



Aralık değerli tip-2 bulanık PID kontrolörler ve bir çevrimiçi öz-ayarlama mekanizması

Interval type-2 fuzzy PID controllers and an online self-tuning mechanism

Tufan KUMBASAR^{1*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
kumbasart@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 24.05.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.49344
Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Bu çalışmada, Aralık değerli tip-2 bulanık PID (ADT2-BPID) kontrolörlerin içyapıları incelenmiş olup ve de yeni bir öz-ayarlama önerilmiştir. Bu amaçla ilk olarak geleneksel yani tip-1 bulanık PID (T1-BPID) kontrolörler ile ADT2-BPID kontrolörlerin yapısal özellikleri ve tasarım parametreleri incelenmiştir. T1-BPID kontrolörler için önerilmiş olan bir öz-ayarlama yöntemi olan fonksiyon tabanlı öz-ayarlama yöntemi ADT2-BPID kontrolör yapılarına uygulanmıştır. Bu öz ayarlama yöntemi yardımıyla ADT2-BPID kontrolörün ölçekleme çarpanlarının çevrimiçi ayarlanabileceği gösterilmiştir. Önerilen öz-ayarlama ADT2-BPID tasarımında sırasıyla T1-BPID, ADT2-BPID kontrolörleri tasarlanmıştır. Benzetim çalışmasında önerilen öz-ayarlama yapı tip-1 ve aralık değerli tip-2 eşdeğerleriyle doğrusal olmayan bir konik tank sistemi üzerinde karşılaştırılmıştır. Önerilen öz-ayarlama ADT2-BPID kontrolör yapısı ile hem ADT2-BPID kontrolör içyapısından gelen fazladan serbestlik derecesi hem de fonksiyon ayarlayıcı tabanlı öz ayarlama yöntemi sayesinde tip-1 bulanık ve tip-2 bulanık eşdeğerlerine kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir

Anahtar kelimeler: Tip-2 bulanık kümeler, Bulanık mantık kontrolör, Öz ayarlama mekanizması

Abstract

In this study, the general structure of interval type-2 fuzzy PID (IT2-FPID) controllers and a self-tuning mechanism for IT2-FPID controller is presented. In this context, we will present and examine the controller structures of the type-1 fuzzy PID (T1-FPID) and IT2-FPID controllers on a generic a symmetrical 3x3 rule base. Then, an online self-tuning mechanism for IT2-FPID controllers is presented. The presented self-tuning mechanism, which was firstly presented for T1-FPID, controllers, tunes the scaling factors of IT2-FPID with respect to the current error value of the control system. A systematic design approach has been also presented for the self-tuning IT2-FPID structure. The performance of the T1-FPID, IT2-FPID and Self-Tuning IT2-FPID structures has been investigated on a simulation study conducted on a nonlinear tank system. The results have shown that, since the proposed approach has more extra degree of freedom provided by its interval type-2 fuzzy sets and self-tuning mechanism, the self-tuning IT2-FPID resulted with a superior control performance in comparison with its type-1 and interval type-2 counterparts.

Keywords: Type-2 fuzzy sets, Fuzzy logic controllers, Self-tuning mechanism

1 Giriş

Günümüzde bulanık PID (BPID) kontrolörler, geleneksel PID kontrolörlerine bir alternatif olarak kabul görmektedir. Bunun sebebi bu iki kontrolörünün giriş-çıkış ilişkisi açısından birbirine benzer olmasıdır [1]-[6]. Literatürde tip-1 (geleneksel) BPID kontrolörlerin analizine ve tasarımına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır [3]-[10] ve bu çalışmalar göstermiştir ki tip-1 (T1) BPID kontrolörleri sistem performansını iyileştirme özelliğine sahiptirler. T1-BPID kontrolör tasarım parametreleri yapısal parametreler ve ayar parametreleri olmak üzere iki sınıfta toplanabilir [6]. Yapısal parametreler genel olarak giriş/çıkış değişkenler, bulanık çıkarım yöntemi ve bulanık kurallarda yer alan bulanık üyelik fonksiyonlarını kapsamaktadır. Öte yandan ayar parametreleri ise giriş/çıkış ölçekleme çarpanlarını ve üyelik fonksiyonlarının parametrelerini ele alınmaktadır.

Literatürde, T1-BPID kontrolörlerin başarımını artırmak amacıyla, kontrolör tasarım parametrelerinin çevrim içi olarak ayarlanmasına dayalı çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu öz-ayarlama yapılarının, süreç modelinin doğrusal olmadığı ve/veya süreç parametrelerinde belirsizlik olduğu durumlarda, bulanık kontrol sisteminin performansını iyileştirdiği gösterilmiştir [7]-[10]. Önerilen Öz-Ayarlamalı T1-BPID kontrolör yapısında, bulanık kontrolörün ölçekleme çarpanlarının veya bulanık üyelik fonksiyonları

parametrelerinin çevrimiçi ayarlanması problemini ele almaktadır [7]-[10]. Bu çalışmalarda, kontrol performansı üzerine olan etkisinin daha fazla olması nedeniyle ölçekleme çarpanlarının çevrim içi olarak ayarlanması üzerine odaklanmıştır [10]. Literatürde yer alan ölçekleme çarpanlarına yönelik bu öz-ayarlama yöntemleri kontrol sistemine yeni serbestlik derecesi eklerken diğer taraftan kontrol sistemine yeni bloklar ve bulanık çıkarım mekanizmaları eklenmesi ihtiyacı doğmaktadır.

Son dönemde araştırmacılar aralık değerli tip-2 (ADT2) bulanık mantık kontrolörler (BMKler) alanında araştırmaları hızlandırmış ve birçok analiz ve tasarım çalışması sunmuştur. Yapılan çalışmalar ADT2-BMK'nin kontrol uygulamalarında T1 eşleniklerine göre daha başarılı olduğunu göstermiştir [11]-[17]. Yapılan çalışmalar T1 bulanık kümeleri (BKleri) içeren T1-BPID kontrolörlerinin, yüksek dereceden belirsizlik içeren kontrol uygulamalarında tam anlamıyla başarılı olamadığını göstermiştir. Öte yandan aralık değerli tip-2 bulanık PID (ADT2-BPID) kontrolörlerinin tip-2 (T2) BKler içermesi ve kullanması sebebiyle daha başarılı kontrol performansı sağladığı gösterilmiştir [15]-[17]. Performansının iyileştirilmesinde ADT2-BPID kontrolörünün kontrol sistemine öncül önermelerindeki üyelik fonksiyonlarına Belirsizliklerin İzi (Bİ) aracılığıyla sağladığı ekstra serbestlik derecesinin etkisinin olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [11]-[17]. Ayrıca olası ADT2-BPID kontrolör tasarımının, parametreleri

belirlenmiş T1-BPID kontrolörün üyelik fonksiyonlarının farklı en iyileme yöntemleriyle AT2-BK'lere genişletilebileceği belirtilmiştir [15]-[18]. Ancak günümüzde hala ADT2-BPID kontrolörleri için öz-ayarlar yöntemlerine ilişkin çalışmalar oldukça yenidir ve sınırlıdır [19],[20].

Bu çalışmada, ADT2-BPID içyapıları incelenip, fonksiyon ayarlayıcı tabanlı öz-ayarlar mekanizmasının ADT2-BPID kontrolörlerine genişletilmesi ile ilgili literatürdeki ilk çalışma sunulacaktır. Bu amaçla ilk olarak T1-BPID ve ADT2-BPID kontrolörlerinin içyapıları ve de T1-BPID kontrolör için önerilmiş olan fonksiyon ayarlayıcı öz-ayarlar yönteminin ADT2-BPID kontrolörler için nasıl genişletilebileceği sunulmuştur. Bu çalışmada ele alınan yaklaşımın avantajı benzetim çalışmalarıyla ele alınmış, bu amaçla seçilen doğrusal olmayan konik tank seviye kontrol sistemi için çalışmalar yapılmıştır. Önerilen yaklaşımın getirisini göstermek amacıyla da sonuçlar öz-ayarlar içermeyen ADT2-BPID ve T1-BPID kontrolörler ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda önerilen yöntemin getirileri gözlenmiş ve sonuçlar sergilenmiştir.

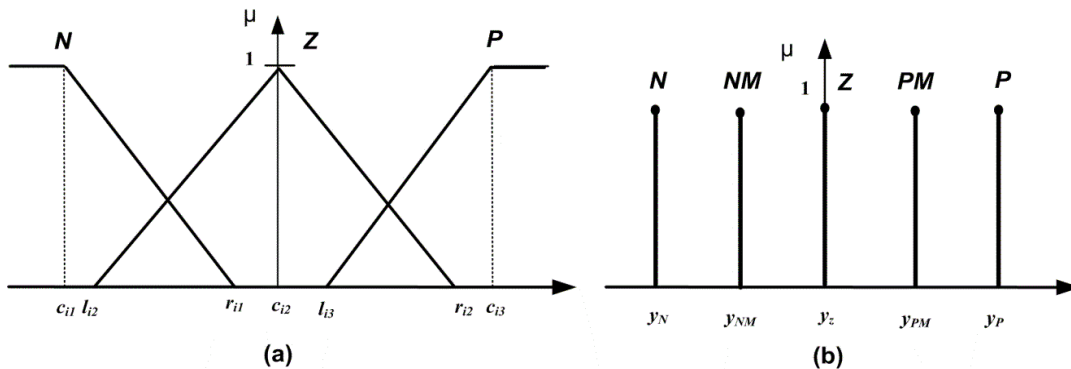
2 Bulanık PID kontrolörlerinin yapısı

Geleneksel PID kontrolörlerinin tasarım stratejileri genellikle süreç modellerine dayanır ve modelleme hatalarının büyük olduğu durumlarda istenen kontrol performansları sağlanamaz. Bu gibi durumlarda da endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla uzmanların deneme-yanılma yaklaşımıyla ince ayar yapması beklenir. Geleneksel PID kontrolörleri doğrusal olması sebebiyle giriş ile çıkış arasında doğrusal bir dönüşüm sağlar; öte yandan BPID kontrolörleri içerdikleri bulanık kurallar ve çıkarım mekanizması sebebiyle giriş ile çıkış arasında doğrusal olmayan bir dönüşüm sunarlar. Bu doğrusal olmayan dönüşüm, modelleme hatası veya belirsizlik gibi durumlarda istenen kontrol performanslarının erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Literatürde bulanık -PD, -PI ve -PID gibi farklı bulanık kontrolör yapıları sunulmuş ve başarılı uygulamaları sergilenmiştir [4]-[9].

Bu çerçevede, BPID kontrolörleri, giriş işareti olarak referans değer (r) ile süreç çıkışının (y) farkı olan hata (e) ve bu hata işaretinin türevini (\dot{e}) girdi olarak alır ve çıkışı ise doğrudan kontrol işaretidir (u). Dolayısıyla, BPID kontrolörün girişleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$e = r - y \quad (1)$$

$$\dot{e} = \frac{de}{dt} \quad (2)$$



Şekil 2: (a) Öncül önermedeki üyelik fonksiyonları, (b) sonuç önermesindeki keskin tekli değerler.

Giriş ölçekleme çarpanları aracılığıyla giriş işareti bulanık kuralların öncülünde yer alan üyelik fonksiyonları için tanımlanmış $[-1, 1]$ tanım uzayına ölçeklenir. Bu amaçla hata işareti için K_e çarpanı hatanın türevi için ise K_d çarpanı kullanılarak birim uzaya ölçeklenmiş giriş işaretleri E ve \dot{E} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = K_e e, \quad E \in [-1, 1] \quad (3)$$

$$\dot{E} = K_d \dot{e}, \quad \dot{E} \in [-1, 1] \quad (4)$$

Şekil 1'de gösterilen BPID kontrolörlerinin yapısı hem T1-BPID hem de ADT2-BPID kontrolörü için aynıdır. K_a ve K_b çıkış ölçekleme çarpanları aracılığıyla BPID kontrolörün çıkış işareti (u) elde edilir. Kontrol işaretinin ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$u = K_a U + K_b \int U dt, \quad U \in [-1, 1] \quad (5)$$



Şekil 1: Bulanık PID kontrolörünün yapısı.

2.1 Tip-1 bulanık PID kontrolörler

Bu bölümde T1-BPID kontrolörünün içyapısı ele alınacaktır. Bu amaçla, herhangi T1-BPID kontrolör için tanımlanabilecek bulanık kural yapısı ve üyelik fonksiyonları incelenecektir. Bu çalışmada, T1-BPID kontrolörlerin içyapısı Tablo 1'de verilen 3×3 köşegen simetrik kural tabanı üzerinden anlatılacaktır. Giriş değişkenlerine üçgen tipi üyelik fonksiyonları ve çıkış değişkenine tekil tip üyelik fonksiyonları atanmıştır. T1-BPID kontrolörün bulanık kurallar yapısı şöyledir.

$$R_m: \text{EĞER } E \text{ } A_{1k} \text{ ise ve } \dot{E} \text{ } A_{2l} \text{ ise O HALDE } U \text{ } C_m' \text{ dir} \quad (6)$$

$$m = 1, \dots, m = 9$$

Bulanık kuralın öncül kısmında mevcut olan A_{1k} ve A_{2l} ($k=1,2,3; l=1,2,3$) ise T1-BKleri ifade etmektedir. Şekil-2a'da gösterildiği gibi, her bir T1-BK üç parametre ($l_{ij}, c_{ij}, r_{ij}; i=1; j=1,2,3$) ile tanımlanmıştır. Bulanık kuralın sonuç kısmında mevcut olan C_m ($m=1 \dots M=9$) ise keskin sonuç değerlerini ifade etmektedir. Şekil-2b'de çıkış bulanık üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Çıkış değişkenleri beş değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır. Negatif (N)= y_N , Negatif Orta (NM)= y_{NM} , Sıfır (Z)= y_Z , Pozitif Orta (PM)= y_{PM} , Pozitif (P)= y_P .

Durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yönteminin kullanılması durumunda bulanık kontrolör çıkışı aşağıdaki biçimde hesaplanır [7]-[10].

$$U = \frac{\sum_{m=1}^M f_m C_m}{\sum_{q=1}^Q f_q} \quad (7)$$

Burada, f_m her bir kural ateşleme değerini göstermekte olup, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$f_m = \mu_{A_{1k}} * \mu_{A_{2l}} \quad (8)$$

Yukarıda yer alan $\mu_{A_{1k}}$ ve $\mu_{A_{2l}}$ ise her bir T1-BK'nın (A_{1k} ve A_{2l}) aitlik değerini ifade etmektedir.

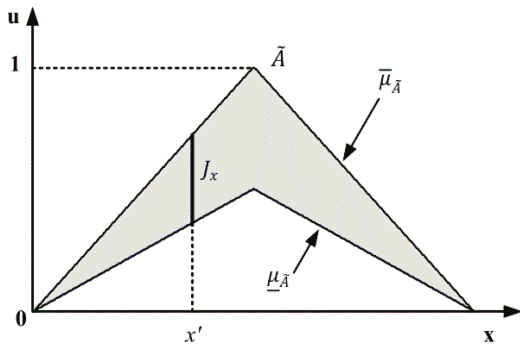
Tablo 1: 3x3 Kural Tablosu.

E/\dot{E}	N	Z	P
N	N	NM	Z
Z	NM	Z	PM
P	Z	PM	P

2.2 Aralık değerli tip-2 bulanık kontrolörler

En az bir ADT2-BK içeren bulanık kontrolörler ADT2-BPID kontrolör olarak tanımlanır [11]-[21]. T2-BK kavramı aslında temelde T1-BKlerinin genelleştirilmiş bir formudur. Bu bağlamda T2 ve T1-BK'in benzer matematiksel operatörleri kullanılmaktadır. Buna rağmen, T2-BK'leri, T1-BK'lerde olduğu gibi matematiksel manada tanımlamak kolay değildir. Şekil 3'te gösterilen T2-BKsi \tilde{A} , aşağıdaki gibi tanımlanan $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ üyelik fonksiyonu ile karakterize edilir.

$$\tilde{A} = \left\{ \left((x, u), \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x, u) \right) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1] \right\} \quad (9)$$



Şekil 3: ADT2-BK.

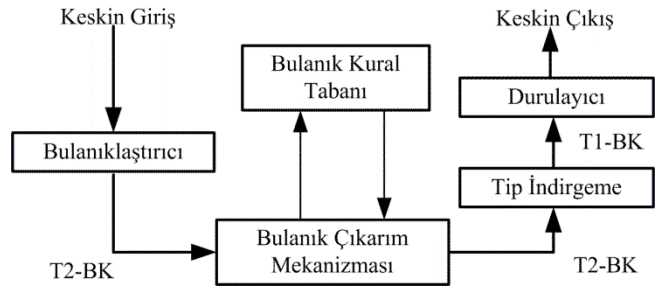
Burada $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ ve de birincil üyelik değeri $u \in J_x \subseteq [0, 1]$ aralığında bir değerdir. Sürekli bir tanım uzayında, \tilde{A} kümesi aşağıdaki şekilde ifade edilir [21].

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u), J_x \subseteq [0, 1] \quad (10)$$

Burada \int tanım uzayındaki bütün x ve u değerlerinin keşşimi ifade etmektedir. J_x , x'in birincil üyelik fonksiyonu, $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ ise x'in ikincil üyelik fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. T2-BK'sindeki (\tilde{A}) belirsizlik birincil üyelik fonksiyonundaki bir bölgede ifade edilmektedir. Belirtilen bu küme bir üst üyelik fonksiyonu $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$ ve bir alt üyelik fonksiyonu $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ ile tanımlıdır. Bu

bölge B1 olarak tanımlanmaktadır. Eğer, $\forall u \in J_x \subseteq [0, 1]$ için $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ olarak tanımlanmışsa bir Aralık Değerli T2 BK elde edilmektedir [21].

Tip-2 bulanık mantık sistemlerin kural yapısındaki öncül ve/veya sonuç önermeleri T2-BK'leriyle ifade edilmektedir [17]. Şekil 4'te gösterildiği gibi, ADT2-BMK'ün içyapısı T1 eşleniğine çok benzerdir. Tip-2 bulanık mantık sistemlerindeki tek farklılık çıkış işlem bloğunda sadece tip indirgeme mekanizmasının olmasıdır. T2 bulanık kontrolörler, EĞER-0 HALDE şeklindeki bulanık kurallardan oluşmaktadır. Tip-2 bulanık mantık sistemlerin kural yapısındaki öncül ve/veya sonuç önermeleri T2-BK'leriyle ifade edilmektedir. Sistemin çıkışını hesaplayabilmek için, ilk önce bulanıklaştırıcı bloğunda keskin veya bulanık girişler T2-BK'lara dönüştürülürler [17],[18],[21]. Daha sonra, bulanık çıkarım mekanizması tanımlanmış kuralları ve operatörleri kullanarak giriş T2 bulanık değerlerini çıkış T2 bulanık değerlerine dönüştürür. Elde edilen T2-BK çıkışları, tip indirgeme mekanizması ile T1-BK'lere dönüşürler. Tip azaltılması işlemi ile elde edilen kümeler durulayıcı mekanizması ile keskin çıkışlara dönüştürülürler [17],[18],[21],[22].



Şekil 4: ADT2-BMK'ün içyapısı.

3x3 köşegen simetrik ADT2-BPID kontrolör yapısı için, tip-2 bulanık kural aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$R_m: \text{EĞER } E \tilde{A}_{1k} \text{ ise ve } \dot{E} \tilde{A}_{2l} \text{ ise } O \text{ HALDE } U \tilde{G}_m' \text{ dir} \quad (11)$$

Burada, \tilde{A}_{1k} ve \tilde{A}_{2l} kümeleri girişler için tanımlanmış ADT2-BK'lerdir. Şekil 5'te gösterildiği gibi her ADT2-BK dört adet parametre ($l_{ij}, c_{ij}, r_{ij}, \delta_{ij}; i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) ifade edilir. Sonuç önermesinde yer alan \tilde{G}_m ($\tilde{G}_m = [g_m, \bar{g}_m]$) ise çıkış T2 bulanık dilsel terimlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada, tasarım kolaylığı açısından, öncül önermede üçgen tipi ADT-BK'ler ve de sonuç önermesinde keskin çıkış değerleri tercih edilmiştir [16]. Her bir kuralın ateşleme derecesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tilde{f}_m = [\bar{f}_m \quad \underline{f}_m] \quad (12)$$

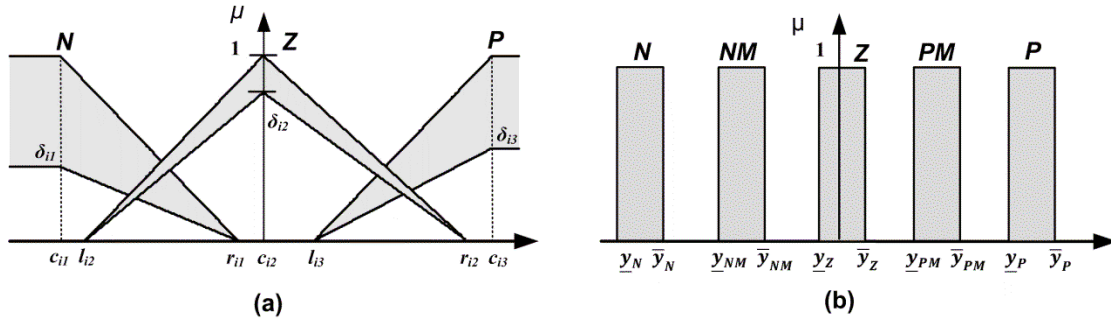
$$\underline{f}_m = \underline{\mu}_{\tilde{A}_{1k}} * \underline{\mu}_{\tilde{A}_{2l}} \quad \bar{f}_m = \bar{\mu}_{\tilde{A}_{1k}} * \bar{\mu}_{\tilde{A}_{2l}} \quad (13)$$

$\underline{\mu}_{\tilde{A}_{1k}}, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{2l}}$ ve $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{1k}}, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{2l}}$ alt ve üst üyelik fonksiyonların aitlik derecelerini ifade etmektedir.

Bir ADT2-BMK keskin çıkış değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$U = \frac{U_l + U_r}{2} \quad (14)$$

Burada, U_l ve U_r değerleri ADT2-BMK'ün genişletilmiş çıkışın sınır değerlerini temsil etmektedir. Bu değerler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 5: (a) Öncül ADT2-BK'ler (b) Sonuç ADT2-BK'leri.

3 Fonksiyon ayarlayıcı tabanlı öz ayarlama mekanizması

Literatürde T1-BPID kontrolörlerinin ölçekleme çarpanlarının çevrim içi öz ayarlanmasına yönelik yapılan çalışmalardan en önemlilerinden biri de Woo ve diğ. [8] tarafından önerilmiştir.

Fonksiyon tabanlı öz-ayarlama mekanizması içeren bu yapının blok diyagramı Şekil 6'da verilmiştir. Bu yapıda, giriş ölçekleme çarpanı K_d ve çıkış ölçekleme çarpanı K_b aşağıdaki fonksiyonlar ile çevrimiçi olarak ayarlanmaktadır:

$$K_b = f(e)K_b^0 \quad (15)$$

$$K_d = g(e)K_d^0 \quad (16)$$

Burada, K_b^0 ve K_d^0 ölçekleme çarpanlarının başlangıç değerlerini belirtmekte olup $f(e)$ ve $g(e)$ fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

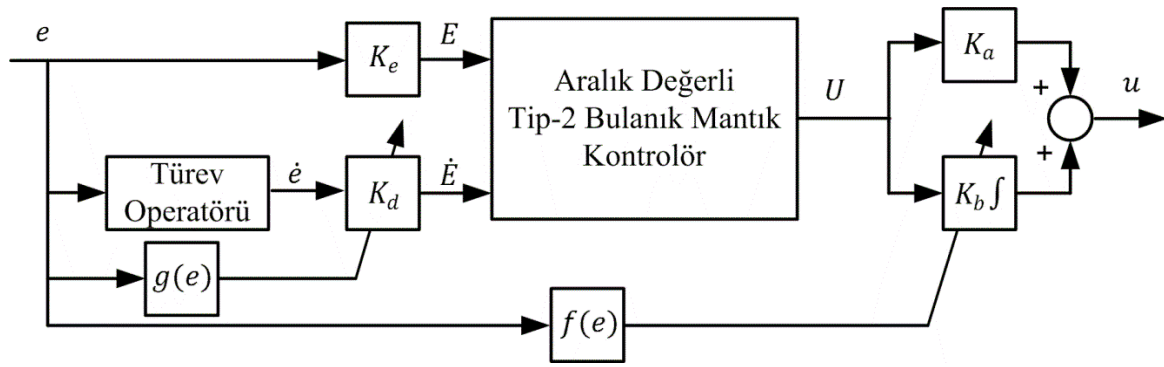
$$f(e) = a_1|e| + a_2 \quad (17)$$

$$g(e) = b_1|1 - e| + b_2 \quad (18)$$

Öte yandan bu yaklaşımla yeni tasarım parametreleri ortaya çıkmaktadır. (20) ve (21) de verilen a_1 , a_2 , b_1 and b_2 belirlenmesi yeni tasarım parametreleridir. Şekil 6'dan da görülebileceği gibi ele alınan fonksiyon ayarlayıcı yapı sadece ölçekleme çarpanlarını hata işaretine bağlı çevrimiçi ayarlamaktadır, yani ADT2-BMK'ün iç yapısındaki kurallar ve üyelik fonksiyonları sabit kalmaktadır. Bu açıdan bu öz ayarlama yöntemi kolaylıkla birçok tip-2 bulanık kontrol yapısına genişletilebileceğini söyleyebiliriz. Ayrıca, hata bilgisini tabanlı uyarlama yöntemi sayesinde, ADT2-BMK'ün farklı çalışma bölgelerinde de olası performans iyileştirmelerine olanak sağlamaktadır.

Tablo 2: Karnik-Mendel Tip İndirgeme Algoritması.

Adım	U_l hesaplama yöntemi	U_r hesaplama yöntemi
1.	\underline{g}_m ($m = 1, \dots, M$) 'yi artan bir şekilde sırala ($\underline{g}_1 \leq \underline{g}_2 \leq \dots \leq \underline{g}_M$) ve de aynı $\bar{f}_m, \underline{f}_m$ değerlerini yeni sıralamaya göre eşleştir (yeni \underline{g}_m dizisine uygun olarak).	\bar{g}_m ($m = 1, \dots, M$) 'yi artan bir şekilde sırala ($\bar{g}_1 \leq \bar{g}_2 \leq \dots \leq \bar{g}_M$) ve de aynı $\bar{f}_m, \underline{f}_m$ değerlerini yeni sıralamaya göre eşleştir (yeni \bar{g}_m dizisine uygun olarak).
2.	f_m değerini şu şekilde hesapla. $f_m = (\bar{f}_m + \underline{f}_m)/2$ ADT2-BMK'ün çıkış değerini bul. $U = \frac{\sum_{m=1}^M f_m \underline{g}_m}{\sum_{m=1}^M f_m}$	f_m değerini şu şekilde hesapla. $f_m = (\bar{f}_m + \underline{f}_m)/2$ ADT2-BMK'ün çıkış değerini bul. $U = \frac{\sum_{m=1}^M f_m \bar{g}_m}{\sum_{m=1}^M f_m}$
3.	Öyle bir L ($1 \leq L \leq M - 1$) kesme noktası bul ki, aşağıdaki eşitlik sağlansın: $\underline{g}_m \leq U \leq \underline{g}_{m+1}$	Öyle bir R ($1 \leq R \leq M - 1$) kesme noktası bul ki, aşağıdaki eşitlik sağlansın: $\bar{g}_m \leq U \leq \bar{g}_{m+1}$
4.	$f_m = \begin{cases} \bar{f}_m & m \leq L \\ \underline{f}_m & m > L \end{cases}$ olarak ata ve yeni çıkışı hesapla: $U' = \frac{\sum_{m=1}^M f_m \underline{g}_m}{\sum_{m=1}^M f_m}$	$f_m = \begin{cases} \underline{f}_m & m \leq R \\ \bar{f}_m & m > R \end{cases}$ olarak ata ve yeni çıkışı hesapla: $U' = \frac{\sum_{m=1}^M f_m \bar{g}_m}{\sum_{m=1}^M f_m}$
5.	Eğer $U = U'$ ise dur ve de $U_l = U'$ olarak ata. Eğer eşitlik sağlanmadıysa, 3. Adıma geri dön ve de $U' = U$ olarak ata.	Eğer $U = U'$ ise dur ve de $U_r = U'$ olarak ata. Eğer eşitlik sağlanmadıysa, 3. Adıma geri dön ve de $U' = U$ olarak ata.



Şekil 6: Öz Ayarlamalı ADT2-BPID kontrol yapısı.

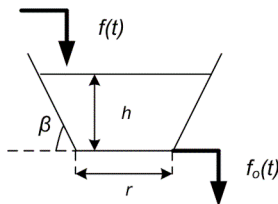
4 Benzetim çalışması

Bu bölümde, T1-BPID kontrolörleri için geliştirilen öz ayarlama yaklaşımı genişletilerek AT2-BPID kontrolörleri için kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Ortaya çıkan yeni Öz-Ayarlamalı AT2-BPID (ÖADT2-BPID) kontrolör için tasarım adımları sunulmuş ve tasarlanan kontrolör, mevcut T1 ve ADT2 eşdeğerleri ile doğrusal olmayan konik tank sistemi üzerinde karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları Matlab ortamında yapılmış olup, Taskin ve Kumbasar [22] tarafından geliştirilen ADT2-BMK araç kiti kullanılmıştır.

Şekil 7'de gösterilen konik tank sistemi, sıvı seviye kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu tank sisteminde sürekli bir sıvı girişi ve sıvı çıkışı bulunmaktadır. Tank içindeki sıvı seviyesi (h) sadece giriş vanası yardımıyla gelen sıvının akış debisi (f) ayarlanarak kontrol edilmekte, çıkışta ise sabit açıklıklı bir vana bulunmaktadır. Dolayısıyla çıkış sıvısı debisi (f_o), vanası açıklığı sabiti (k) ve tank sıvı yüksekliğine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir. Doğrusal olmayan konik tank sistemin dinamik modeli, aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{f - k\sqrt{h}}{\pi \left(r^2 + \frac{2rh}{\tan(\beta)} + \frac{h^2}{3(\tan(\beta))^2} \right)} \quad (19)$$

Burada r tankın taban yarıçapını, β ise tankın eğimini göstermektedir. Konik tank sisteminin fiziksel yapısı gereği sıvı seviyesi yükseldikçe sistemin zaman sabiti ve kazancı değiştirmektedir. Sunulacak benzetim çalışmalarında, sistem parametreleri $r = 10 \text{ cm}$, $k = 34.77$, $\beta = 60^\circ$, giriş sıvısı akış debisi $f \in [0, 300 \text{ cm}^3/\text{s}]$, tank yüksekliği ise 30 cm olarak alınmıştır.



Şekil 7: Konik tank süreci

Kontrolör tasarımları için sırasıyla T1-BPID, ADT2-BPID ve ÖADT2-BPID kontrolör serbest tasarım parametreleri belirlenmiştir. Ele alınan BPID kontrolör yapıları için 2 girişli, tek çıkışlı, 9 kurallı bir bulanık sistem yapısı tercih edilmiştir.

Kontrolör tasarımlarında, doğrusal olmayan konik tank sisteminin sıvı seviye referansının 10 cm 'den 15 cm 'ye ($\Delta R = 5$) çıktığı senaryo ele alınmıştır. Bu bağlamda T1-BPID kontrolör tasarımı için ölçekleme çarpanları uygun bir sistem cevabı sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$K_e = \frac{1}{\Delta R} = 0.2, K_d = \frac{15}{\Delta R} = 3, K_a = 40, K_b = 17 \quad (20)$$

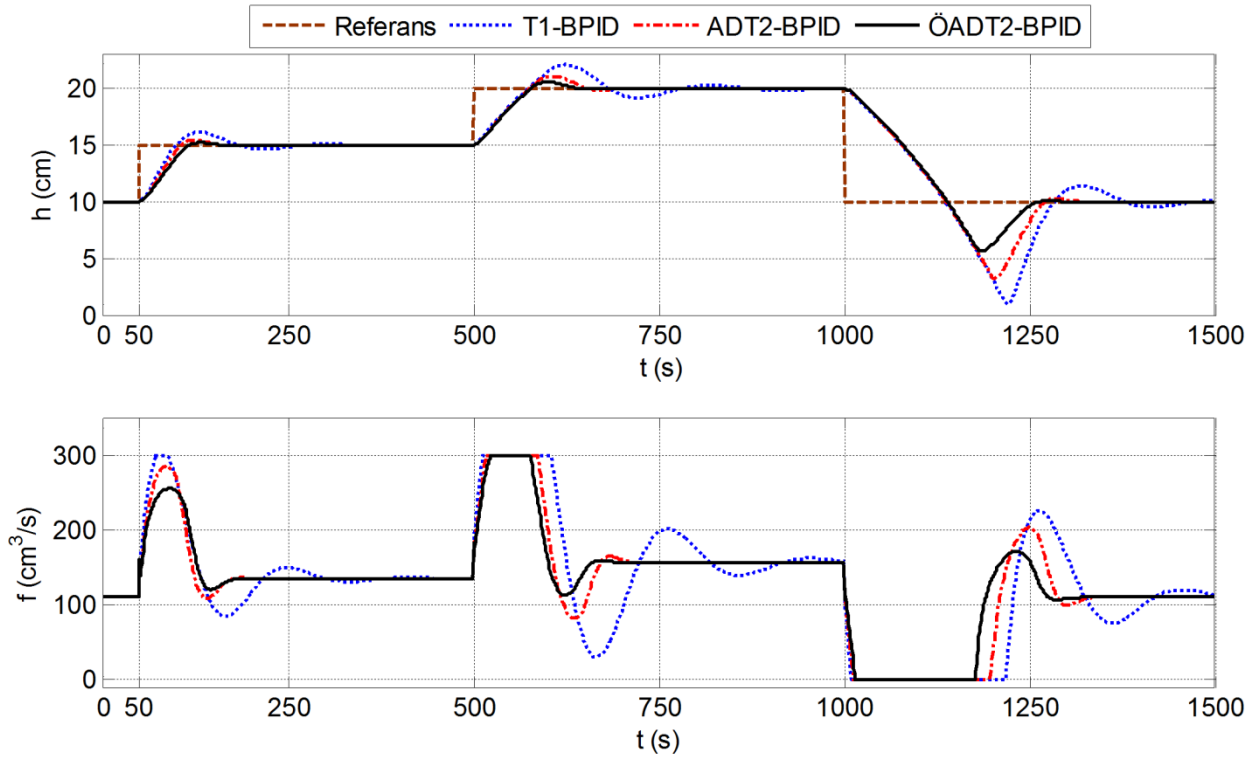
ADT2-BPID kontrolör tasarımı için, önceki tasarım adımında T1-BPID kontrolör için elde edilen ölçekleme çarpanları sabit tutulup, Bİ parametreleri ayarlanarak sistem performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda Bİ parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\begin{aligned} m_N^E &= m_Z^E = m_P^E = 0.6 \\ m_N^{AE} &= m_Z^{AE} = m_P^{AE} = 0.1 \end{aligned} \quad (21)$$

ÖADT2-BPID kontrolör tasarımı için, önceki tasarım adımlarında T1-BPID ve ADT2-BPID kontrolörler için elde edilen ölçekleme çarpanları ve Bİ parametreleri sabit tutulup, ÖADT2-BPID kontrolörün ölçekleme çarpanları fonksiyon ayarlayıcı öz-ayarlama yöntemiyle çevrimiçi ayarlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla (20) ve (21)'de verilmiş olan fonksiyonların katsayıları sürekli halde ilk parametreleri sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi optimize edilmiştir:

$$a_1 = 0.01, \quad a_2 = 1, \quad b_1 = -0.2, \quad b_2 = 1.2 \quad (22)$$

Benzetim çalışmasında kontrolörler tasarlandıkları çalışma bölgesi dışındaki 2 farklı çalışma bölgesi için de değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Ayrıca, (19) ve (20)'de verilmiş olan öz ayarlama fonksiyonların çıkış değerleri Şekil-9'da sunulmuştur. Şekil 8'de görüldüğü gibi, ADT2-BPID yapısı T1-BPID yapısından daha iyi bir sonuç vermiştir. Bu açık bir şekilde T2-BK'lerin sağladığı ekstra serbestlik derecesinin kontrol performansı üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Ayrıca, önerilen ÖADT2-BPID kontrolör yapısı, T1 ve ADT2-BPID kontrolör eşdeğerlerine kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Önerilen ÖADT2-BPID kontrolör yapısı hem içyapısındaki fazladan serbestlik derecesi hem de fonksiyon ayarlayıcı öz-ayarlama yöntemi ile farklı çalışma noktalarında başarılı sonuçlar verilmiştir. Konik tank sistemi için ÖADT2-BPID kontrolörün tercih edilmesi halinde sistem, daha hızlı ve az aşımli bir performansa sahip olmaktadır.



Şekil 8: Bulanık kontrolörlerin performanslarının farklı çalışma noktalarında incelenmesi.

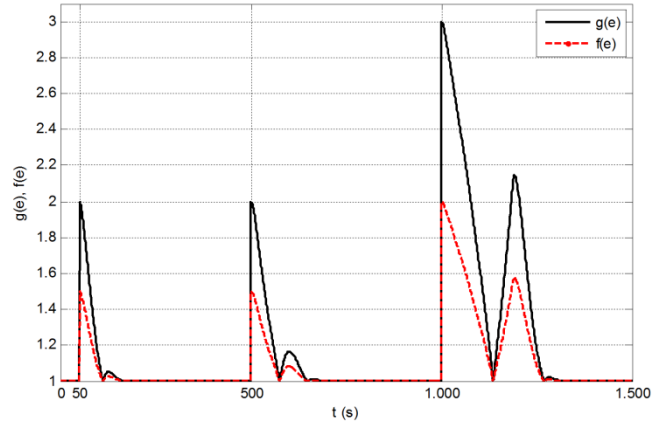
5 Sonuçlar

Bu çalışmada, ADT2-PID kontroler yapılarının içyapıları incelenmiş olup, fonksiyon tabanlı bir öz-ayarlar yöntemi ADT2-BPID kontrolörleri için uyarlanmıştır. Bu çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar, T2-BK'lerin ve de önerilen öz-ayarlar yaklaşımının getirilerini açıkça ortaya koymaktadır. Önerilen öz-ayarlar yaklaşımının ve de ADT2-BK'lerin faydasını göstermek için bir benzetim çalışması sunulmuştur. Bu çalışmada, ÖADT2-BPID yapısı geleneksel T1-BPID ve de ADT2-BPID yapıları ile doğrusal olmayan bir konik tank sistemi üzerinde karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında, kontrolör yapılarının farklı çalışma noktalarındaki performansını da değerlendirmiştir. Sunulan sonuçlar ışığında, ADT2-BPID kontrol yapısının geleneksel T1-BPID yapısına kıyasla doğrusal olmayan sistemin kontrolünde daha başarılı bir performans sergilediği gözlenmiştir. Ayrıca, önerilen öz ayarlama yapısı sayesinde ADT2-BPID kontrolörlerinin geçici hal davranışları iyileştirilmiştir. Önerilen öz ayarlamalı T2 bulanık kontrol yapısı aşım değerini ADT2-BPID kıyasla farklı çalışma noktalarında başarıyla azaltılmıştır.

Sonuç olarak önerilen öz ayarlama mekanizması ve ADT2-BK'lerin, özellikle doğrusal olmayan dinamikler içeren sistemlerin kontrolünde etkili yöntemler olduğu söylenebilir. İleriye yönelik planlanan çalışmalarda, endüstriyel ölçekli süreçler üzerinde deneylerin yapılması vardır.

6 Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından EEEAG kapsamında desteklenmiştir. Araştırma projesini (113E206) destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.



Şekil 9: Öz ayarlama fonksiyonların çıkış değerlerin değişimi.

7 Kaynaklar

- [1] Galichet S, Foulloy L. "Fuzzy controllers: synthesis and equivalences". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 3(2), 140-148, 1995.
- [2] Huang TT, Chung HY, Lin JJ. "A fuzzy PID controller being like parameter varying PID". *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Seoul, South Korea, 22-25 August 1999.
- [3] Qiao WZ, Mizumoto M. "PID type fuzzy controller and parameters adaptive method". *Fuzzy Sets and Systems*, 78(1), 23-35, 1996.
- [4] Li HX, Gatland HB. "Conventional fuzzy control and its enhancement". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B*, 26(5), 791-797, 1996.
- [5] Duan XG, Li HX, Deng H. "Effective tuning method for fuzzy PID with internal model control". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 8317-8323, 2008.

- [6] Hu B, Mann GKI, Gasine RG. "New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7(5), 521-539, 1999.
- [7] Mudi RK, Pal NR. "A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7(1), 2-16, 1999.
- [8] Woo ZW, Chung HY, Lin JJ. "A PID-type fuzzy controller with self-tuning scaling factors". *Fuzzy Sets and Systems*, 115, 321-326, 2000.
- [9] Ahn KK, Truong DQ. "Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter". *Journal of Process Control*, 19, 1011-1023, 2009.
- [10] Karasakal O, Guzelkaya M, Eksin I, Yesil E, Kumbasar T. "Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighting based on normalized acceleration". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 184-197, 2013.
- [11] Wu D, Tan WW. "Interval Type-2 Fuzzy PI Controllers: Why They Are More Robust". *IEEE International Conference on Granular Computing*, San Jose, USA, 14-16 August 2010.
- [12] Wu D. "On the Fundamental Differences between Type-1 and Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(5), 832-848, 2012.
- [13] Hagrass H. "A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12(4), 524-539, 2004.
- [14] Kumbasar T. "A simple design method for interval type-2 fuzzy PID controllers". *Soft Computing*, 18(7), 1293-1304, 2014.
- [15] Yesil E. "Interval type-2 fuzzy PID load frequency controller using Big Bang-Big Crunch optimization". *Applied Soft Computing*, 15, 100-112, 2014.
- [16] Kumbasar T, Hagrass H. "Big Bang-Big Crunch optimization based interval type-2 fuzzy PID cascade controller design strategy". *Information Sciences*, 282, 277-295, 2014.
- [17] Kumbasar T, Hagrass H. *An Overview on Interval Type-2 Fuzzy PID Controllers*. Editors: Kacprzyk J, W. Pedrycz W. Handbook of Computational Intelligence, 285-293, Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2015.
- [18] Castillo O, Melin P. *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*, Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2008.
- [19] Kumbasar T, Hagrass H. "A Self-Tuning zSlices based General Type-2 Fuzzy PI Controller". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(4), 991-1013, 2015.
- [20] Kumbasar T, Hagrass H. "A Gradient Descent Based Online Tuning Mechanism for PI Type Single Input Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers". *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Istanbul, Turkey, 2-5 August 2015.
- [21] Liang Q, Mendel JM. "Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(5), 535-550, 2000.
- [22] Taskin A, Kumbasar T. "An open source Matlab/Simulink Toolbox for Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems". *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, Cape Town, South Africa, 7-10 December 2015.