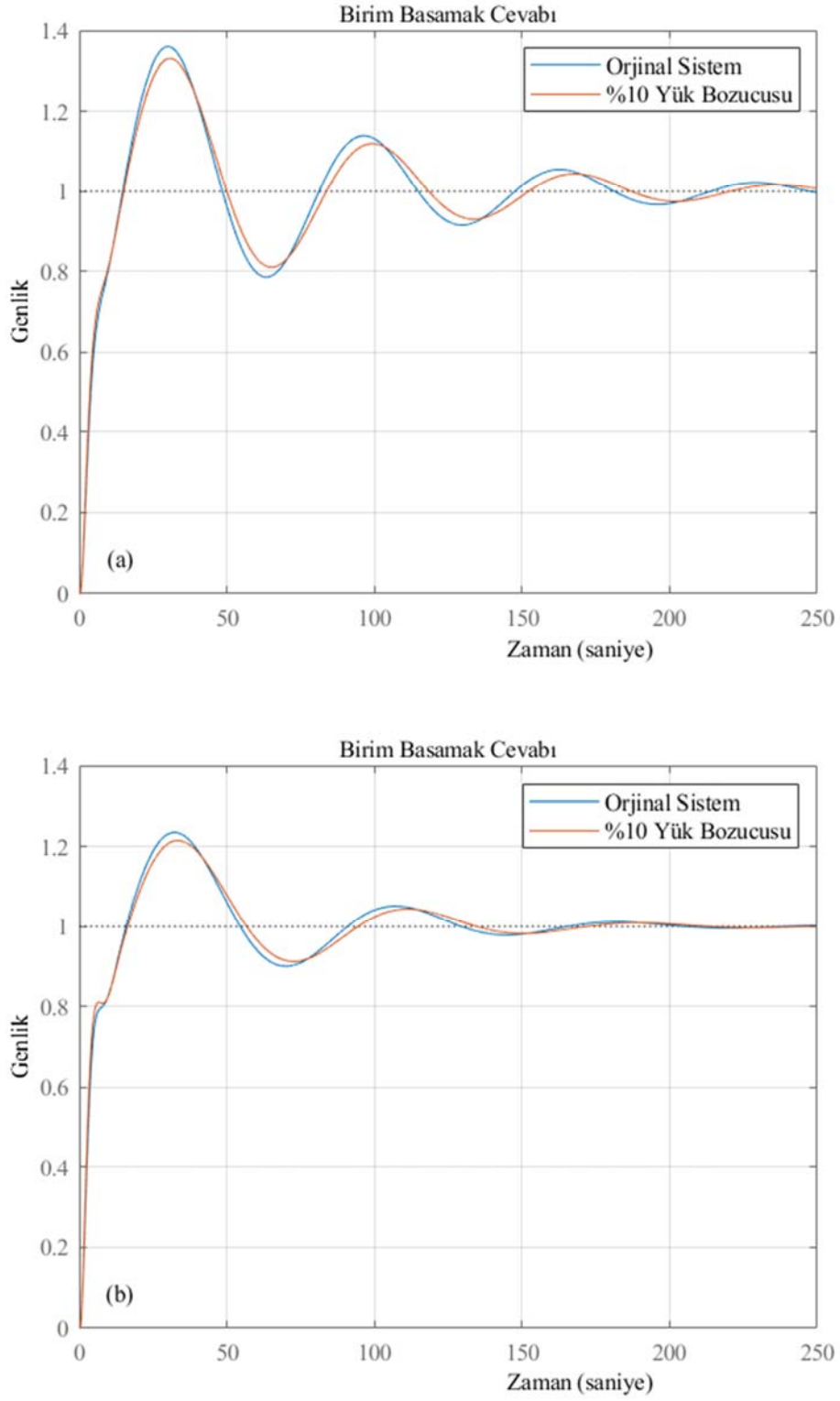
| PM | k_p | k_i | λ | GM |
|------------|----------|----------|-----------|----------|
| 10° | 0,141684 | 0,005684 | 1,75082 | -27,8409 |
| 20° | 0,18494 | 0,0066 | 1,7224 | -25,5135 |
| 30° | 0,224921 | 0,007362 | 1,69942 | -23,8046 |
| 40° | 0,259807 | 0,007934 | 1,67964 | -22,5454 |
| 50° | 0,288207 | 0,008291 | 1,66163 | -21,6388 |
| 60° | 0,309084 | 0,008419 | 1,64428 | -21,0265 |
| 70° | 0,321743 | 0,008313 | 1,62666 | -20,6734 |
| 80° | 0,325828 | 0,007977 | 1,60773 | -20,5594 |
| 90° | 0,321346 | 0,007422 | 1,58618 | -20,6751 |



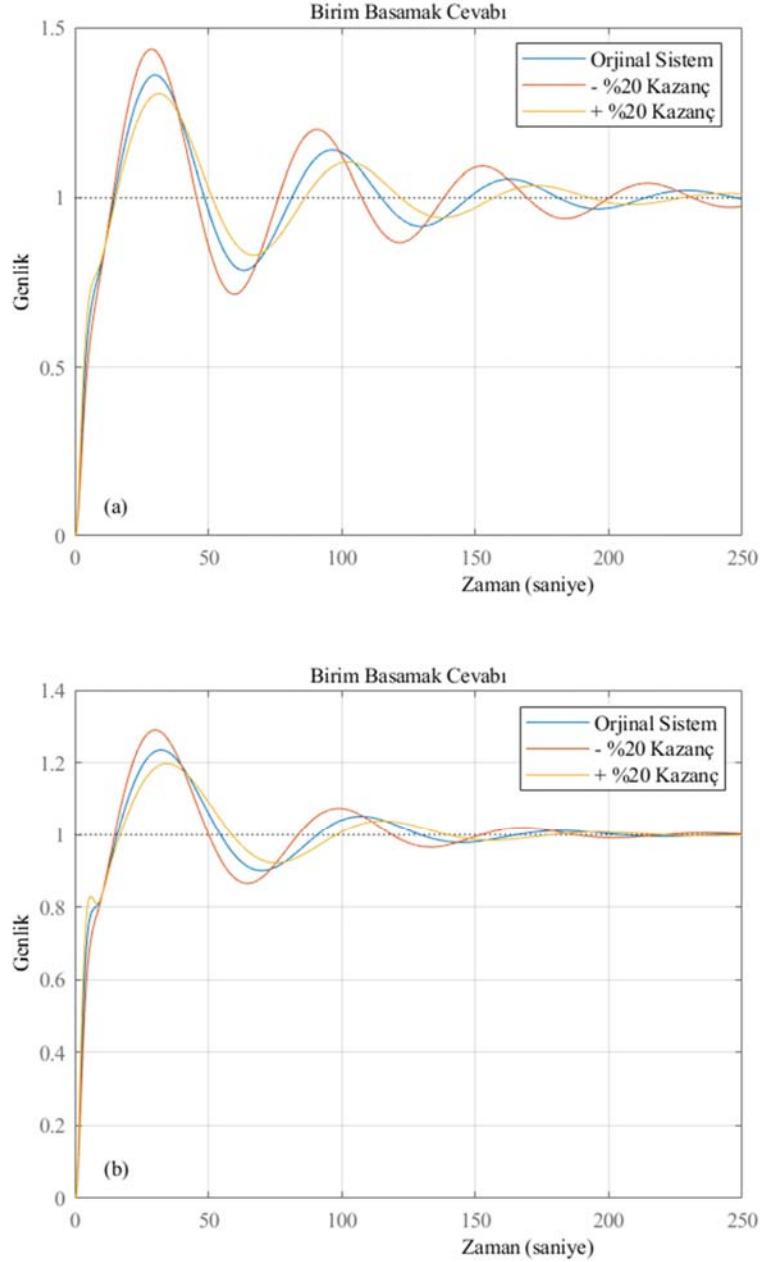
Şekil 9. $PM = 30^\circ$ (a) ve $PM = 60^\circ$ (b) değerlerinde elde edilen sistemlerin Bode diyagramları
(Bode diagrams of the systems obtained for $PM = 30^\circ$ (a) and $PM = 60^\circ$ (b))

Yine, sistem üzerinde kazancın %10'u kadar bir bozucu etki olduğunda elde edilen birim basamak tepkileri her iki PM değeri için Şekil 10'da verilmiştir. Sistem dayanıklılığını

daha büyük bir etki altında göstermek için denetleyicinin kazancı $\pm\%20$ oranında değiştirilmiş ve elde edilen birim basamak tepkileri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. $PM = 30^\circ$ (a) ve $PM = 60^\circ$ (b) değerlerinde elde edilen sistemlerin bozucu etki altında birim basamak tepkileri
(Step responses of the systems under disturbance effect obtained for $PM = 30^\circ$ (a) and $PM = 60^\circ$ (b))



Şekil 11. $PM = 30^\circ$ (a) ve $PM = 60^\circ$ (b) değerlerinde elde edilen sistemlerin denetleyici kazanç değişimine karşı birim basamak tepkileri (Step responses of the systems against variations of controller gain obtained for $PM = 30^\circ$ (a) and $PM = 60^\circ$ (b))

Her iki örnekte de görüldüğü gibi SOPTD modeller için istenen frekans özellikleri, tasarlanan FOPI denetleyiciler yardımıyla başarılı şekilde sağlanmıştır. Bu şekilde önerilen yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu yayında, ikinci derece zaman gecikmeli transfer fonksiyonları ile ifade edilen modeller için kesir dereceli oransal-integratör denetleyici tasarımı yapılmıştır. Tasarımdaki amaç, denetlenen sistemin, araştırmacının isteği

doğrultusunda kazanç kesim frekansı, faz kesim frekansı ve faz payı değerlerini sağlamasıdır. Böylece sistem kararlılığı ve dayanıklılığı istenen şekilde ayarlanabilecek, yani sistem davranışı kontrol edilebilecektir. Yöntemin mevcut çalışmalardan farkı faz eğrisi şekillendirme yönteminde ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi faz eğrisinin düz olması sistemin kararsızlığa geçiş ihtimalini azaltmakta, yani kazanç değişimlerine karşı sistem dayanıklılığını artırmaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalarda faz düzleştirme, istenen frekans değerinde fazın türevinin sıfıra eşitlenmesi ile sağlanmaktadır. Bu yöntem etkili sonuçlar

vermekte fakat matematiksel karmaşıklığı önemli derecede artırmaktadır. Bu yayında sunulan yöntemde faz düzleştirme tamamen grafiksel bir yaklaşım ile, kazanç kesim frekansı, faz kesim frekansı ve faz payı değerlerinin uygun şekilde ayarlanması ile sağlanmaktadır. SOPTD modeller için elde edilen FOPI denetleyici parametreleri analitik hesaplamalar yardımıyla bulunmuştur. Bu da denklemlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Önerilen yöntem literatürden seçilmiş iki örnek model üzerinde uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bu modeller üzerine bozucu etki uygulanmış ve sistem dayanıklılığının sağlandığı gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda da benzer bir yaklaşımın optimizasyon teknikleri ile desteklenerek daha güçlü bir denetleme sisteminin oluşturulması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Podlubny, I., Fractional-order systems and PI/sup /spl lambda/D/sup /spl mu/-controllers, IEEE Transactions on Automatic Control, 44 (1), 208–214, 1999.
- Petras, I., Stability of Fractional-Order Systems with Rational Orders, Fractional Calculus and Applied Analysis, 10 (3), 269–298, 2008.
- Karcı A., The Properties of New Approach of Fractional Order Derivative, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 2015.
- Valdes-Parada, F. J., Alberto Ochoa-Tapia, J., Alvarez-Ramirez, J., Effective medium equations for fractional Fick's law in porous media, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 373, 339-353, 2007.
- Arena, P., Caponetto, R., Fortuna, L., Porto, D., Nonlinear Non-Integer Order Circuits and Systems-An Introduction, World Scientific, 2000.
- Silva, M. F., Machado, J. A. T., Lopes, A. M., Fractional Order Control of a Hexapod Robot, Nonlinear Dynamics, 38, 417–433, 2004.
- Vinagre, B. M., Chen, Y. Q., Petráš, I., Two direct Tustin discretization methods for fractional-order differentiator/integrator, Journal of the Franklin Institute, 340 (5), 349-362, 2003.
- Tavazoei, M. S., Haeri, M., A necessary condition for double scroll attractor existence in fractional-order systems, Physics Letters A, 367 (1-2), 102-113, 2007.
- Senol, B., Ates, A., Baykant Alagoz, B., Yeroglu, C., A numerical investigation for robust stability of fractional-order uncertain systems, ISA Transactions, 53 (2), 189-198, 2014.
- Senol, B., Yeroglu, C., Tan, N., Analysis of fractional order polynomials using Hermite-Biehler theorem, ICFDA'14 International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications, Catania-İtalya, 1–5, 2014.
- Wang, J., Zong, Q., Su, R., Tian, B., Continuous high order sliding mode controller design for a flexible air-breathing hypersonic vehicle, ISA Transactions, 53 (3), 690–698, 2014.
- Tajaddodianfar, F., Reza Moheimani, S. O., Owen, J., Randall, J. N., A self-tuning controller for high-performance scanning tunneling microscopy, 1st Annual IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2017, Maui-ABD, 27-30 Ağustos, 2017.
- Liu, H., Li, D., Xi, J., Zhong, Y., Robust attitude controller design for miniature quadrotors, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 26 (4), 681–696, 2016.
- Rashid, A. R. M., Siddikhan, P. M., Selvakumar, C., Suresh, M., The performance analysis of PID controller with setpoint filter and anti-integral Windup for a FOPDT thermal process, Proceedings of 2017 3rd IEEE International Conference on Sensing, Signal Processing and Security, ICSSS 2017, Chennai-Hindistan, 440–443, 4-5 Mayıs, 2017.
- Madhuranthakam, C. R., Elkamel, A., Budman, H., Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47 (2), 251–264, 2008.
- Cvejn, J., PID control of FOPDT plants with dominant dead time based on the modulus optimum criterion, Archives of Control Sciences, 26 (1), 5–17, 2016.
- Hekimoğlu B., Robust fractional order PID stabilizer design for multi-machine power system using grasshopper optimization algorithm, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 165-180, 2019.
- Tufenkci, S., Senol, B., Alagoz, B. B., Disturbance Rejection Fractional Order PID Controller Design in v-domain by Particle Swarm Optimization, 2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Malatya-Türkiye, 1–6, 21-22 Eylül, 2019.
- Das, S., Pan, I., Das, S., Multi-objective LQR with optimum weight selection to design FOPID controllers for delayed fractional order processes, ISA Transactions, 58, 35–49, 2015.
- Song, X., Chen, Y. Q., Tejado, I., Vinagre, B. M., Multivariable fractional order PID controller design via LMI approach, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 13960–13965, IFAC Secretariat, 2011.
- Zhao, C., Xue, D., Chen, Y. Q., A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls-Canada, 216–221, 29 Temmuz-1 Ağustos, 2005.
- Ayasun S., Sönmez Ş., Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 945-960, 2018.
- Miao, Z., Han, T., Dang, J., Ju, M., FOPI/PI controller parameters optimization using PSO with different performance criteria, Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chengdu-Çin, 250–255, 15-17 Aralık, 2018.
- Kar, B., Roy, P., A Comparative Study Between Cascaded FOPI-FOPD and IOPI-IOPD Controllers

- Applied to a Level Control Problem in a Coupled Tank System, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29, 340–349, 2018.
25. Baruah, G., Majhi, S., Mahanta, C., Design of FOPI Controller for Time Delay Systems and Its Experimental Validation, *International Journal of Automation and Computing*, 16, 310–328, 2019.
 26. Şenol, B., Demiroğlu, U., Frequency frame approach on loop shaping of first order plus time delay systems using fractional order PI controller, *ISA Transactions*, 86, 192–200, 2019.
 27. Jamal, A., Syahputra, R., Heat Exchanger Control Based on Artificial Intelligence Approach, *International Journal of Applied Engineering Research*, 11 (16), 9063-9069, 2016.
 28. Dhanya Ram, V., Sankar Rao, C., Identification and Control of an Unstable SOPTD system with positive zero, *Computer Aided Chemical Engineering*, 44, 757–762, 2018.
 29. Srivastava, S., Pandit, V. S., A scheme to control the speed of a DC motor with time delay using LQR-PID controller, 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, Pune-Hindistan, 294–299, 28-30 Mayıs, 2015.
 30. Kapoor, S., Chaturvedi, M., Juneja, P. K., Design of FOPID controller with various optimization algorithms for a SOPDT model, 2017 International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies, Dehradun-Hindistan, 1–4, 17-18 Kasım, 2017.
 31. Ramakrishnan, V., Chidambaram, M., Estimation of a SOPTD transfer function model using a single asymmetrical relay feedback test, *Computers and Chemical Engineering*, 27 (12), 1779–1784, 2003.
 32. Mesa, F., Marin, L. M., A CABRI plot generator to describe frequency and domain properties of SOPTD responses, EUROCON 2005 - The International Conference on Computer as a Tool, Belgrade-Sırbistan, 278–281, 21-24 Kasım, 2005.
 33. Şenol, B., Demiroğlu, U., Matušů, R., Fractional order proportional derivative control for time delay plant of the second order: The frequency frame, *Journal of the Franklin Institute*, 357 (12), 7944-7961, 2020.
 34. Wang, C., Ying Luo, Chen, Y., Fractional order proportional integral (FOPI) and [proportional integral] (FO[PI]) controller designs for first order plus time delay (FOPTD) systems, 2009 Chinese Control and Decision Conference, Guilin-Çin, 329–334, 17-19 Haziran, 2009.
 35. Wang, C., Jin, Y., Chen, Y., Auto-tuning of FOPI and FO[PI] controllers with iso-damping property, Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, Shanghai-Çin, 7309–7314, 15-18 Aralık, 2009.
 36. Chen, Y., Moore, K. L., Vinagre, B. M., Podlubny, I., Robust PID Controller Autotuning with an Iso-Damping Property Through A Phase Shaper, *Fractional Differentiation and its Applications*, 687–706, Ubooks Verlag, Neusäß, 2005.
 37. Pommier-Budinger, V., Janat, Y., Nelson-Gruel, D., Lanusse, P., Oustaloup, A., Fractional robust control with ISO-damping property, Proceedings of the American Control Conference, Seattle-ABD, 4954–4959, 11-13 Haziran, 2008.
 38. Saha, S., Das, S., Ghosh, R., Goswami, B., Balasubramanian, R., Chandra, A. K., Das, S., Gupta, A., Fractional order phase shaper design with Bode's integral for iso-damped control system, *ISA Transactions*, 49 (2), 196–206, 2010.
 39. Akdağ O., Yeroğlu C., Optimal load flow via modified water cycle algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 1119–1132, 2021.
 40. Garip Z., Çimen M.E., Boz A.F., Comparative performance analysis on parameter extraction of solar cell models using meta-heuristic algorithms, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 1133–1144, 2021.
 41. Rajapandiyam, C., Chidambaram, M., Closed-loop identification of second-order plus time delay (SOPTD) model of multivariable systems by optimization method, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51 (28), 9620–9633, 2012.
 42. Das, S., Saha, S., Das, S., Gupta, A., On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes, *ISA Transactions*, 50 (3), 376–388, 2011.