

# Kablosuz Sıcaklık Kontrolü İçin PID Ayarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Adnan ALDEMİR, Hale HAPOĞLU

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Ankara, Türkiye

(Geliş / Received : 02.03.2015 ; Kabul / Accepted : 16.06.2015)

## ÖZ

Bu çalışmada bir proses simülöründe, PID algoritmasının kullanıldığı üç farklı parametre ayarlama yöntemi ile kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirildi. Aynı koşullarda, üç farklı set noktası için yapılan kablosuz kontrol deneylerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Temel İşlemler Laboratuvarında bulunan simülör ile Proses Kontrol Laboratuvarında bulunan bilgisayar arasındaki veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kuruldu. Kablosuz deneyler MATLAB/Simulink programı yardımıyla on-line olarak gerçekleştirildi. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2.4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirildi. Cohen-Coon ve Ziegler-Nichols yöntemleri için gerçekleştirilen dinamik deneylerde sisteme uygulanan basamak etki sonucu proses reaksiyon eğrisi hazırlandı. Reaksiyon eğrisinden elde edilen ölü zaman, zaman sabiti ve kazanç değerleri sırasıyla 33s, 367s ve 0.4 olarak belirlendi. Cohen-Coon yöntemi ile  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  katsayıları sırasıyla 37.7, 78.3s, 11.8s olarak belirlendi. Bu yöntemle farklı set noktaları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde genel olarak ısıtıcının başlangıçtan itibaren açık-kapalı şeklinde ve düzensiz çalıştığı gözlemlendi ve bu yöntemle elde edilen katsayıların kablosuz sıcaklık kontrolünde etkili olmadığı anlaşıldı. Ziegler-Nichols yöntemi ile  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  katsayıları sırasıyla 0.412, 66.0s, 16.5s olarak belirlendi. Bu yöntem ile kablosuz sıcaklık kontrolünde, sıcaklıkların istenilen set değerlerine ulaştığı ve bu sıcaklıklardan 1°C'lik offset olduğu gözlemlendi. Deneme-yanılma yöntemi ile  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  katsayıları sırasıyla 0.21, 20.0s, 4.5s olarak belirlendi. Bu yöntem ile sıcaklık kontrolünde ise sıcaklıkların offset olmaksızın istenilen set değerlerine ulaştığı ve farklı set noktaları için kablosuz sıcaklık kontrolünün başarıyla sağlandığı gözlemlendi.

**Anahtar Kelimeler:** PID kontrol, MATLAB/Simulink, kablosuz proses kontrol, Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, deneme-yanılma yöntemi

## Comparison of PID Tuning Methods For Wireless Temperature Control

### ABSTRACT

In this study, wireless temperature control experiments were achieved using three different parameter tuning methods which using PID control algorithm is applied to a process simulator. Under the same conditions, results taken from the wireless experiments performed for three different set points were compared. To achieve the data transfer between computer in Process Control Laboratory and the simulator in Unit Operations Laboratory, wireless communication system established. Wireless experiments were performed on-line by means of MATLAB/Simulink program. Wireless data transfers during the experiments were carried out using radio waves at a frequency of 2.4 GHz. For the dynamics experiments performed employing Cohen-Coon and Ziegler-Nichols methods, the process reaction curve was prepared using step change effect. The dead time, time constant and gain values were determined as 33s, 367s and 0.4, respectively.  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  coefficients are determined by Cohen-Coon as 37.7, 78.3s, 11.8s, respectively. Comparing the experimental results performed at different set points, one could see that the heater works irregularly and on-off form during the experiments. It is noted that the coefficients obtained with this method are not effective for temperature control. The  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  parameters are determined by the Ziegler-Nichols method as 0.412, 66.0, 16.5s, respectively. In this control case, the temperature followed the desired set point with 1 °C offset. By using trial and error method,  $K_C$ ,  $\tau_I$ ,  $\tau_D$  parameters are obtained as 0.21, 20.0, 4.5s, respectively. By this control method, temperature followed the desired set point without any offset and wireless temperature control was achieved successfully for different set points.

**Keywords:** PID control, MATLAB/Simulink, wireless process control, Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, trial and error method

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

PID kontrol ediciler, kolay temin edilebilmeleri, düşük maliyetleri, hem ayrı sistem olarak hemde algoritma şeklinde gömülü olarak kullanılabilmeleri, kontrol hassasiyeti, uygulama prensiplerinin anlaşılır olması ve

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: adnanaldemir@yyu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.1 9-19

kontrol parametrelerinin ayarlama kolaylığı nedeniyle günümüzde halen en yaygın kullanılan kontrol sistemleridir. Literatürde PID kontrol parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır. Ziegler-Nichols (1942) ve Cohen-Coon (1953) yöntemleri, bu yöntemler arasındaki en eski ve en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler deneysel olarak sistemin giriş değişkenine yapılan basamak etki sonucu çı-

kış değişkeninin zamanla değişimini içeren proses reaksiyon eğrisinin hazırlanması ve belirlenen ölü zaman, zaman sabiti değerleri kullanılarak matematiksel eşitlikler ile PID katsayılarının belirlenmesine dayanmaktadır [1-2]. Literatürde farklı prosesler için PID kontrol yöntemi kullanılarak bu proseslerdeki değişkenlerin kontrolünün gerçekleştirildiği değişik örnekler mevcuttur. Bir sıvı seviye sisteminin kontrolü için değişken yapı (DY) PID kontrol önerilmiş ve bu yöntemin kontroldeki kararlılık ve performans analizi yapılmıştır. DY PID kontrolü yapılan sistemin yarı-doğrusal olduğu belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre DY PI kontrol edicinin klasik PI kontrol ediciye göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [3]. Büyük ölçekli, sabit izotermal dinamiğe sahip ve kimyasal reaksiyon kinetiklerinde doğrusal olmayan davranışın yoğun olduğu bir sürekli karıştırılmalı tank reaktörün klasik PID kontrol edici ile kararlılığının sağlanması amaçlanmıştır. Kararlılık analizinde doğrusal PID kontrolün üç modunun geometrik yorumu yapılmıştır. Buna göre oransal terim, bir denge noktasına ulaşması için reaktör dinamiklerinin enerji potansiyelini şekillendirmekte, integral terim, kontrol girişinin dc-önyargı tahmini için bir adaptif düzen görevi görmekte ve türevsel terim istenilmeyen sınımları ve aşırı sıcaklık değişimlerini önlemek için sönümleme işlemini sağlamaktadır [4]. PID kontrol edicilerin performans, ayarlama kolaylığı, kararlılık, kontrol dayanıklılığı gibi özellikleri, kullanım alanları, ayarlama yöntemleri ve bu kontrol edicilerin geleceği hakkında hazırlanan bir yayında PID kontrol edicilerin, doğrusal olmayan, çok değişkenli, zaman gecikmesi olan veya değişken set noktasına sahip farklı sistemlerdeki kullanımları incelenerek genel değerlendirme yapılmıştır [5]. Ayrıca PID kontrol parametrelerinin belirlenmesi için ayarlama yöntemlerinin kıyaslanmasına yönelik farklı çalışmalarda bulunmaktadır. Endüstriyel kontrol sistemleri için zaman tabanlı, frekans tabanlı ve çok amaçlı optimal ayarlama yöntemi olmak üzere üç farklı optimal PID parametre ayarlama tasarımı incelenmiştir. Bu tasarımlar, model tahmini, istenilen sistem özelliklerinin tanımı, bir optimal ayarlama mekanizması ve PID kontrol edici olarak dört temel bölümden oluşmaktadır. Bu üç optimal ayarlama yöntemi hidrolik konum kontrol sistemi, döner hidrolik hız kontrol sistemi ve gazlaştırıcı olmak üzere üç farklı endüstriyel sisteme başarıyla uygulanmış ve deneysel sonuçlar optimal ayarlamalı PID kontrol edicinin sistem performansını arttırdığı ve proses dinamiklerindeki değişimleri iyi derecede elimine ettiği belirlenmiştir [6].

Bu çalışmada bir proses simülöründe PID kontrol yöntemini kullanarak kablosuz sıcaklık kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Aynı koşullarda gerçekleştirilen kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde farklı parametre belirleme yöntemleri kullanılarak bu yöntemlerin etkinliği ve sıcaklık kontrolündeki performansları, deneysel sonuçlarda elde edilen sıcaklık profilleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Deneylerin radyo dalgaları ile kablosuz olarak gerçekleştirilmesi ve MATLAB/Simulink blok diyagramı ile gerçek zamanlı ve PID

kontrol algoritmasının on-line olarak kullanılması bakımından proses kontrol alanındaki çalışmalara yenilikçi bir bakış açısı getirmiştir.

## 2. DENEY SİSTEMİ (EXPERIMENTAL SYSTEM)

Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinin gerçekleştirilmesinde Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler laboratuvarında bulunan Cussons P3005 proses kontrol simülörü kullanılmıştır. Bu simülör sıcaklık, akış hızı, sıvı seviye ve basınç olmak üzere dört farklı proses parametresinin ölçüm ve kontrolü yapılabilen bir sistemdir. Proses kontrol simülöründe iki ana bölüm vardır. Bunlar proses ekipmanlarının bulunduğu bölüm ve elektronik devrelerin bulunduğu, ölçüm ve kontrolün yapılabildiği kumanda panosudur. Proses kontrol simülöründe sisteme beslenen suyun muhafaza edildiği bir adet tank, sistemde suyun sirkülasyonunu sağlayan elektrik ile çalışan bir adet pompa, şebeke suyu ile soğutmanın yapıldığı ceketli soğutucu, sistemde suyun tutulduğu iki adet cam tank, elektrik ile çalışan bir adet akış hızı kontrol vanası (CV1), bir adet sıvı seviye kontrol vanası (CV2), akış hızını ölçen bir adet orifis metre, diferansiyel basınç farkını sıvı seviyesine çeviren bir adet transmitter, sıvının taşmasını önlemek amacıyla pompanın otomatik olarak kapanmasını sağlayan sigorta, pnömatik basınç kontrol edici indikatörü, pnömatik basınç kaydedici, pnömatik olarak çalışan basınç kontrol vanası (CV3), sisteme kompresörden gelen basınçlı havayı istenilen basınç değerindeki havayı ileten iki adet regülatör bulunmaktadır. Ayrıca sistemde dört farklı deney düzeneğini oluşturabilmek için açık-kapalı konumları elle ayarlanan vanalar bulunmaktadır. Proses kontrol simülörünün diğer bir birimi ise elektronik devrelerin bulunduğu kontrol panosudur. Bu panoda sıcaklık, sıvı seviye kontrol ve akış hızının ölçüm ve kontrolü yapılabilmektedir. Burada üç adet gösterge, otomatik-manuel kontrole geçiş yapılabilen butonlar, pompa ve ısıtıcıyı çalıştırmak için butonlar bulunmaktadır. Simülörde sıcaklık, akış hızı ve sıvı seviyesi ölçüm ve kontrol sistemi tamamen elektriksel olarak basınç sistemi ise pnömatik olarak çalışmaktadır (Şekil 1).

Kablosuz deneylerin gerçekleştirilmesinde Temel İşlemler laboratuvarında bulunan proses kontrol simülörü ile Proses Kontrol laboratuvarında bulunan bilgisayar arasında veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kurulmuştur. Bunun için proses kontrol simülöründe kablosuz ölçüm ve kontrol deneyleri gerçekleştirmek için bazı değişiklikler yapılarak, yeni ekipmanlar eklenmiştir. Bu amaçla bilgisayar ve sistem arasında iletişimi sağlayabilmek için proses simülörü ve laboratuvarındaki bilgisayar arasında veri aktarımını sağlayan iki adet anten koyulmuştur. Ayrıca proste ayarlanabilen değişkenler olarak belirlenen; ısıtıcı, sıvı seviye kontrol vanası, basınç kontrol vanası tekrardan kalibre edilmiş ve bunların çıkışları modüllere bağlanmıştır. Bu modüller iki anten arasındaki aktarılan verileri bünyesinde

bulundurmaktadır. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2.4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

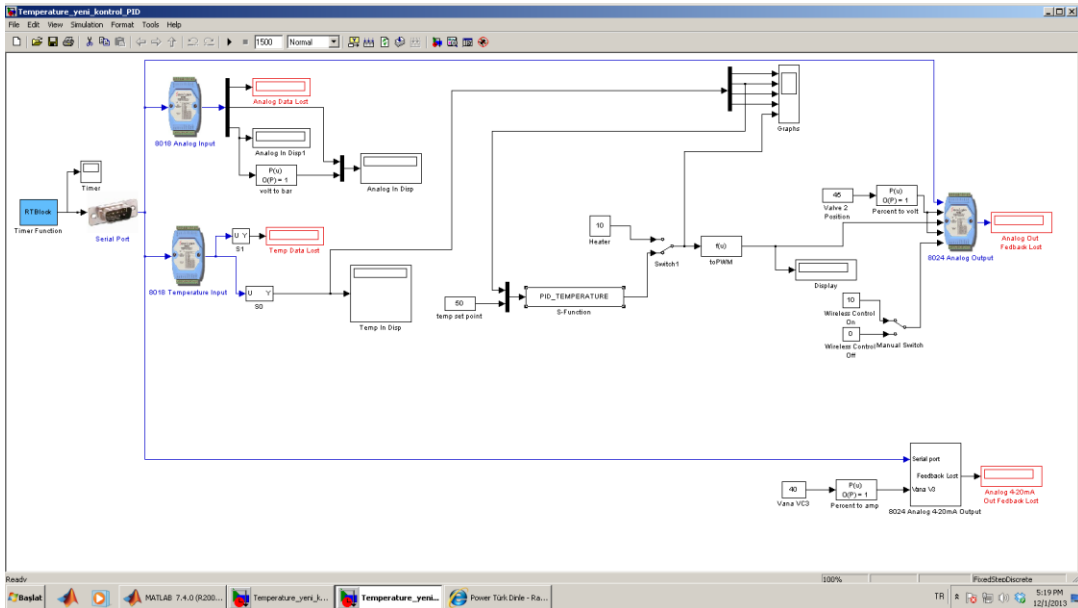


**Şekil 1.** Kablosuz ölçüm ve kontrol için geliştirilen proses kontrol simülâtörü (Developed process control simulator for wireless measurement and control)

### 3. DENEY YÖNTEMİ (EXPERIMENTAL METHOD)

Sıcaklık kontrol deneyleri için elle ayarlanan vanaların pozisyonları açık-kapalı uygun konumda ayarlanır. Akış hızı kontrol vanası 2.5 l/dk ve sıvı seviye kontrol vanası %45 vana açıklığı değerinde ayarlanarak ikinci tanktaki sıvı seviyesinin yaklaşık aynı değerinde sabitlenmesi sağlanır. Kontrol panosu üzerindeki ısıtıcı düğmesi ile çalıştırılan ısıtıcı ile sistemdeki suyun sıcaklığı artırılır. Sistemde sıcaklığı artan suyun soğutulması tanka dönmeden önce ceketli soğutucudan şebeke suyu ile sağlanır.

PID kontrol algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde algoritmadaki  $K_c$ ,  $\tau_i$  ve  $\tau_D$  kontrol katsayılarının Cohen-Coon, Ziegler-Nichols ve deneme-yanılma yöntemleri ile bulunan değerleri kullanılarak aynı koşullarda deneyler yapılmıştır. Sıcaklık kontrol deneylerinde başlangıçta ısıtıcı sabit %10 ısıtıcı açıklığı değerinde 300s çalıştırılarak sistemin yatışkın hale gelmesi beklenmiştir. 300s sonunda MATLAB/Simulink blok diyagramında bulunan kontrol anahtarı değiştirilerek daha önce kaydedilen kontrol algoritması devreye alınmış ve bu algoritmadaki parametrelerin kontrol üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde kullanılan MATLAB/Simulink programının şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Burada sistemin kablosuz kontrolünün yapılabilmesi için bir adet kablosuz açık-kapalı düğmesi, proses parametrelerinin sayısal ve grafiksel olarak gösterildiği bloklar, hata sinyallerinin depolandığı bloklar, simülâtördeki elektriksel vanaların açıklık değerlerinin ayarlandığı kutucuklar bulunmaktadır (Şekil 2)



**Şekil 2.** Kablosuz PID sıcaklık kontrol deneyinin MATLAB/Simulink blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram of wireless PID temperature experiments)

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

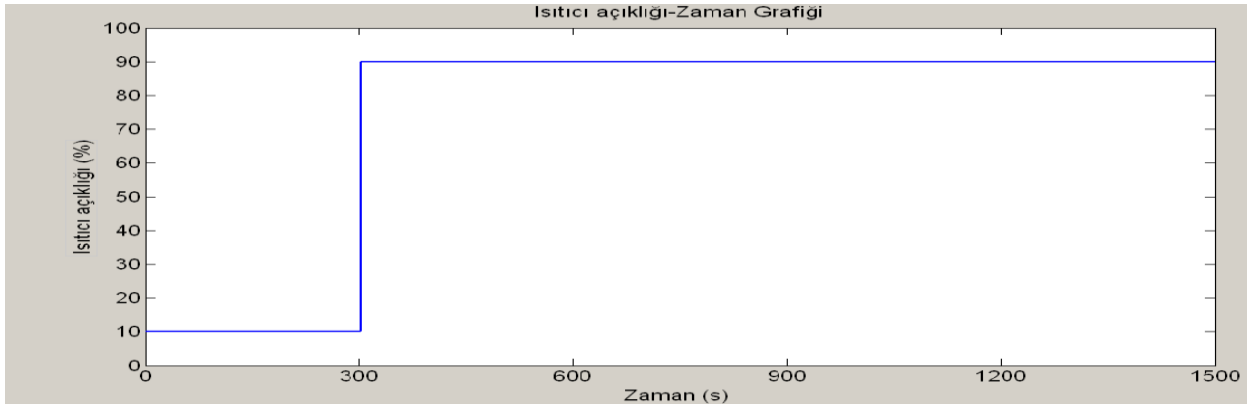
Proses kontrol simülöründe, kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri 2.5 l/dk akış hızı ve %45 CV2 vana açıklığında gerçekleştirilmiştir. Proses kontrol simülöründe PID kontrol parametrelerinin belirlenmesi için gerekli olan reaksiyon eğrisinin oluşturulması amacıyla basamak etki uygulanan farklı bir dinamik hal deneyi gerçekleştirilmiştir. Bunun için sistem başlangıçta %10 ısıtıcı açıklığında çalıştırılmış ve sıcaklığın yatışkın hale gelmesi beklenmiştir. Isıtıcı açıklığına 80 birimlik pozitif etki verilmiş ve ısıtıcı açıklığının %90 olması sağlanmıştır (Şekil 3). %10 ısıtıcı açıklığında 26.2 °C’de sabitlenen sistem sıcaklığı artarak 58.6 °C’de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 4).

Bir PID control edici transfer fonksiyonu Eşitlik 1 ile verilmiştir. Cohen-Coon ve Ziegler-Nichols yöntemleri ile PID kontrol katsayılarını belirlemek için gerekli olan eşitlikler Tablo 1’de verilmiştir. Basamak etki sonucunda sıcaklığın zamanla değişim grafiği kullanılarak reaksiyon eğrisi hazırlanmış ve reaksiyon eğrisi kullanılarak ölü zaman ve zaman sabiti parametreleri belirlenmiştir. Şekil 5’te gösterilen reaksiyon eğrisinden belirlenen ölü zaman, zaman sabiti ve kazanç değerleri Tablo2’de verilmiştir.

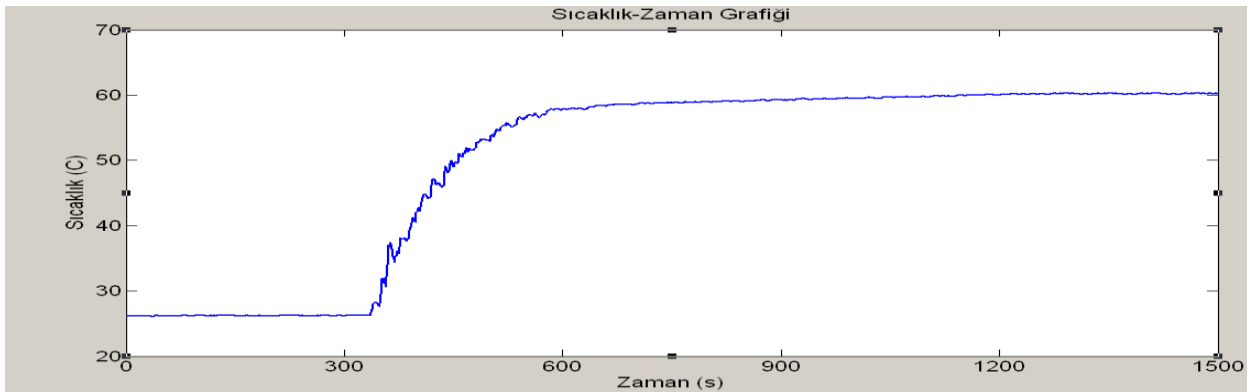
$$G_C = K_C \left( 1 + \frac{1}{\tau_I S} + \tau_D S \right) \quad (1)$$

**Tablo 1.** PID kontrol ayarlama yöntemleri için kullanılan eşitlikler [7] (The equations used for PID control tuning methods [7])

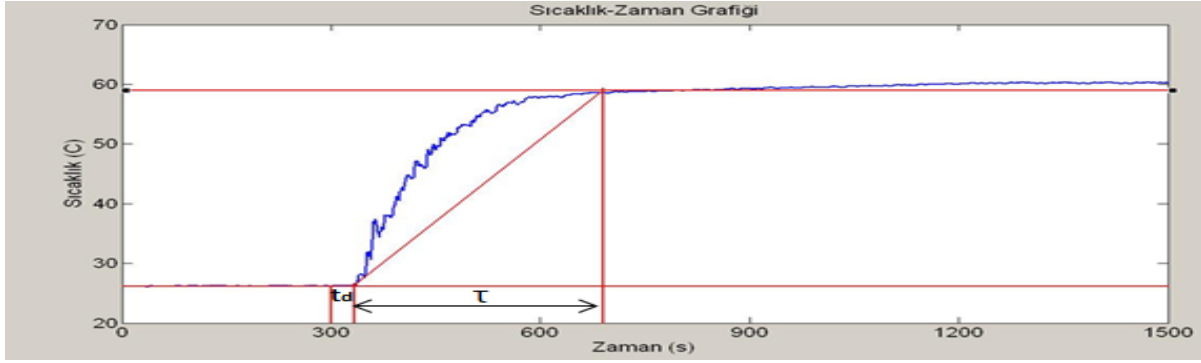
Parametre	Ziegler-Nichols	Cohen-Coon
$K_C$	$K_u/1.7$	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{td} \left( \frac{4}{3} + \frac{td}{4\tau} \right)$
$\tau_I$	$P_u/2.0$	$td \frac{32 + 6(td/\tau)}{13 + 8(td/\tau)}$
$\tau_D$	$P_u/8.0$	$td \frac{4}{11 + 2(td/\tau)}$



**Şekil 3.** Basamak etki sonucunda ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time as a result of step change)



**Şekil 4.** Basamak etki sonucunda sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time as a result of step change)



Şekil 5. Basamak etki sonucu oluşturulan reaksiyon eğrisi (Obtained reaction curve with step change)

Tablo2. Reaksiyon eğrisinden belirlenen kontrol katsayıları (Determined control coefficients from reaction curve)

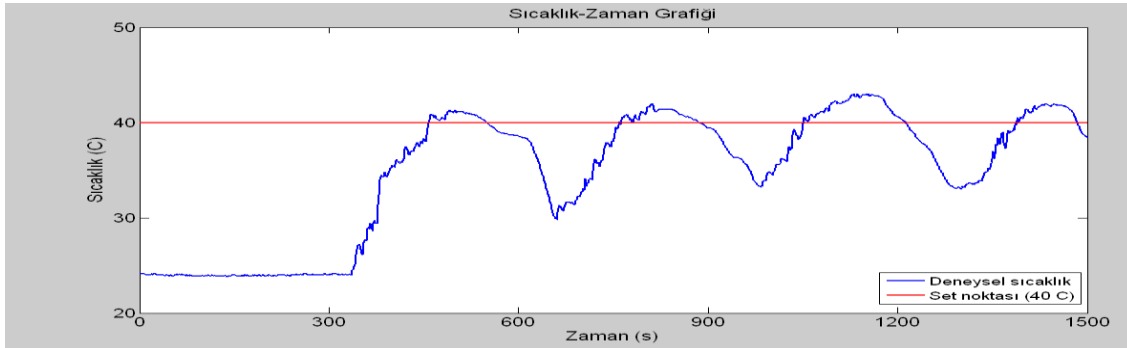
Parametre	$\tau_d$	$\tau_A$	$U_s$
Sayısal Değeri	33 s	367s	0,4

#### 4.1 Cohen-Coon Yöntemi ile Katsayıları Belirlenen PID Kontrol Sonuçları

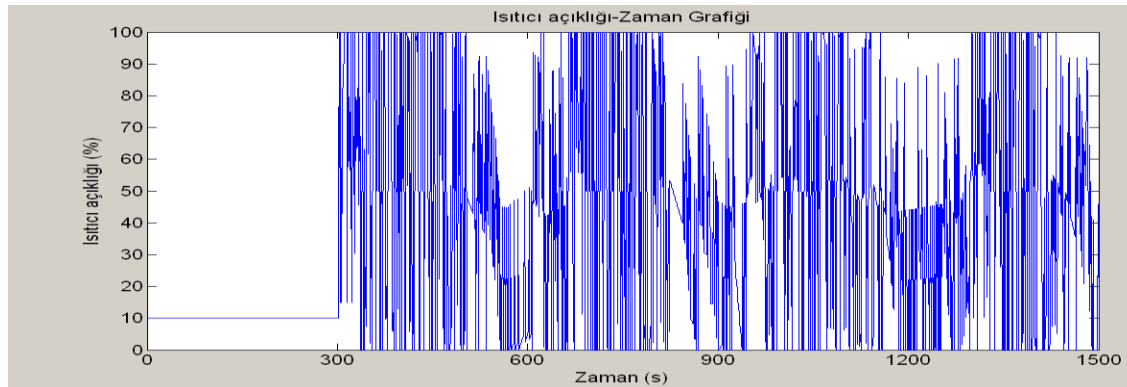
Cohen-Coon yöntemi için Tablo 1'deki eşitlikler kullanılarak hesaplanan PID kontrol katsayıları Tablo 3'te verilmiştir. Cohen-Coon yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları seçilerek PID kontrol deneyleri yapılmıştır. Bu kontrol deneylerinde ısıtıcı açıklığı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 6-11'de gösterilmiştir.

Tablo3. Cohen-Coon yöntemi ile belirlenen PID kontrol katsayıları (Determined PID control coefficients with Cohen-Coon method)

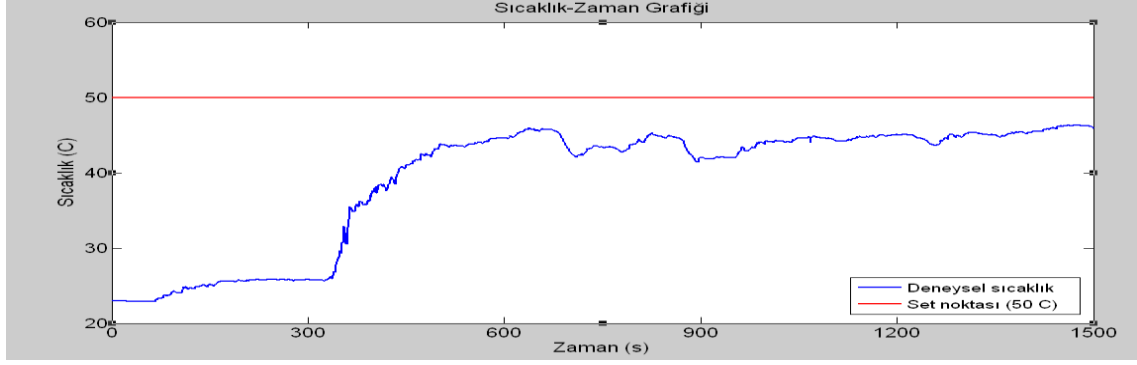
Katsayı	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
Sayısal Değeri	37,7	78,3s	11,8s



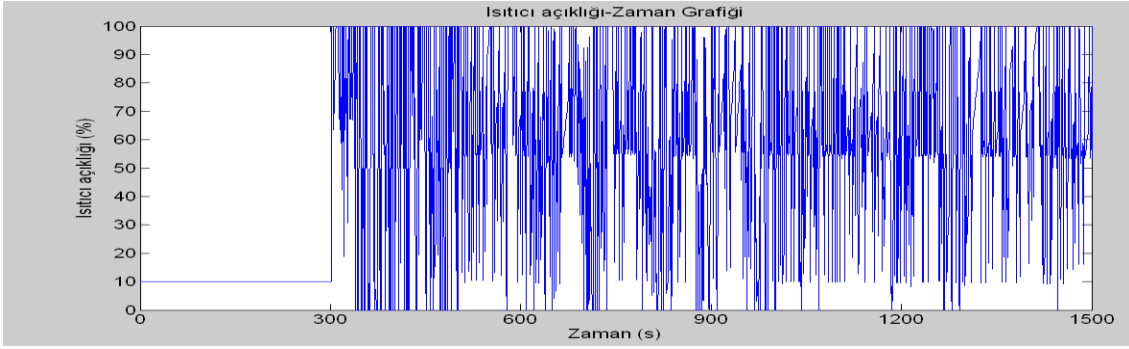
Şekil 6. C-C yöntemi ile Tset=40 °C için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for Tset=40 °C with C-C method)



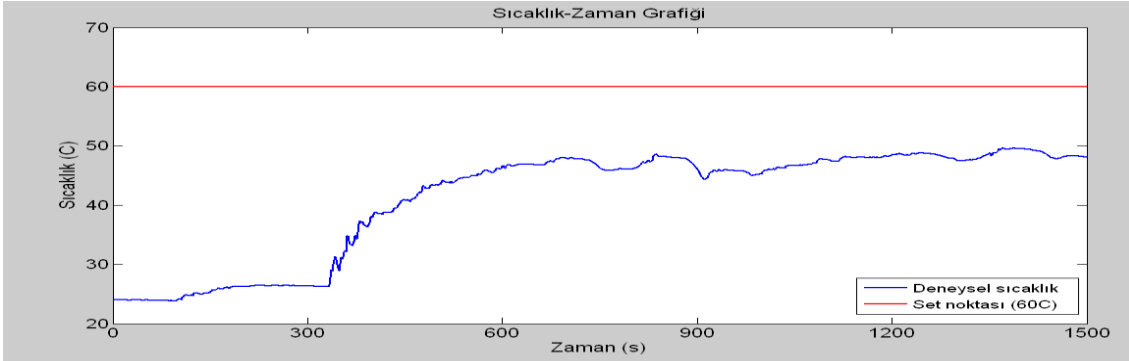
Şekil 7. C-C yöntemi ile Tset=40 °C için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for Tset=40 °C with C-C method)



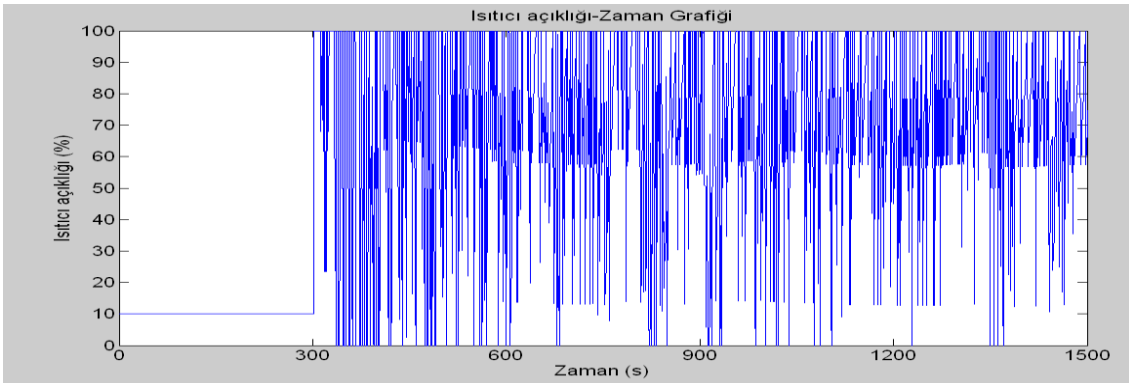
Şekil 8. C-C yöntemi ile Tset=50 °C için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for Tset=50 °C with C-C method)



Şekil 9. C-C yöntemi ile Tset=50 °C için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for Tset=50 °C with C-C method)



Şekil 10. C-C yöntemi ile Tset=60 °C için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for Tset=60 °C with C-C method)

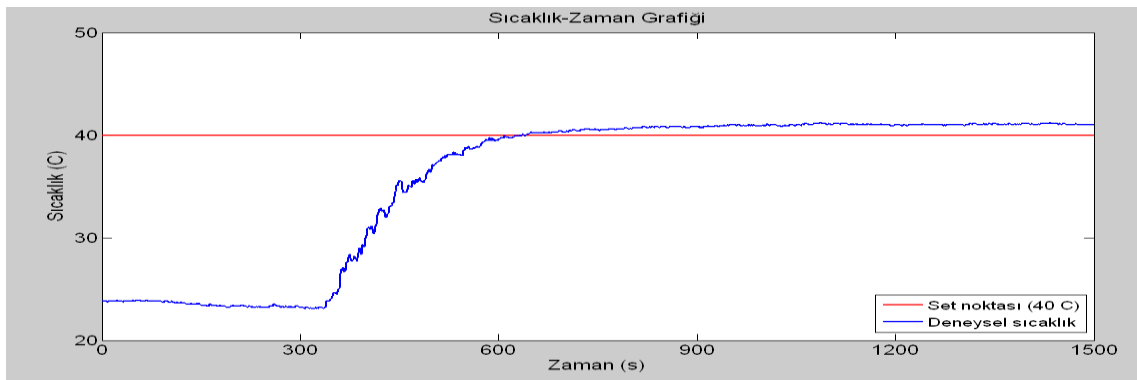


Şekil 11. C-C yöntemi ile Tset=60 °C için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for Tset=60 °C with C-C method)

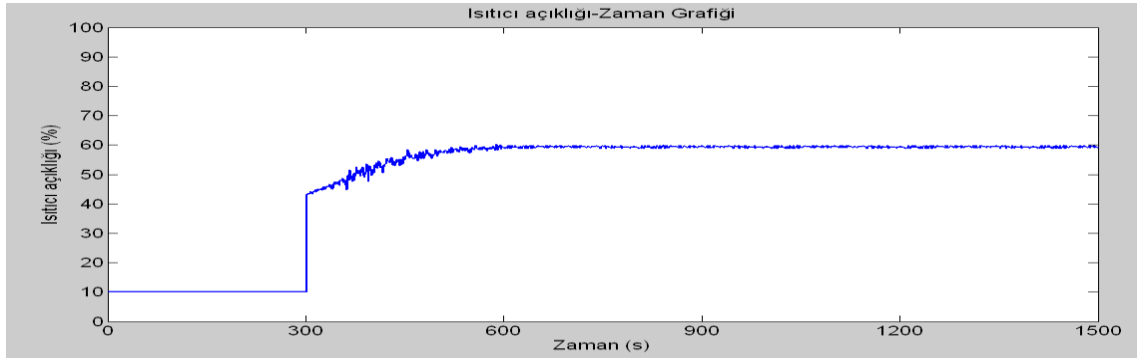
Cohen-Coon yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde genel olarak ısıtıcının başlangıçtan itibaren açık-kapalı şeklinde ve düzensiz çalıştığı gözlenmiştir.  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının düzensiz olarak çalıştığı ve buna bağlı olarak sıcaklık kontrolünde salınımlara neden olduğu gözlenmiştir (Şekil 6-7).  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının açık-kapalı şeklindeki hareketlerinin giderek sıklaştığı (Şekil 9, 11) ancak deney süresince  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  için istenilen sıcaklıklara ulaşamadığı gözlenmiştir (Şekil 8, 10). Deneysel sonuçlara göre Cohen-Coon yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı sıcaklık kontrolünün istenilen performansı göstermediği ve bu katsayıların sıcaklık kontrolü için uygun olmadığı belirlenmiştir.

#### 4.2 Ziegler-Nichols Yöntemi ile Katsayıları Belirlenen PID Kontrol Sonuçları

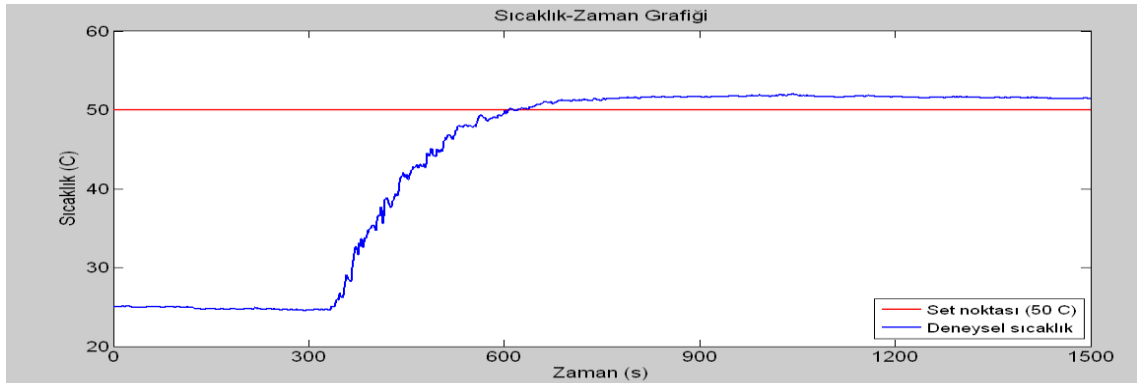
Şekil 5'te gösterilen reaksiyon eğrisinden belirlenen ölü zaman ve zaman sabiti parametrelerinin değerleri kullanılarak ile hesaplanan PID kontrol katsayıları Tablo 4'te verilmiştir. Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları seçilerek PID kontrol deneyleri yapılmıştır. Bu kontrol deneylerinde ısıtıcı açıklığı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 12-17'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Z-N yöntemi ile  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)



Şekil 13. Z-N yöntemi ile  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)

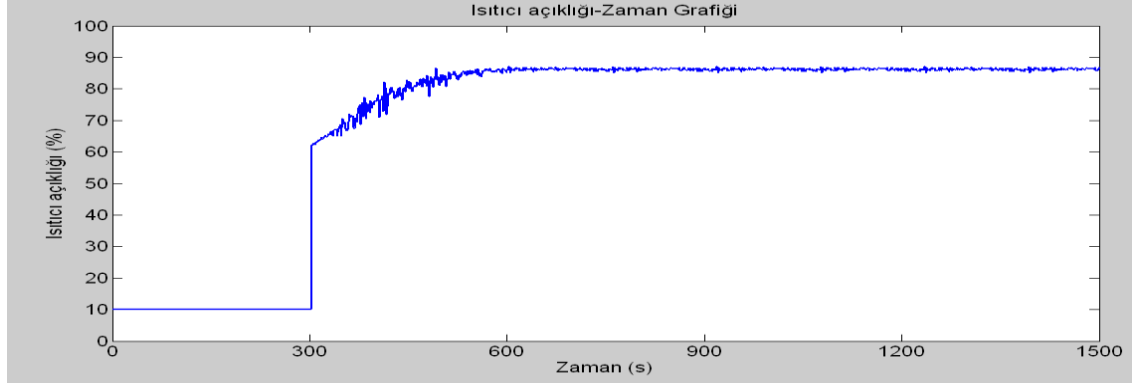
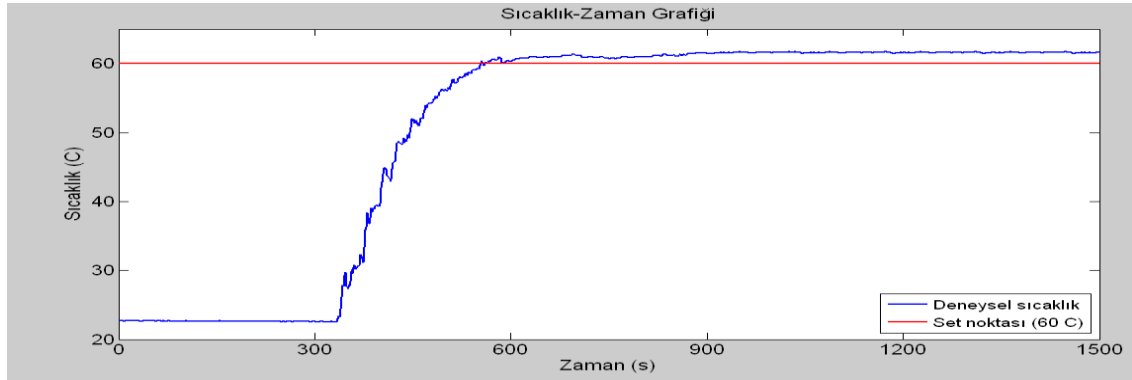
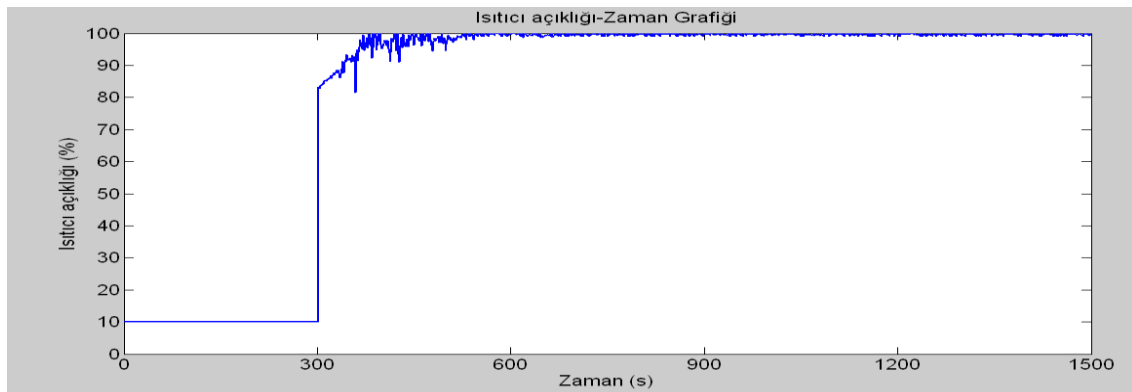


Şekil 14. Z-N yöntemi ile  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)

**Tablo 4.** Ziegler-Nichols yöntemi ile belirlenen PID kontrol katsayıları (Determined PID control coefficients with Ziegler-Nichols method)

Katsayı	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
Sayısal Değeri	0,412	66,0s	16,5s

Isıtıcı açıklığına bağlı olarak sıcaklığın düzenli olarak artarak  $41^{\circ}\text{C}$ 'de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 12).  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %65'e 55 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük salınımlarla %86 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 15). Isıtıcı açıklığına bağlı olarak sıcaklığın düzenli olarak artarak  $51^{\circ}\text{C}$ 'de

**Şekil 15.** Z-N yöntemi ile  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for  $T_{set}=50^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)**Şekil 16.** Z-N yöntemi ile  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)**Şekil 17.** Z-N yöntemi ile  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  with Z-N method)

Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde  $T_{set}=40^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %45'e 35 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük salınımlarla %60 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 13).

sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 14).  $T_{set}=60^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %85'e 75 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük salınımlarla %98 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 17). Isıtıcı açıklığına bağlı olarak



sıcaklığın düzenli olarak artarak 61°C'de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 16). Deneysel sonuçlara göre Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı sıcaklık kontrolünde sıcaklıkların istenilen set sıcaklıklarına ulaşarak bu sıcaklıklardan 1°C'lik offset olduğu belirlenmiştir.

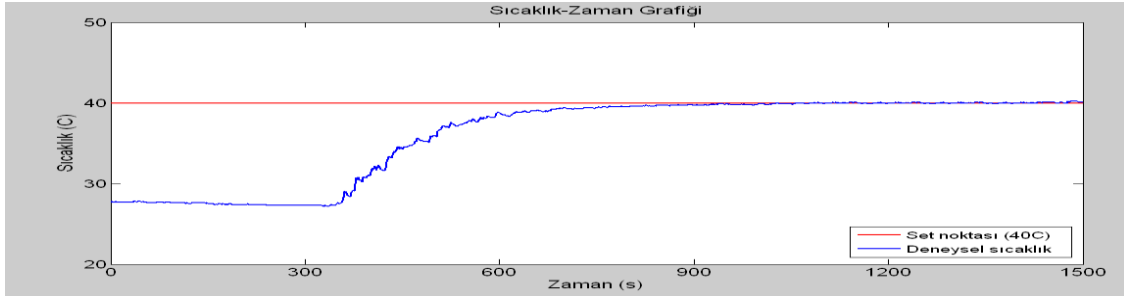
#### 4.3 Deneme-Yanılma Yöntemi ile Katsayıları Belirlenen PID Kontrol Sonuçları

Deneme-yanılma yöntemi ile PID parametrelerinin belirlenmesinde, Ziegler-Nichols yöntemi ile belirlenen

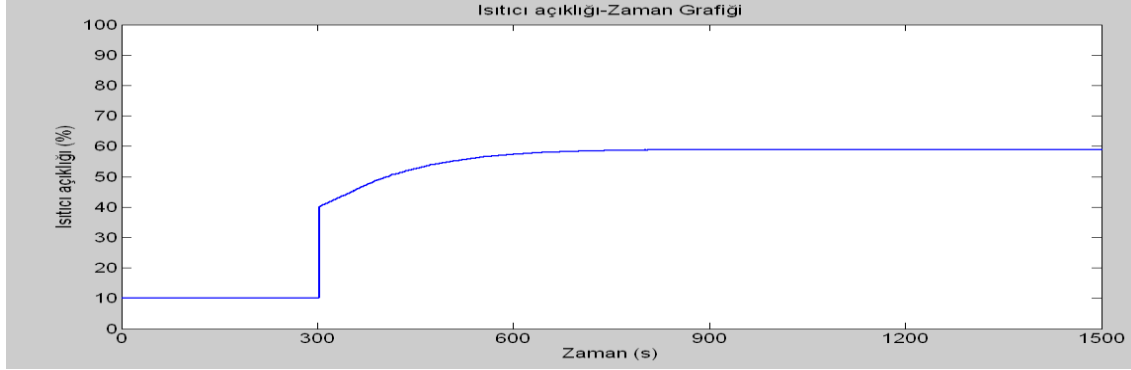
$K_C$ ,  $\tau_I$  ve  $\tau_D$  katsayılarından herhangi ikisinin sabit tutularak diğer parametrenin belirli oranda artırılması veya azaltılması ile yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık profilleri karşılaştırılmış ve en iyi kontrol sonuçlarının elde edildiği katsayılar Tablo 5'te ve deneysel sonuçlar Şekil 18-23'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Deneme-yanılma yöntemi ile belirlenen PID kontrol katsayıları (Determined PID control coefficients with trial and error method)

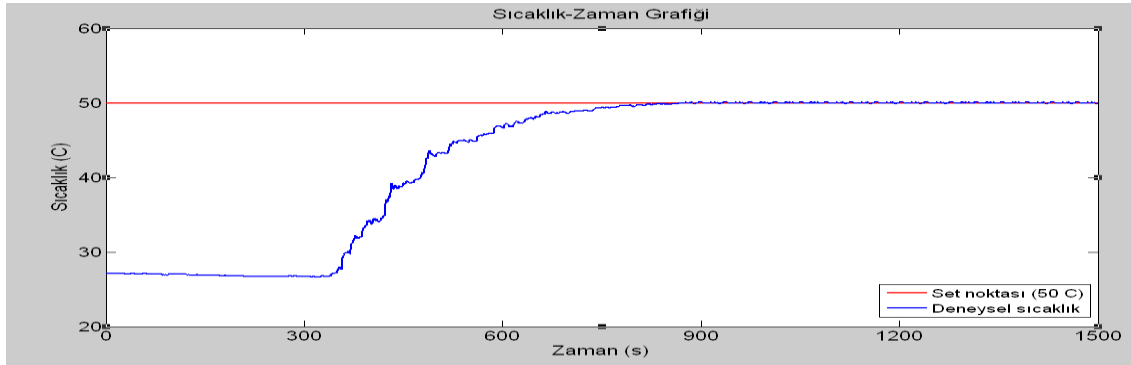
Katsayı	$K_C$	$\tau_I$	$\tau_D$
Sayısal Değeri	0,21	20,0s	4,5s



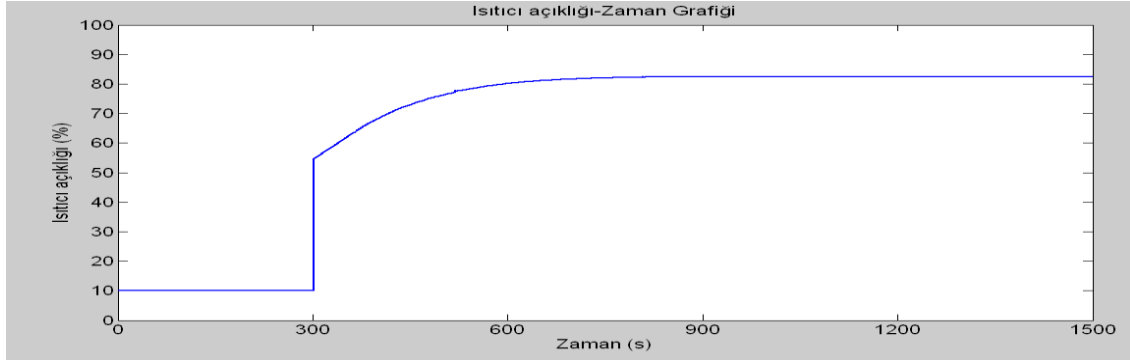
**Şekil 18.** D-Y yöntemi ile Tset=40 °C için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for Tset=40 °C with D-Y method)



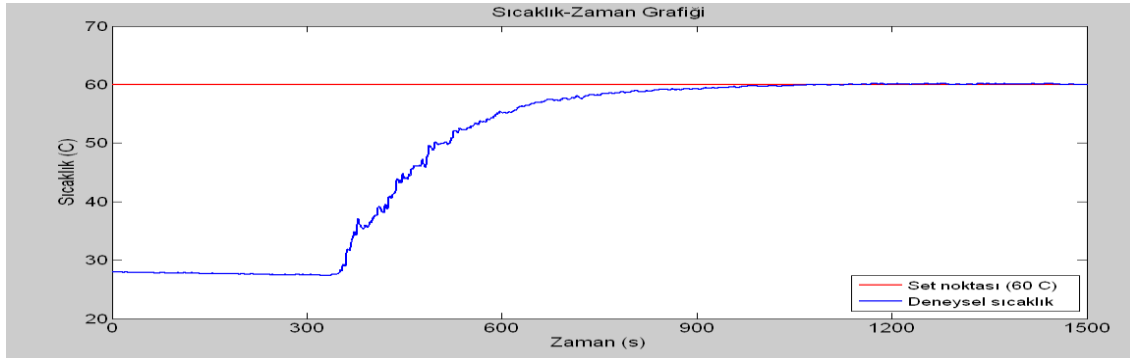
**Şekil 19.** D-Y yöntemi ile Tset=40 °C için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for Tset=40 °C with D-Y method)



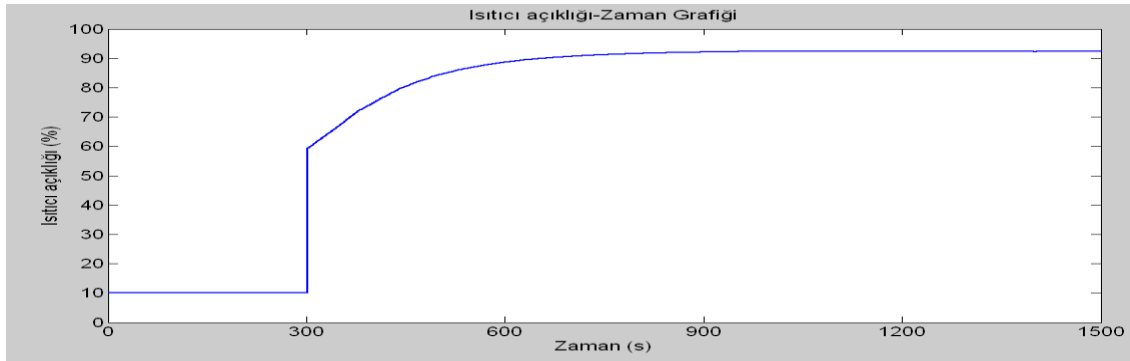
**Şekil 20.** D-Y yöntemi ile Tset=50 °C için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for Tset=50 °C with D-Y method)



**Şekil 21.** D-Y yöntemi ile  $T_{set}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for  $T_{set}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  with D-Y method)



**Şekil 22.** D-Y yöntemi ile  $T_{set}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (The graph of temperature changes with time for  $T_{set}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  with D-Y method)



**Şekil 23.** D-Y yöntemi ile  $T_{set}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (The graph of heater capacity changes with time for  $T_{set}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  with D-Y method)

Deneme-yanılma yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde  $T_{set}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %40'e 30 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük salınımlarla %59 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 19). Isıtıcı açıklığına bağlı olarak sıcaklığın düzenli olarak artarak  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 18).  $T_{set}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %55'e 45 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük salınımlarla %83 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 21). Isıtıcı açıklığına bağlı olarak sıcaklığın düzenli olarak artarak  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 20).  $T_{set}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  için ısıtıcı açıklığının başlangıçta %10'dan %65'e 55 birimlik ani bir artıştan sonra çok küçük

salınımlarla %94 değerine ulaşarak bu değerde sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 23). Isıtıcı açıklığına bağlı olarak sıcaklığın düzenli olarak artarak  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabitlendiği gözlenmiştir (Şekil 22).

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bir proses simülöründe PID algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirilmiş ve üç farklı parametre ayarlama yöntemi kullanılarak aynı koşullarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. PID kontrol yöntemleri için gerçekleştirilen dinamik analiz deneylerinde sisteme uygulanan basamak etki sonucu elde edilen reaksiyon eğrisi incelendiğinde sistemin yerleşme zamanının yüksek olduğu belirlenmiştir. Cohen-Coon yöntemi ile belirlenen PID kontrol

katsayılarının kullanıldığı farklı set noktaları için yapılan deney sonuçları incelendiğinde genel olarak ısıtıcının başlangıçtan itibaren açık-kapalı şeklinde ve düzensiz çalıştığı gözlenmiş ve bu yöntemle elde edilen katsayıların sıcaklık kontrolünde etkili olmadığı belirlenmiştir. Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı sıcaklık kontrolünde sıcaklıkların istenilen set değerlerine ulaşarak bu sıcaklıklardan 1°C'lik offset olduğu belirlenmiştir. Deneme-yanılma yöntemi ile bulunan PID katsayılarının kullanıldığı sıcaklık kontrolünde sıcaklıkların istenilen set değerlerine ulaşarak herhangi bir offset veya salınım olmadan bu sıcaklıklardaki kontrol başarıyla sağlanmıştır.

#### SEMBOLLER (NOTATIONS)

$e(t)$	:hata
$G_s$	:transfer fonksiyonu
$K_C$	:oransal sabit
$t$	:zaman, [s]
$t_d$	:ölü zaman, [s]
$T$	:sıcaklık [°C]
$U_s$	:kazanç
$\tau$	:zaman sabiti
$\tau_D$	:türevsel sabiti
$\tau_I$	:integral sabiti

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı (AÜ BAPRO) 10A4343001 nolu proje ile desteklediği için Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına çok teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ziegler, G. and Nichols, N. B., Optimum Settings for Automatic Controllers, *Transactions of ASME*, Cilt 64, 759-768, (1942).
2. Cohen, G. H., & Coon, G. A., Theoretical Consideration of Retarded Control. *Transactions of ASME*, Cilt 75, 827-834, (1953).
3. Boiko, I., Variable-Structure PID Controller for Level Process, *Control Engineering Practice*, Cilt 21, No 5, 700-707, (2013).
4. Ramirez, J. A., Alvarez, J., and Schaum A., On The Global Stability of Conventional PID Control for A Class of Chemical Reactors, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Cilt 22, No 5, 575-590, (2012).
5. Åström, K. J., Hagglund, T. H., The Future of PID Control, *Control Engineering Practice*, Cilt 9, No 11, 1163-1175, (2001).
6. Liu, G. P., Daley, S., Optimal-Tuning PID Control for Industrial Systems, *Control Engineering Practice*, Cilt 9, No 11, 1185-1194, (2001).
7. Stephanopoulos, G., Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1984.