

PID Parametrelerinin Ayarlama Yöntemleri: 2. Derece Sistem Modeline Uygulanması ve Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi**

Gökçen GİDEMEN¹, Murat FURAT^{*2}

¹Atlas Enerji, İskenderun/Hatay

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İskenderun/Hatay

Geliş tarihi: 15.12.2015

Kabul tarihi: 31.12.2015

Özet

PID denetleyiciler, özellikle ayarlanacak parametrelerinin az olması ve yüksek başarımlı nedeniyle negatif geri beslemeli kontrol sistemlerinde tercih edilmektedir. Literatürde, PID parametrelerinin ayarlanmasına yönelik çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler, denetleyicinin bağlanacağı sistemin çıkışından elde edilen karakteristiğe bağlı olarak parametrelerinin ayarlanması için çeşitli yaklaşımları içermektedir.

Bu çalışmada, literatürde önerilen ayarlama yöntemleri 2. derece bir sistem modeli üzerine uygulanmıştır. Elde edilen PID parametreleri kapalı çevrim sisteme uygulandığında, sistemin verdiği geçici hal ve kararlı hal çıkışlarına göre başarımları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: PID denetleyici, Ayarlama yöntemleri, PID başarımları

PID Parameters Tuning Methods: Application to Second-Order System and Evaluation with Comparison

Abstract

PID controllers are preferred for negative-feedback control systems since they have less parameter to be adjusted and high performance. In the literature, various methods were proposed on the adjustment of PID parameters. The methods include some approaches based on the output characteristics of the system.

In the present study, the adjustment methods are applied to a second-order system model. The transient-state and steady-state output performance of the system are compared when the parameters are applied to the closed-loop system.

Keywords: PID controller, Tuning methods, PID performance

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat Furat, İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, mforat@mku.edu.tr

**Bu çalışmanın ön sunumu 14-16 Mayıs 2015 tarihlerinde Adana'da gerçekleştirilen 1. Endüstriyel Otomasyon Kongresi ve Sergisi'nde yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Kontrol, endüstrinin en temel öğelerindedir. Endüstriyel alanda kaliteli ve istenilen düzeyde ürün elde edebilmek, bu sürecin sürekliliğini kalite ile birlikte sağlamak için kontrole yüksek önem verilmektedir. Kontrol, sadece endüstride değil günlük yaşamımızda da yer alır: asansörler, klimalar, otomatik kapılar, ısıtıcı ve soğutucular bunlardan birkaçı olarak sayılabilir. Günümüzde genel olarak insan gücünden bağımsız sistemler kullanılmaktadır. Bu durum kontrol sistemleri ile donatılmış otomasyonun gelişimiyle oluşan bir durumdur. Dolayısıyla kontrol, fabrikalarda, santrallerde, çeşitli işletmelerde, hayatımızın her yerinde kullanılmaktadır [1, 2].

Negatif geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sistemlerinde sıklıkla tercih edilen PID denetleyici var olan hata miktarına bağlı olan Oransal (P), geçmiş hata genliğinin toplamını oluşturan Türevsel (D) ve gelecekteki hata genliğinin tahminini temsil eden İntegral (I) parametrelerinden oluşur [1, 3]. Bu üç parametrenin belirli ağırlıklarla toplamından elde edilen kontrol sinyali, kontrol edilecek sisteme uygulandığında elde edilen çıkış oldukça başarılı sonuçlanabilmektedir [4]. Bu nedenle, hem endüstriyel alanda hem de günlük alanda önemli yer tutmaya başlayan PID denetleyicinin parametrelerinin ayarlanmasına yönelik oldukça fazla çalışma literatürde yer almaktadır [5].

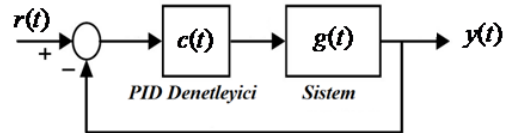
PID parametrelerinin ayarlanmasına yönelik yapılan çalışmalarda önerilen yöntemlerin önemli kısmının ortak özelliği, parametrelerin belirlenmesinde sistemin açık çevrim ve kapalı çevrimde gösterdiği çıkış karakteristiğinin kullanılmasıdır [2,4]. Bu yöntemlerin diğer bir özelliği de kolay uygulanabilir olmasıdır.

2. YÖNTEM

2.1. PID Denetleyici

Şekil 1'deki negatif geri beslemeli bir kontrol sistemi düşünüldüğünde, PID denetleyicinin girişi istenilen ayar noktası ile kontrol edilen sistemin

çıkışı arasındaki fark olarak elde edilen "hata" değeridir. Denetleyici, hata miktarına ve değişimine bağlı olarak ürettiği kontrol girişi ile hatayı en aza indirerek istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır [3].



Şekil 1. Negatif geri beslemeli kontrol sistemi

Literatürde, yaygın olarak kullanılan PID denetleyicisi için transfer fonksiyonları Denklem (1) ve Denklem (2)'de, bunların Laplace dönüşümleri Denklem (3) ve Denklem (4)'de verilmiştir.

$$c(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

$$c(t) = k_p \left[e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2)$$

Burada, $e(t)$ zaman bağlı olarak değişen hata fonksiyonu, $e(t) = r(t) - y(t)$, $r(t)$ istenilen ayar noktası değeri, $y(t)$ kontrol edilen sistemin çıkışı, k_p , k_i ve k_d sırasıyla oransal, integral ve türev terimlerinin kazançları yani ayarlanacak PID parametreleridir. PID denetleyiciyi oluşturan oransal terim $(k_p e(t))$ hata miktarına ve kazancına bağlı olarak ürettiği kontrol sinyali ile sistemin statik doğruluğunu ve dinamik cevabını artırır. Hata birikiminin ve kazancının fonksiyonu

olan integral terimi $\left(k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$ PID'ye sürekli

hal doğruluğunu arttıran özellik kazandırır, sürekli hal hatasını yok eder. Türevsel terim $\left(k_d \frac{d}{dt} e(t) \right)$

ise hatanın değişme hızına ve kazancına bağlı olarak denetleyicinin dinamik cevabının hızını artırır. Hatanın sabit olma durumunda, türevsel terim çıkış üretmez [6]. denklem (1) ve denklem (2)'nin Laplace dönüşümleri sırasıyla denklem (3) ve denklem (4)'de verilmiştir.

$$C(s) = k_p E(s) + k_i \frac{1}{s} E(s) + k_d s E(s) \quad (3)$$

$$C(s) = k_p \left[E(s) + k_i \frac{1}{s} E(s) + k_d s E(s) \right] \quad (4)$$

PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasında yoğun olarak tercih edilen sistem modeli Denklem (5)'de verilen birinci derece ölü zamanlı (First-Order Plus Dead-Time, FOPDT) sistem modelidir.

$$G(s) = \frac{K e^{-t_d s}}{\tau s + 1} \cong \frac{K}{(\tau s + 1)(t_d s + 1)} = \frac{C}{s^2 + A s + B} \quad (5)$$

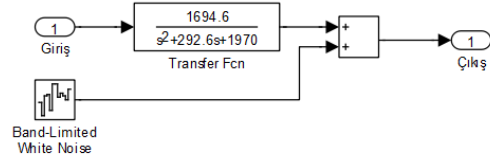
Burada τ sistemin zaman sabiti, t_d ölü zaman, $t_d \ll \tau$ ve K ise sistemin kazancıdır.

2.2. PID Parametreleri Ayarlama Yöntemleri

Bu çalışmada, kolaylığı ve uygulanabilirliği açısından değerlendirildiğinde literatürde öne çıkan, sistemin açık çevrim ve kapalı çevrim cevabına dayalı yöntemler ele alınmıştır. Ele alınan yöntemlerde sadece PID denetleyici değil ayrıca sadece P ve PI denetleyiciler ile PD için de parametrelerin bulunmasına yönelik öneriler bulunmaktadır. Bu çalışmadaki denetlenen sistem (Şekil 2), bir elektromekanik sistem modelidir [7]. Seçilen sistemde eyleyici olarak bir DC motor bulunmakta, sensör olarak motorun miline bağlı bir takojeneratör kullanılmakta ve mil hızıyla doğru orantılı olarak gerilim üretilmektedir. DC motor hızının armatürüne uygulanan gerilim ile kolaylıkla değiştirilebilmesinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmakta olduğundan deneysel çalışmada eyleyici olarak DC motorun bulunduğu bir sistemin seçilmiştir. Sistemin transfer fonksiyonu, Şekil 2'de de verildiği gibi,

$$G(s) = \frac{1694,6}{s^2 + 292,6s + 1970} \quad \text{olarak literatürden}$$

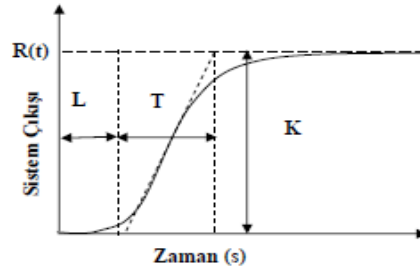
alınmış, gerçek sisteme yakın cevap elde etmek amacıyla çıkış sinyaline genliği sınırlı bir gürültü sinyali eklenmiştir. Şekil 2'de verilen sistemi denetleyecek PID denetleyicisinin parametrelerinin en uygun değerlerini bulmak amacıyla aşağıdaki yöntemler ele alınmıştır.



Şekil 2. Denetlenen sistem

2.2.1. Açık Çevrim Ziegler – Nichols Yöntemi

Sisteme uygulanan basamak girişine verdiği çıkış eğrisinin maksimum tırmanma noktasında teğet çizilir. Teğetin x eksenini kestiği nokta ile $x=0$ arası ölü zamanı (L), aynı nokta ile referans değeri ve teğetin kesiştiği noktadan x eksenine indirilen dikmenin kesiştiği nokta arasındaki fark ise zaman sabitini (T) verir (Şekil 3) [8,9]. Elde edilen T ve L değerleri ile Çizelge 1'deki kurallardan faydalanılarak denetleyici parametreleri bulunur.



Şekil 3. Sistemin açık çevrim basamak cevabı eğrisi

Çizelge 1. Açık çevrim Ziegler-Nichols PID parametreleri ayarlama kuralları

Denetleyici Türü	K_p	$T_i (1/K_i)$	$K_d (T_d)$
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

2.2.2. Kapalı Çevrim Ziegler-Nichols Yöntemi

Bu yöntem negatif geri beslemeli kontrol sisteminin (Şekil 1) basamak girişi ile sürekli salınımda test edilmesine dayanır. Başlangıç olarak PID denetleyicide integral ve türev terimleri kazançları sıfır yapılarak devre dışı bırakılır ve

denetleyicinin sadece oransal etki ile çalışması sağlanır. Sistemin girişine bir basamak girişi uygulanır ve K_p kazancı sıfırdan başlayarak sistemin çıkışında sürekli ve aynı genlikte salınım elde edilinceye kadar artırılır [8,9]. Sürekli salınımı veren K_p kazancı K_u ve sürekli salınım periyodu saniye cinsinden P_u olarak tespit edilir. Çizelge 2’de verilen kurallara bu değerler yerine konularak PID parametreleri bulunur.

Çizelge 2. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols PID parametreleri ayarlama kuralları

Denetleyici Türü	K_p	$T_i(1/K_i)$	$K_d(T_d)$
P	$0,5K_u$	∞	0
PI	$0,45K_u$	$1/1,2P_u$	0
PID	$0,6K_u$	$0,5P_u$	$0,125P_u$

2.2.3. Cohen-Coon Ayarlama Yöntemi

Bu ayarlama yönteminde ilk olarak sistemin basamak cevabı eğrisi elde edilir. Sistem çıkışının sürekli hal değerinin %28,3’üne ulaştığı zaman (t_1) ile %63,2’sine ulaştığı zaman (t_2) tespit edilir [10]. Bu değerler ile $\zeta_m = \frac{3}{2}(t_2 - t_1)$, $d = t_2 - \zeta_m$

Çizelge 3. Cohen -Coon PID parametreleri ayarlama kuralları

Denetleyici Türü	K_p	$T_i(1/K_i)$	$K_d(T_d)$
P	$\frac{\zeta_m}{K_m d} \left(1 + \frac{d}{3\zeta_m}\right)$	-	-
PI	$\frac{\zeta_m}{K_m d} \left(\frac{9}{10} + \frac{d}{12\zeta_m}\right)$	$d \frac{30+3d/\zeta_m}{9+20d/\zeta_m}$	-
PD	$\frac{\zeta_m}{K_m d} \left(\frac{5}{4} + \frac{d}{12\zeta_m}\right)$	-	$d \frac{6-2d/\zeta_m}{22+3d/\zeta_m}$
PID	$\frac{\zeta_m}{K_m d} \left(\frac{4}{3} + \frac{d}{4\zeta_m}\right)$	$d \frac{32+6d/\zeta_m}{13+8d/\zeta_m}$	$d \frac{4}{11+2d/\zeta_m}$

2.2.6. ¼ Bozunma Oranlı Ayarlama Yöntemi

Kapalı çevrim Ziegler-Nichols yönteminde olduğu gibi integral ve türevsel terimin kazancı sıfır yapıp oransal kazanç sistemin çıkış salınım genliğinin ¼ oranında bozunmaya uğramasını

değerleri ve sistemin çıkışının sürekli hal değerine oranı, yani kazancı, $K_m = \frac{y_{ss}(t)}{r(t)}$, hesaplanır. Daha sonra Çizelge 3 kullanılarak PID parametreleri hesaplanır.

2.2.4. Chien – Hrones – Reswick Ayarlama Yöntemi

Chien – Hrones – Reswick (CHR) yönteminde PID parametreleri sistemin açık çevrim basamak cevabından faydalanılarak elde edilmektedir. L (ölü zaman), T (zaman sabiti), K (kazanç) ve $a=KL/T$ kullanılarak parametrelerin hesaplanmasını gösteren kurallar Çizelge 4’de referans regülasyonu için, Çizelge 5’de ise bozucu etkisini durdurmak için verilmiştir [11,12].

2.2.5. Wang – Juang – Chan Ayarlama Yöntemi

Önceki yöntemlerde olduğu gibi K , L ve T bilinmesi durumunda, Wang – Juang – Chan yöntemi ile sadece PID denetleyici için parametrelerinin hesaplanması Çizelge 6’da verilen kurallara göre yapılmaktadır [11,13].

gösterene kadar artırılır. Bu aşamada elde edilen oransal kazanç K_{max} ve salınım periyodu da T_u olarak tespit edilir ve PID denetleyici parametreleri için Çizelge 7 kullanılır.

Çizelge 4. CHR yöntemi ile PID parametreleri ayarlama kuralları (referans regülasyonu)

Denetleyici Türü	%0 Aşım ile			%20 Aşım ile		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	$0,3/a$	-	-	$0,7/a$	-	-
PI	$0,35/a$	$1,2T$	-	$0,6/a$	T	-
PID	$0,6/a$	T	$0,5L$	$0,95/a$	$1,4T$	$0,47L$

Çizelge 5. CHR yöntemi ile PID parametreleri ayarlama kuralları (bozucu etkisini durduran)

Denetleyici Türü	%0 Aşım ile			%20 Aşım ile		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	$0,3/a$	-	-	$0,7/a$	-	-
PI	$0,6/a$	$4L$	-	$0,7/a$	$2,3L$	-
PID	$0,95/a$	$2,4L$	$0,42L$	$1,2/a$	$2L$	$0,42L$

Çizelge 6. Wang – Juang – Chan yöntemi ile PID parametreleri ayarlama kuralları

Denetleyici Türü	K_p	T_i	T_d
PID	$(0,7303+0,5307\frac{T}{L})(T+0,5L)$	$T+0,5L$	$0,5LT/(T+0,5L)$

Çizelge 7. ¼ Bozunma Oranlı ayarlama yöntemi ile PID parametreleri ayarlama kuralları

Denetleyici Türü	K_p	T_i	T_d
P	K_{max}	-	-
PI	$0,45K_{max}$	$T_u/1,2$	-
PID	K_{max}	$T_u/1,5$	$T_u/6$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada, sistemin açık çevrim cevabı için giriş $u(t) = 5,21V$ verilmiş ve sistemin sürekli hal çıkışı $y_{ss} = 4,48V$ ve DC motorun milinin dönme hızı 1200dev/dk olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, kapalı çevrimde istenen referans değeri $r(t) = 4,48V$ olarak uygulanmıştır.

Açık çevrim Ziegler–Nichols yöntemi için $L = 0,06$ ve $T = 0,16$ bulunmuştur. Buna göre, Denklem (4) ile gösterilen PID transfer fonksiyonuna Çizelge 1'deki kurallar uygulandığında elde edilen başarımlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Kapalı çevrim Ziegler–Nichols için $K_u = 196,501$ ve periyot $P_u = 0,09s$ olarak tespit edilmiştir. Elde

edilen bu değerler Çizelge 2'de yerine konulduğunda PID denetleyicisinin başarımları Çizelge 9'da verildiği gibi gerçekleşmiştir.

Cohen-Coon ayarlama yöntemi için sistemin sürekli hal değerinin %28,3'üne ulaştığı zaman $t_1 = 0,052s$ ve %63,2'sine ulaştığı zaman $t_2 = 0,149s$ olarak bulunmuştur. Buradan $\xi_m = 0,145$, $d = 0,04$ ve $K_m = 0,86$ olarak hesaplanan değerler

Çizelge 3'de yerine konularak PID parametreleri elde edilmiş ve başarımları Çizelge 10'da verilmiştir. CHR ile parametrelerin hesabı için gerekli K , T ve L bilindiğinden $a = 0,32$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4 ve Çizelge 5 ile elde edilen PID denetleyicilerinin başarımları Çizelge 11'de verilmiştir. Wang-Juang-Chan ayarlama yöntemi için gerekli olan $L = 0,06$ ve $T = 0,16$ değerleri kullanıldığında elde edilen denetleyicinin başarımları Çizelge 12'de olduğu ölçülmüştür. Sistemin çıkış salınım genliğinin ¼ oranında bozunmaya uğramasını gösteren oransal kazanç $K_{max} = 190$ ve salınım periyodu $T_u = 0,075s$ olarak bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 7'de yerine konulduğunda elde edilen başarımlar Çizelge 13'de verilmiştir.

Çizelge 8. Açık Çevrim Ziegler-Nichols başarımlar değerlendirilmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
P	115	14	6,8	0,18	0,070
PI	105	41	6,7	0	1,290
PID	396	41	6,3	0	1,444

Çizelge 9. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols başarımlar değerlendirilmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
P	6	26	4	0,06	1,320
PI	5,7	25	3,1	0	1,450
PID	17,8	100	8	0	0,670

Çizelge10. Cohen – Coon başarımlar değerlendirilmesi.

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
P	7	-	6	0,13	0,570
PI	8,1	-	5,4	0,13	0,494
PD	7,9	17	5,2	0,10	0,372
PID	6,4	24,8	4,2	0	1,695

Çizelge 11a. Chien – Hrones – Reswick başarımlar değerlendirilmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
<i>Referans regülasyon için % 0 aşım ile</i>					
P	-	-	14,9	0,50	-
PI	45,5	-	13,3	0,38	-
PID	27,8	-	9,8	0,25	-

Çizelge 11b. Chien – Hrones – Reswick başarımlar değerlendirilmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Gecikme zamanı (s)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
<i>Referans regülasyon için % 20 aşım ile</i>					
P	13,5	-	8	0,23	-
PI	17	-	8,5	0,26	-
PID	16,5	-	7,7	0,16	-

Çizelge 11c. Chien – Hrones – Reswick başarımlar değerlendirilmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
<i>Bozucu etkiyi durduran % 0 aşım ile</i>					
P	-	-	14,9	0,50	-
PI	16,8	-	8,5	0,26	-
PID	16	-	8	0,17	-

Çizelge 11d. Chien – Hrones – Reswick başarımlı değerlendirmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
<i>Bozucu etkiyi durduran % 20 aşım ile</i>					
P	13,5	-	8	0,23	-
PI	13,5	-	8	0,23	-
PID	12,6	18	7	0,13	-

Çizelge 12. Wang – Juang – Chan başarımlı değerlendirmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Gecikme zamanı (s)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
PID	10,255	15,65	0,0149	0,50	-

Çizelge 13. ¼ bozunma oranlı ayarlama yöntemi için başarımlı değerlendirmesi

Denetleyici türü	Yükselme zamanı (ms)	Yerleşme zamanı (ms)	Gecikme zamanı (ms)	Sürekli hal hatası (Volt)	Aşım (Volt)
P	15	165	14	0,02	2,22
PI	6,6	26	3,5	0,06	1,293
PID	30	40	9,7	0,02	-

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Sadece P terim ile denetleyici kullanıldığında sürekli hal hatası oluştuğu bu çalışmadaki sonuçlar ile bir daha doğrulanmıştır. Açık çevrim ve kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemlerinde PI ve PID denetleyicilerdeki integral terimi sürekli hal hatası sıfıra düşerken diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlarda az da olsa sürekli hal hatası gözlenmiştir. Wang-Juang -Chan ayarlama yöntemi dışındaki yöntemlerde yükselme ve yerleşme zamanı kabul edilebilir düzeyde gerçekleşmesine rağmen Wang-Juang-Chan yöntemiyle elde edilen parametreler sonucu sistemin sürekli hale geçmesi 15 saniyeden uzun sürmüştür ve 200 sn. süren deney sonunda bile sistemin çıkışında sürekli hal hatası ölçülmüştür. Yerleşme zamanı olarak referans değerinin $\pm\%5$ aralığı düşünöldüğünde, kısa süreli (2s) yapılan deneysel çalışmaların çoğunda CHR yöntemi ve Wang-Juang-Chan yöntemi ile PID kullanıldığında, sistem çıkışının bu süre içinde yerleşme aralığına girmediği görölmekle beraber hiç aşım gözlemlenmemiştir. En yüksek aşım Cohen-Coon ayarlama yöntemi ile yapılan deneylerde PID çıkışında oluşmuştur. Bu çalışma ile literatürde önerilen PID ayarlama yöntemleri detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen

sonuçlar düşünöldüğünde, çalışmaya konu olan yöntemlerin en uygun PID parametrelerinin bulunmasında başarılı birer yaklaşım olarak değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Endüstriyel uygulamalarda PID denetleyicinin yaygın olarak kullanılmasına rağmen uygulamalardaki bozucu, belirsizlik veya modellenemeyen diğer etkenlerden dolayı bu çalışmadaki yöntemlerle elde edilen parametreler ile kullanılan PID denetleyici yeterli performans vermeyebilir. Bu nedenle, daha iyi performans elde etmek için bulunan parametrelerin üzerinde elle ayar yapmak gerekebilir.

Uygun PID parametrelerinin bulunması konusunda yol gösterici özelliği ile bu yöntemler tavsiye edilse de yöntemlerin uygulanması aşamasında malzeme, enerji ve zaman kaybı kaçınılmazdır. Özellikle kapalı çevrim Ziegler- Nichols yöntemi bazı sistemler için sakıncalı olabilir. Sürekli salınım, ölü zamanı olmayan veya çok az olan sistemlerde elde edilemeyebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Dutta, R., Kumar, N., Pankaj, D., 2014. PID Control for Ambulatory Gait Orthosis:

- Application of Different Tuning Methods, Advances in Biomedical Engineering Research (ABER), Cilt: 2, 44-49.
2. Shahrokhi, M., Zomorodi, A., 2013. Comparison of PID Controller Tuning Methods, Department of Chemical & Petroleum Engineering Sharif University of Technology.
 3. <http://tr.wikipedia.org/wiki/PID>, Son Erişim: 27.03.2015.
 4. Rao, P. V. G. K., Subramanyam, M. V., Satyaprasad, K., 2014. Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques, International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies, ICCICCT, India, 1411-1417.
 5. Tan, W., Liu, J., Chen, T., Marquez, H. J., 2006. Comparison of Well-known PID Tuning Formulas, Computers and Chemical Engineering, Cilt: 30, 1416-1423.
 6. Ömürlü, V. E., 2014. PID Kontrol Matematiği Doğru Akım Motoru Üzerinde Uygulama, <http://www.yildiz.edu.tr/~omurlu/CF/OKI/12.pdf>
 7. Furat, M., Eker, İ., 2012. Experimental Evaluation of Sliding-Mode Control Techniques, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, Cilt: 27(1), 23-37.
 8. Ziegler, J. G., Nichols, N. B., 1993. Optimum settings for automatic controllers." Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Cilt: 115.2B, 220-222.
 9. Skogestad, S., 2003. Simple Analytic Rules for Model Reduction And PID Controller Tuning, Journal of Process Control, Cilt: 13(4), 291-309.
 10. Srinivas, P., Lakshmi, K. V., Kumar, V. N., 2014. A Comparison of PID Controller Tuning Methods for Three Tank Level Process, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Cilt: 3(1), 6810-6920.
 11. Sheel, S., Gupta, O., 2012. New Techniques of PID Controller Tuning of a DC Motor-Development of a Toolbox, MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering, Cilt: 2(2), 65-69.
 12. Raut, K. H., Vaishnav, S. R., 2014. Performance Analysis of PID Tuning Techniques Based on Time Response Specification, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, Cilt: 2(1), 616-619.
 13. Vatansever, F., Şen, D., 2013. Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simulatörü Tasarımı, Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering, Cilt: 18(2), 7-18.