

# Çevrimiçi Ayarlamalı Tek Girişli Tip-2 Bulanık PD Kontrolör ile Top ve Çubuk Sisteminin Kontrolü

## Control of Ball and Beam System with Online Tuning Single Input Type-2 Fuzzy PD Controller

İhsan Şahin<sup>1</sup>, Cenk Ulu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul  
ihсан.sahin@std.yildiz.edu.tr

<sup>2</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul  
cenkulu@yildiz.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada, çevrimiçi ayarlamalı yeni bir tek girişli tip-2 bulanık PD (ÇA-TG-T2-BPD) kontrolör yapısı önerilmiş ve etkinliği bir top ve çubuk sisteminin kontrolü üzerinde gösterilmiştir. Bu kontrolörde tip-2 bulanık kümelerin alt üyelik fonksiyonları dinamik bir fonksiyon üzerinden çevrimiçi olarak ayarlanmaktadır. Böylece aralık tip-2 bulanık kümelerin belirsizlik taban alanları çevrimiçi olarak ayarlanabilmekte ve kontrolör başarımı iyileştirilebilmektedir. Önerilen kontrolörün başarımı nominal durum, dış bozucu ve sistem parametre değişimi koşullarında benzetim çalışmaları ile test edilmiştir. Ayrıca önerilen kontrolörün başarımı tek girişli tip-1 bulanık PD (TG-T1-BPD) ve tek girişli tip-2 bulanık PD (TG-T2-BPD) kontrolörlerin başarımları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları önerilen ÇA-TG-T2-BPD kontrolörün TG-T1-BPD ve TG-T2-BPD kontrolörlere göre daha üstün bir başarımla sergilediğini göstermiştir.

### Abstract

In this study, a new online tuning single-input type-2 fuzzy PD (OT-SI-T2-FPD) controller structure is proposed and its effectiveness is demonstrated on the control of a ball and beam system. In this controller, lower membership functions of type-2 fuzzy sets are adjusted online via a dynamic function. Thus, the footprint of uncertainties of interval type-2 fuzzy sets can be tuned in an online manner and the controller performance can be improved. The performance of the proposed controller is tested through simulation studies under nominal, external disturbance, and system parameter variation conditions. Additionally, the performance of the proposed controller is compared with the performances of single-input type-1 fuzzy PD (SI-T1-FPD) and single-input type-2 fuzzy PD (SI-T2-FPD) controllers. The comparison results show that the proposed OT-SI-T2-FPD controller outperforms the SI-T1-FPD and SI-T2-FPD controllers.

### 1. Giriş

Literatürde tek girişli tip-1 bulanık kontrolör yapısı Choi ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [1]. Bu kontrolcü tasarımında giriş olarak  $d$  değişkeni kullanılmaktadır. Bu  $d$  değişkeni hata ve hatanın türevine bağlı olup hata ve hatanın türevinden oluşan eksen takımında herhangi bir noktanın kural tablosuna ilişkin köşegen doğrusuna olan uzaklığını ifade etmektedir. İki girişli bulanık kontrolörlerin simetrik kural tabloları için bu köşegen doğrusuna paralel olan doğrular boyunca tek bir çıkış bulanık kümesi tanımlı olur. Bu nedenle herhangi bir çalışma noktasına ilişkin  $d$  mesafesi simetrik kural tablosuna sahip iki girişli bir bulanık kontrolörde doğrudan hangi çıkış bulanık kümesinin atesleneceği bilgisini taşımaktadır. Tek girişli bulanık kontrolör, klasik iki girişli bulanık kontrolör ile benzer performansa sahiptir. Ancak klasik iki girişli kontrolöre göre üstünlüğü sahip olduğu giriş sayısı, kural sayısı ve tasarım parametre sayısının daha az olmasıdır [2]. Tek girişli bulanık kontrolörler doğrusal olmayan sistem [3], insansız hava aracı [4], su reaktörü [5], güç dönüştürücü [6], su altı aracı [7] ve ters sarkaç [8] gibi sistemlere başarıyla uygulanmıştır.

Tip-2 bulanık kümeler sahip oldukları belirsizliğin taban alanı sayesinde gürültü, bozucu ve parametre değişimlerine karşı tip-1 eşdeğerlerine göre daha üstün başarımla sergilemektedirler [9-10]. Sahip oldukları avantajlardan dolayı tip-2 bulanık kümeler tek girişli bulanık kontrolör tasarımında kullanılmış ve tek girişli tip-2 bulanık kontrolörler tasarlanmıştır [11,12]. Fakat yapılan çalışmalarda tip-2 bulanık kontrolörlerde kullanılan tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanı değerleri sabit seçilmiştir. Ayrıca literatürde, farklı bir bakış açısı olarak doğrudan hata değerini giriş olarak kullanan tek girişli tip-2 bulanık kontrol yapısı da önerilmiştir [13-15].

Bu çalışmada, çevrimiçi ayarlamalı yeni bir tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolör yapısı önerilmiştir. Önerilen kontrolör yapısında başarımı arttırmak için tip-2 bulanık kümelere ait belirsizlik taban alanı değerleri çevrimiçi olarak

ayarlanmaktadır. Bu ayarlama tip-2 bulanık kümelerine ait alt üyelik fonksiyonlarının yüksekliğinin  $d$  değişkenine bağlı bir dinamik fonksiyon yardımıyla değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrolörün başarımı bir top ve çubuk sistemi kontrol uygulamasında test edilmiştir. Test senaryolarında nominal durum, bozucu ve sistem parametre değişiminin olması gibi farklı durumlar dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar tek girişli tip-1 bulanık PD ve tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolörler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları önerilen çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık kontrolörün sistem cevabını önemli ölçüde iyileştirerek geleneksel eşdeğerlerine göre daha üstün bir başarımla sergilediğini ve bozucu ve sistem parametre değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, ikinci bölümde top ve çubuk sistemi tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, tek girişli tip-1, tek girişli tip-2 ve çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık PD kontrol sistem tasarımları anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sunulmuştur. Son bölümde ise sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. Top ve Çubuk Sistemi

Şekil 1’de top ve çubuk sistemi gösterilmiştir. Bu sistemin kontrolündeki amaç motor açısı ayarlanarak çubuk üzerindeki topun konumunun istenen değere getirilmesidir. Bu sistemin dinamik denklemi aşağıdaki gibidir [16]:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r} + mgs\sin\alpha - m\dot{r}\dot{\alpha}^2 \quad (1)$$

Denklemden,  $m$  topun kütle,  $J$  topun dönme ataletini,  $R$  topun yarıçapını,  $r$  topun pozisyonunu,  $\alpha$  giriş açısını ve  $g$  ise yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Topun giriş açısı  $\alpha$  ile motor dişli açısı  $\theta$  arasındaki ilişki aşağıdaki gösterilmiştir.

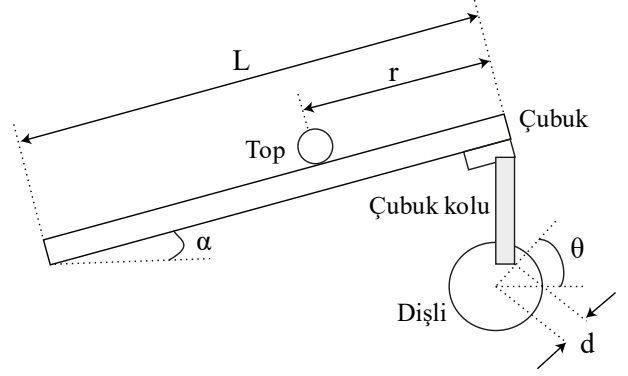
$$\alpha = \frac{d}{L}\theta \quad (2)$$

(2) numaralı denklemde,  $L$  çubuk uzunluğu ve  $d$  ise dişli yarıçapıdır.

Top ve çubuk sisteminin parametre değerleri Tablo 1’de sunulmuştur [16].

Tablo 1: Top ve çubuk sisteminin parametre değerleri

Sembol	Değer	Birim
$m$	0.11	$kg$
$R$	0.015	$m$
$L$	0.4	$m$
$d$	0.04	$m$
$g$	9.81	$m/s^2$
$J$	$\frac{2mR^2}{5}$	$kg.m^2$



Şekil 1: Top ve çubuk sistemi

## 3. Kontrol Sistemi Tasarımı

Bu bölümde, önerilen çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık PD (ÇA-TG-T2-BPD) kontrolör tasarımı yanında karşılaştırmalarda kullanılmak amacıyla tek girişli tip-1 bulanık PD (TG-T1-BPD) ve tek girişli tip-2 bulanık PD (TG-T2-BPD) kontrolörlerin tasarımı da gösterilmiştir.

### 3.1. Tek Girişli Tip-1 Bulanık PD Kontrolör Tasarımı

Geleneksel iki girişli tip-1 bulanık PD kontrolör tasarımı girişler olarak hata ( $e$ ) ve hatanın türevi ( $\dot{e}$ ) kullanılır. Bu girişlere göre kullanılan iki boyutlu genel simetrik kural tablosu yapıları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2: İki girişli bulanık kontrolörün kural tablosu

$\dot{e}/e$	NB	N	S	P	PB
NB	NB	NB	N	N	S
N	NB	N	N	S	P
S	N	N	S	P	P
P	N	S	P	P	PB
PB	S	P	P	PB	PB

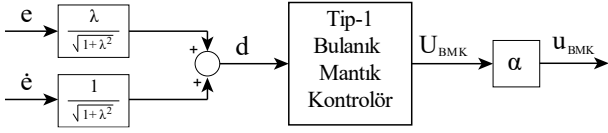
Tablo 2’den görüldüğü gibi, S (sıfır) çıkış bulanık kümesine göre bir ana köşegen doğrusu  $L_S$  tanımlandığında, diğer çıkış bulanık kümeleri için de  $L_S$ ’ye paralel ve farklı uzaklık değerine sahip doğrular tanımlanabilir. Ana köşegen doğrusu  $L_S$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{e} + \lambda e = 0 \quad (3)$$

(3) numaralı denklemde,  $\lambda$  değeri  $L_S$ ’nin eğim değeridir. Bu doğruya uzaklık değeri olan  $d$  ifadesi ise (4) numaralı denklem ile hesaplanır.

$$d = \frac{\dot{e} + \lambda e}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \quad (4)$$

Bu ifadelerden yararlanarak yukarıda belirtilen yapıdaki iki girişli bir bulanık PD kontrolör Şekil 2’de belirtildiği yapıda ve Tablo 3’te gösterilen kural tablosu kullanılarak tek girişli bir bulanık PD kontrolör şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2: Tek girişli tip-1 bulanık PD kontrolör

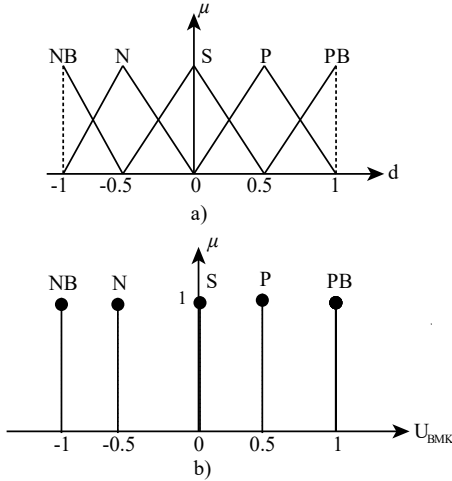
Tablo 3: İki girişli bulanık kontrolörün kural tablosu

d	NB	N	S	P	PB
$U_{BMK}$	NB	N	S	P	PB

Şekil 2’de,  $d$  ifadesi  $L_S$ ’ye olan uzaklığı,  $U_{BMK}$  bulanık kontrolör çıkışını ve  $\alpha$  çıkış kazançını temsil etmektedir. Burada sisteme uygulanan nihai kontrol sinyali  $u_{BMK}$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u_{BMK} = \alpha * U_{BMK} \quad (5)$$

Kontrolörün sahip olduğu giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 3’te gösterilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları  $[-1,1]$  tanım aralığında oluşturulmuştur.

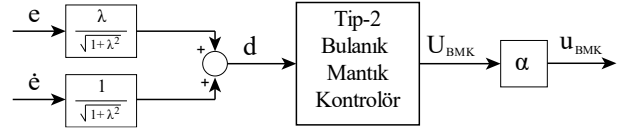


Şekil 3: Tek Girişli Tip-1 Bulanık PD Kontrolörün a) giriş ve b) çıkış üyelik fonksiyonları

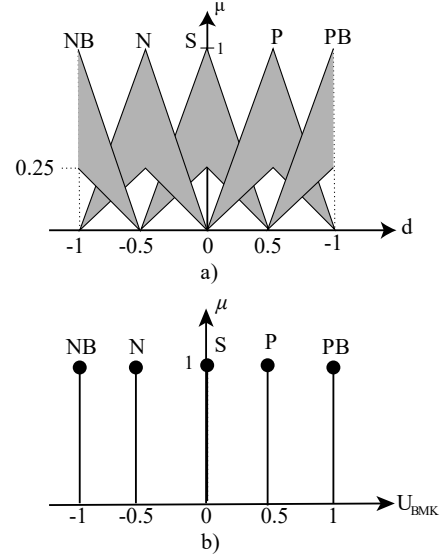
Tek girişli bulanık kontrolörler önemli avantajlara sahiptir. Tek girişli bulanık kontrolörde kural tablosu 1 boyuta indirgenmiştir ve tasarım parametre sayısı azalmıştır. Böylece iki girişli eşdeğerlerine göre tasarım ve hesaplama kolaylığı sağlanmaktadır.

### 3.2. Tek Girişli Tip-2 Bulanık PD Kontrolör Tasarımı

Tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolör (TG-T2-BPD) tasarım parametreleri TG-T1-BPD kontrolör ile genel olarak aynıdır. Aralarındaki tek fark TG-T2-BPD kontrolörün giriş bulanık kümeleri için aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarının kullanılmasıdır. Şekil 4’te TG-T2-BPD kontrolör yapısı ve Şekil 5’te giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları  $[-1,1]$  tanım aralığında oluşturulmuş ve alt üyelik fonksiyonlarının yükseklik değeri 0.25 seçilmiştir. Kontrolörün sahip olduğu kural tablosu TG-T1-BPD ile aynı olup Tablo 2’de gösterilmiştir.



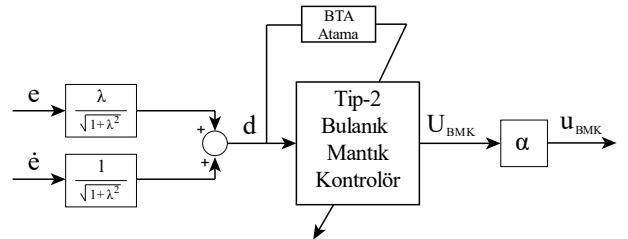
Şekil 4: Tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolör



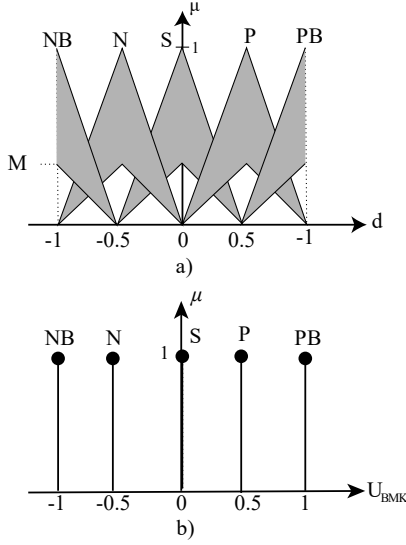
Şekil 5: Tek Girişli Tip-2 Bulanık PD Kontrolörün a) giriş ve b) çıkış üyelik fonksiyonları

### 3.3. Önerilen Çevrimiçi Ayarlamalı Tek Girişli Tip-2 Bulanık PD Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde önerilen çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık PD (ÇA-TG-T2-BPD) yapısı gösterilmiştir. TG-T2-BPD kontrolöründe tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanı değerleri sabit seçilmektedir. Önerilen ÇA-TG-T2-BPD kontrolör yapısında ise belirsizliğin taban alanı kontrolör girişi olan  $d$  değişkenine bağlı dinamik bir fonksiyon ile çevrimiçi ayarlanmaktadır. Bu çevrimiçi ayarlama yöntemi ile kontrolörün başarımı iyileştirilebilecektir. Şekil 6’da ÇA-TG-T2-BPD kontrolör genel yapısı ve Şekil 7’de kontrolörün sahip olduğu giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Giriş-çıkış üyelik fonksiyonları  $[-1,1]$  tanım aralığında oluşturulmuştur.



Şekil 6: Çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolör



Şekil 7: Çevrimiçi ayarlamalı tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolörün a) giriş ve b) çıkış üyelik fonksiyonları

Şekil 6'de görülen belirsizlik taban alanı (BTA) atama bloğu, kontrolörün alt üyelik fonksiyonlarının yüksekliklerini önerilen dinamik fonksiyon ile çevrimiçi olarak değiştirmektedir. Bu dinamik belirsizlik taban alanı yapısı kontrolör başarımını iyileştirebilmektedir [17]. Önerilen yöntemde dinamik fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$M = \text{abs}(0.9 * d) + 0.1 \quad (6)$$

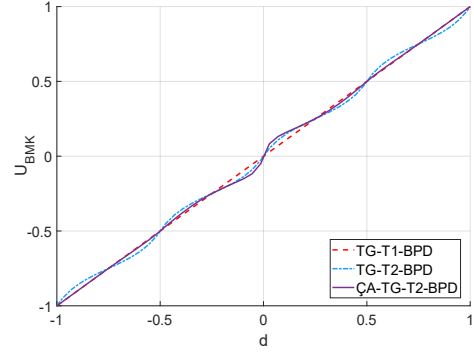
(6) numaralı denklemde gösterilen  $M$  alt üyelik fonksiyonunun yükseklik değerini temsil etmektedir. Bu dinamik fonksiyona göre alt üyelik fonksiyonlarının yüksekliği değiştirilerek tip-2 bulanık kümelerin belirsizlik taban alanları çevrimiçi olarak değiştirilebilmektedir.

#### 4. Benzetim çalışması

Bu bölümde, önerilen ÇA-TG-T1-BPD kontrolör yapısının etkinliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için top ve çubuk sistemi üzerinden benzetim çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar TG-T1-BPD ve TG-T2-BPD kullanılması durumunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kontrolörlerin yapıları Bölüm 3' te belirlenmiştir. Adil bir karşılaştırma için tüm kontrolörlerde çıkış üyelik fonksiyonları aynı seçilmiş ve sadece giriş üyelik fonksiyonları farklı seçilmiştir. TG-T1-BPD, TG-T2-BPD ve ÇA-TG-T1-BPD kontrolör yapıları için belirlenen üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 3, Şekil 5 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Ayrıca kontrolör tasarım parametreleri olan  $\lambda$  ve  $\alpha$ , tek girişli tip-1 bulanık kontrolöre göre 1 ve -1 olarak belirlenmiş ve diğer kontrolörlerde aynı değerler kullanılmıştır. Bu tasarımlara göre elde edilen kontrolör yüzeylerinin karşılaştırılması Şekil 8' de gösterilmiştir.

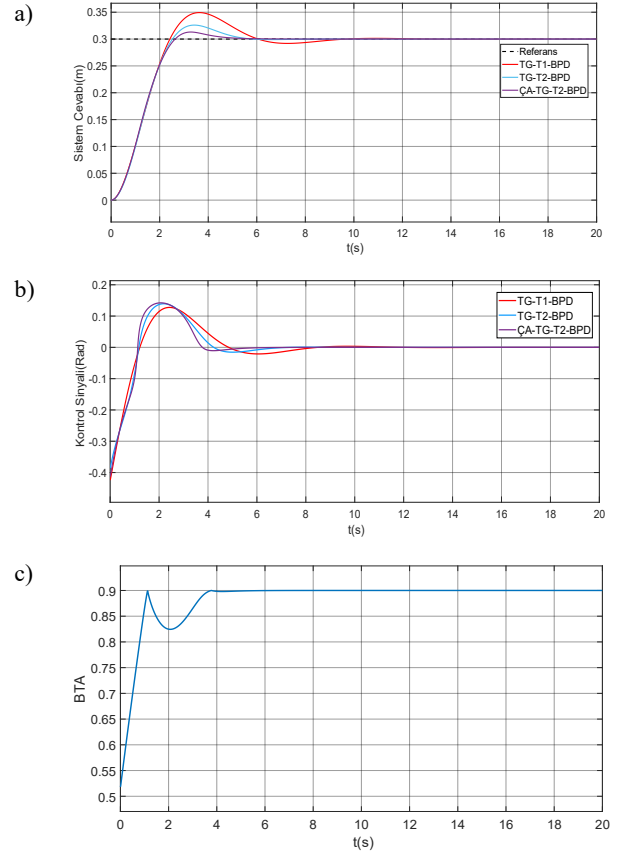
Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, örnekleme zamanı 0.01 saniye seçilmiştir. Performans ölçütü olarak İntegral Mutlak Hata (İMH) kullanılmıştır.

$$\text{İMH} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (7)$$



Şekil 8: Kontrol yüzeyleri

0.3 m referans girişine karşı elde edilen sistem çıkışı, kontrol sinyali ve BTA değişimleri Şekil 9'da sunulmuştur. Başarım karşılaştırma sonuçları Tablo 4' te verilmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi, önerilen ÇA-TG-T2-BPD kontrolör diğer kontrolörlere göre aşım ve yerleşme zamanı değerlerinde önemli bir iyileştirme sağlamıştır.

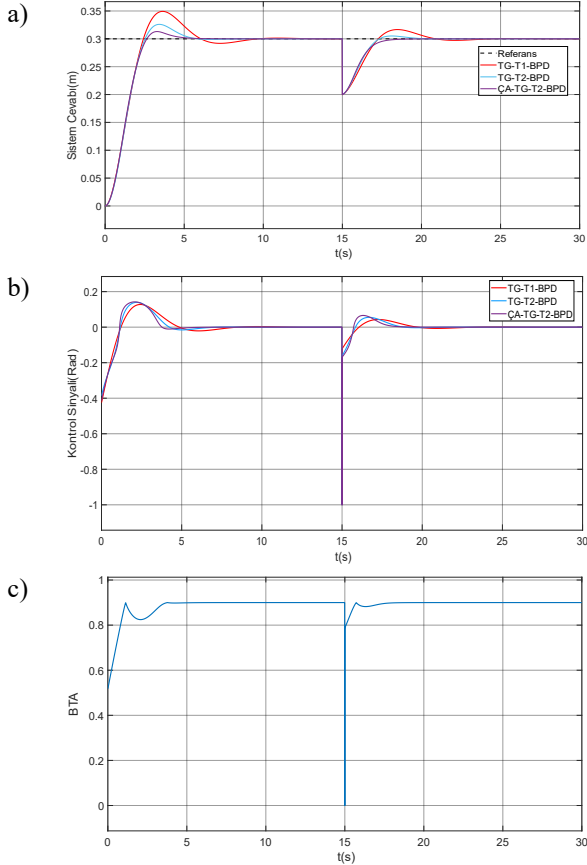


Şekil 9: 0.3 m referansında benzetim sonuçları a) sistem çıkışı b) kontrol sinyali ve c) BTA değişimi

Tablo 4: Nominal durumda başarım karşılaştırılması

Kontrolör	İMH
TG-T1-BPD	0.516
TG-T2-BPD	0.4409
ÇA-TG-T2-BPD	0.4121

Kontrolörlerin bozuculara karşı dayanıklılığını test etmek için 15. saniyede  $-0.1$  büyüklüğünde bir bozucu uygulanmıştır. Sistem çıkışı, kontrol sinyali ve BTA değişimleri Şekil 10' da sunulmuştur. Başarım karşılaştırma sonuçları Tablo 5' te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen ÇA-TG-T2-BPD kontrolörün daha iyi bir başarım ölçütü değerine sahip olduğunu ve sisteme bozucu etkimesi durumunda diğer kontrolörlere göre daha üstün bir dayanıklılık başarımı sergilediğini göstermiştir.

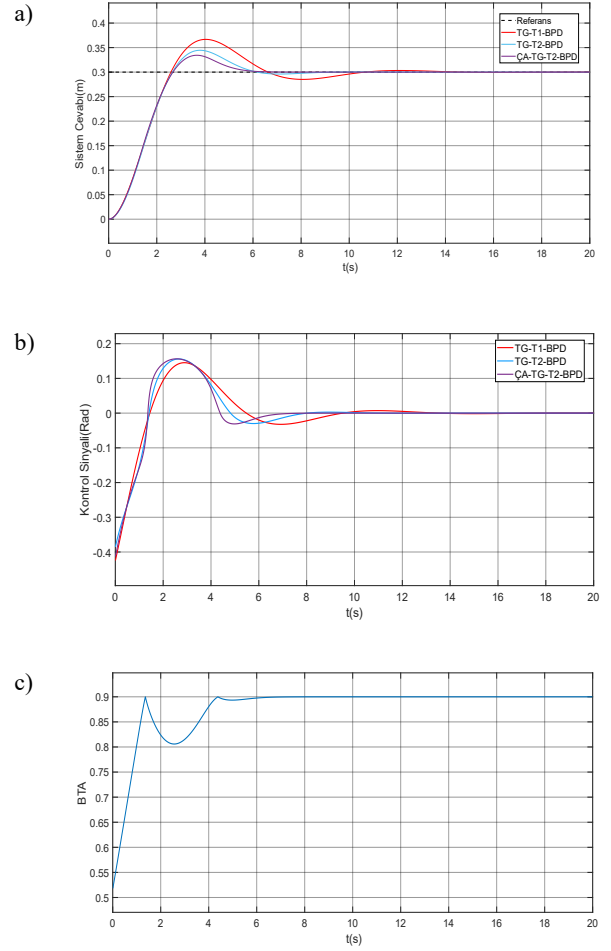


Şekil 10: Dış bozucu etkisi altında benzetim sonuçları a) sistem çıkışı b) kontrol sinyali ve c) BTA değişimi

Tablo 5: Dış bozucu etkisi altında başarım karşılaştırılması

Kontrolör	İMH
TG-T1-BPD	0.6149
TG-T2-BPD	0.5575
ÇA-TG-T2-BPD	0.524

Kontrolörlerin sistem parametre belirsizliği olması durumundaki başarımlarını test etmek için top kütlesi  $m = 0.11 \text{ kg}$  yerine  $m = 0.0825 \text{ kg}$  şeklinde seçilmiştir. Sistem çıkışı, kontrol sinyali ve BTA değişimleri Şekil 11' de sunulmuştur. Elde edilen başarım ölçütü değerleri Tablo 6' da karşılaştırılmıştır. Şekil 11 ve Tablo 6' dan görüldüğü gibi, sistem parametre belirsizliği olması durumunda önerilen ÇA-TG-T2-BPD kontrolör TG-T1-BPD ve TG-T2-BPD kontrolörlere göre daha üstün bir başarım sergilemektedir.



Şekil 11: Parametre değişimi etkisi altında benzetim sonuçları a) sistem çıkışı b) kontrol sinyali ve c) BTA değişimi

Tablo 6: Parametre değişimi etkisi altında başarım karşılaştırılması

Kontrolör	İMH
TG-T1-BPD	0.6042
TG-T2-BPD	0.5332
ÇA-TG-T2-BPD	0.4932

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, çevrimiçi ayarlamalı yeni bir tek girişli tip-2 bulanık PD kontrolör tasarımı önerilmiştir. Önerilen ayarlama yapısında alt üyelik fonksiyonlarının yüksekliği bir dinamik fonksiyona bağlı olarak değiştirilmekte ve tip-2 üyelik fonksiyonlarına ait belirsizlik taban alanı değerleri dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Önerilen kontrolörün başarımı bir top ve çubuk sistemi üzerinde test edilmiştir. Dayanıklılık başarım değerlendirmesi için nominal durumun yanında bozucu ve sistem parametre belirsizliği olması durumları da dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar tek giriş tip-1 ve tip-2 bulanık PD kontrolör başarımları ile karşılaştırılmış ve önerilen

kontrolörün üstünlüğü ve dayanıklılığı açık biçimde gösterilmiştir.

Önerilen çevrimiçi ayarlama yapısı kontrolör başarımını arttırmak için geleneksel tek giriş tip-2 bulanık kontrolörlere bir tasarım esnekliği sağlamaktadır. Bu ayarlama yöntemini içeren bulanık kontrolörlerin tüm tasarım parametreleri ayarlanarak etkili bir kontrol başarımı sağlanabileceği gibi, sadece önerilen ayarlama mekanizması hali hazırda tasarlanmış ve kullanılan bir tek girişli tip-2 bulanık kontrolörün başarımını arttırmak için de doğrudan kullanılabilir. Önerilen dinamik fonksiyona bağlı olarak çevrimiçi ayarlama yapısı oldukça sade olduğundan pratik uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

### Kaynakça

- [1] Byung-Jae Choi, Seong-Woo Kwak and Byung Kook Kim, "Design and stability analysis of single-input fuzzy logic controller," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 30, no. 2, pp. 303-309, April 2000.
- [2] Choi BJ, Kwak SW, Kim BK. "Design of a single-input fuzzy logic controller and its properties". *Fuzzy Sets Syst* vol.106, no. 3, pp.299-308,1999.
- [3] A. Var, T. Kumbasar and E. Yesil, "An Internal Model Control based design method for Single input Fuzzy PID controllers," *2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Istanbul, Turkey, 2015, pp. 1-7.
- [4] Q. Chen, D. Zhu, Z. Liu, Attitude control of aerial and underwater vehicles using single-input fuzzy PID controller, *Applied Ocean Research*, vol. 107, 2021.
- [5] P. S. Londhe, B. M. Patre and A. P. Tiwari, "Design of Single-Input Fuzzy Logic Controller for Spatial Control of Advanced Heavy Water Reactor," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, no. 2, pp. 901-911, April 2014.
- [6] F. Taced, Z. Salam and S. Ayob, "FPGA Implementation of a Single-Input Fuzzy Logic Controller for Boost Converter With the Absence of an External Analog-to-Digital Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 1208-1217, Feb. 2012.
- [7] B. -F. Wu, L. -S. Ma, J. -W. Perng and T. -T. Lee, "Optimal Single-Input PID Type Fuzzy Logic Controller Design with Genetic Algorithm," *2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Hong Kong, China, 2007, pp. 2000-2004.
- [8] Chen SY, Yu FM, Chung HY. "Decoupled fuzzy controller design with single-input fuzzy logic". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 129, no. 3, pp. 335-342,2002.
- [9] N. N. Karnik, J. M. Mendel and Qilian Liang, "Type-2 fuzzy logic systems," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 6, pp. 643-658, Dec. 1999.
- [10] Qilian Liang and J. M. Mendel, "Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 535-550, Oct. 2000.
- [11] A. Kumar, M. Kumar Panda, V. Kumar, "Design and implementation of interval type-2 single input fuzzy logic controller for magnetic levitation system" Proc. International Conference on Advances in Computing, 2013, pp. 833-840.
- [12] Sumanta Kundu, M. J. Nigam, "An intelligent and robust single input interval type-2 fuzzy logic controller for ball and beam system," Proc. International Conference on Advances in Computing, 2013, pp. 1155-1162.
- [13] T. Kumbasar, "Robust Stability Analysis and Systematic Design of Single-Input Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 675-694, June 2016.
- [14] T. Kumbasar, "Robust stability analysis of PD type single input interval type-2 fuzzy control systems," *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Beijing, China, 2014, pp. 634-639.
- [15] T. Kumbasar, "A one to three input mapping IT2-FLC PID design strategy," *2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Hyderabad, India, 2013, pp.1-6.
- [16] X. Qi, J. Li, Y. Xia, H. Wan, "On stability for sampled-data nonlinear ADRC-based control system with application to the ball-beam problem", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 355, no. 17, pp. 8537-8553,2018.
- [17] Sahin I, Ulu C (2023) Altitude control of a quadcopter using interval type-2 fuzzy controller with dynamic footprint of uncertainty. *ISA Transactions*, vol. 14, pp.86-94,2023.