

## Zaman Gecikmeli Isıl Sürecin Gerçek Zamanlı Tanınması ve Kontrolü: Deneysel Uygulama

Necdet Sinan ÖZBEK<sup>1</sup>, İlyas Eker<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi  
nozбек@adanabtu.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Çukurova Üniversitesi  
ilyas@cu.edu.tr

### Özet

*Bu çalışmada zaman gecikmeli ısı süreci, gerçek zamanlı etkileşimli sistem tanılama ara yüzü kullanılarak sürekli ve ayrık zamanlı modellenmektedir. Öncelikle süreç reaksiyon eğrileri ile modelleme sunulmakta, birinci mertebeden ölü zamanlı transfer fonksiyonu ele alınarak iki noktalı ve üç noktalı yöntem, alan tabanlı yöntem vb. yaklaşımlarla sürekli zaman sistem modeli hesaplanmaktadır. Bununla birlikte ayrık zamanlı sistem tanılama öz yinelemeli en küçük kareler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu noktada sisteme ait zaman gecikmesinin doğru tanınması için değiştirilmiş en küçük kareler yöntemi önerilmektedir. Son olarak sürekli zaman transfer fonksiyonu göz önünde bulundurularak gecikmeli sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılan Smith öngörücü tabanlı bir takım kontrol yöntemleri ele alınmaktadır. Kapalı döngü sistemin geçici hal durumu ve bozucu bastırma becerileri irdelenmektedir.*

### Abstract

*In this study, a time-delay heating process is modelled in continuous and discrete time by using real-time interactive system identification graphical user interface. First of all, process reaction curve modelling methods are presented and by considering a first order plus dead time model, the transfer function of the process are constituted by two-points, three-points and area based methods. However, the discrete model of the system is identified by recursive least squares algorithms. At this point, a modified recursive least squares algorithm is proposed for exact identification of time-delay value. Finally, some control methods based on Smith predictor, which is widely used for time delay systems, is elaborated by considering the continuous time model of heating process. The transient response and disturbance rejection ability of the closed loop system is investigated.*

### 1. Giriş

Yazılım ve donanım teknolojisindeki hızlı gelişim öncülüğünde gecikmeli kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımı üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Kontrol uygulamalarının önemli bir problemi olan zaman gecikmesi, sistemin farklı noktalarındaki sensörlerden çevrim içi veri akışı, kontrol sinyalinin hesaplanması, veri ve sinyallerin eyleyiciye gönderilmesi vb. gibi durumlarda oluşur. Gecikmeli sistemlerin kararlılık analizi ve kontrolü, robotik cerrahi ve tele operasyon, insansız araçların koordinasyonu, çok erkinli sistemlerin işbirlikçi kontrolü, hareket senkronizasyonu ve haptik sistemler, uydu sistemlerinde esnek robot kolları üzerinde aktif titreşim bastırma gibi kontrol problemlerinde önemle incelenmektedir. Gerçek hayatta karşımıza çıkan pek çok sistemin (elektromekanik, ısı, akışkan, ekonomik, biyolojik vb.) dinamiği ve sistemi uyaran sinyale karşı göstereceği tepki sistemi karakterize eden diferansiyel denklemin çözümünden elde edilir [1]. Bununla birlikte dinamik modellemeye mevcut gecikmeler çoğu zaman göz ardı edilir, ancak pek çok fiziksel olayda zaman gecikmesi mevcuttur ve sistemdeki çok küçük gecikme miktarları bile, sistemin kararlılığı noktasında çok büyük değişiklikler görülmesine neden olabilir. Bu nedenle açık ve kapalı döngü sistem modellerinin gerçeğe en yakın şekilde elde edilebilmesi için ele alınan sistemde ki zaman gecikmeleri dikkatle ele alınmalıdır. Bu çalışmada ölçüm noktalarından ve hava iletim hızından kaynaklanan zaman gecikmeli bir sistem olan ısı sürecin modellenmesi ve kontrolü üzerine bazı sonuçlar sunulmaktadır.

Zaman gecikmeli sistemlerin tanınması ve kontrolü halen üzerinde aktif olarak çalışılan bir alandır. Bu çalışmada zaman gecikmeli ısı sürecin grafiksel yöntemler ile sürekli zamanlı modeli ve öz yinelemeli en küçük kareler yöntemi ile ayrık zamanlı modeli elde edilmekte ve ölü zaman tanınması yapılmaktadır. Bu tür gecikmeli sistemlerde, belirsizlikler gecikmelerin kestirimi sırasında ya da gecikme teriminin yaklaşık transfer fonksiyonu modelinin hesaplanması sırasında oluşabilmektedir, bu sebeple gecikme teriminin doğru elde edilmesi önemli bir adımdır[2-4]. Bu analiz genel durumlar için yapılabilir fakat bu çalışmada birinci ve ikinci mertebeden ölü zamanlı sistemin nominal modeli üzerine yoğunlaşmaktadır. Birbirini takip eden adımlardan oluşan sistem tanılama, tanınması yapılacak sistem için etkili bir uyarım sinyalinin oluşturulması ile başlar. Bu noktada sistemin tüm uç frekanslarını içerecek değişken bir uyarım sinyali doğru bir model oluşturmayı sağlayacak ilk adımdır.

Bir sonraki adımda uyarılan sistem için aday model yapısı seçilir ve gerçek sistem ile model arasındaki hata, farklı kestirim yöntemleri ile minimize edilerek model parametreleri elde edilir. Modelleme hatasının minimize edilmesinde en küçük kareler (LS), özylenelemleni en küçük kareler (RLS), tahminsel hataları minimize etme gibi farklı algoritmalar kullanılmaktadır [2-4]. Model doğruluğunun kanıtlandığı son adımda; ilgileşim (ilgileşim ve oto korelasyon) analizi, rezidü analizi, ortalama karesel hata gibi farklı yaklaşımlardan faydalanılarak gerçek sistemi en iyi şekilde ifade eden modelin oluşturulduğu ispat edilmektedir.

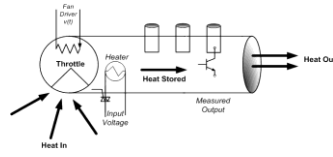
Çalışmanın ikinci aşamasında modeli elde edilen sistem için kontrolcü tasarlanmaktadır. Bu noktada Smith öngörücülü bir yapı ve iki serbestlik dereceli kontrol yapısı önerilmektedir [5]. Smith öngörücüsü, temel olarak, kontrolöre sürecin dinamik yanıtı ile öngörücülü yanıtının toplamını gönderir. Bu sayede zaman gecikmesinden kaynaklanan gecikmeyi gidererek kontrol performansının sağlanması hedeflenir. Smith yapısı gerçek süreçle modelin özdeş olması prensibine dayanır. Model belli bir hata içerdiği takdirde kontrol kalitesinin düşeceği açıktır. Bu sebeple zaman gecikmeli sistem için modelleme hatasını minimum yapacak modeli oluşturmak önem arz etmektedir.

Bu bildiri şu şekilde düzenlenmiştir: ikinci bölümde gerçek zamanlı sistem tanılama yöntemleri üzerinde durulmakta, üçüncü bölümde ise zaman gecikmeli sistemin kontrolünü sağlayacak bazı yöntemler sunulmaktadır. Sonuçlar ise bildirinin dördüncü bölümünde değerlendirilmektedir.

## 2. Isıl Sistemin Gerçek Zamanlı Modellenmesi

Şekil.1 ile betimlenen zaman gecikmeli sistemin modellenmesi için tasarlanan etkileşimli sistem tanılama ara yüzü iki ana panelden oluşmakta ve Şekil.4 ile sunulmaktadır. Sistem bilgisi ve ölçüm panelinde giriş sinyalini Matlab m-file ortamında tasarlanabilmekte, sistemin çalışma aralığını belirlenebilmekte, simulink modelleri tasarlanabilmekte ve sisteme ait giriş-çıkış verilerini incelenebilmektedir. İkinci panelde ise sistem tanılama algoritmalarına ait model ve parametre seçim bölümü ile tanılama sonucu elde edilen çıktılar (Gerçek zamanlı sistem çıkışı, model çıkışı, modelleme hatası, modelin kutup-sıfır diyagramı) gözlemlenebilmektedir. Belirtilen tasarım paneli kullanıcının seçeceğini yönetime göre aktif hale gelmektedir.

### 2.1. Matematiksel Model



Şekil 1: Isıl sistem modeli

Hava iletim tüpü üzerinde yapılacak sıcaklık ölçümü sırasında sensörlerin konumundan dolayı meydana gelen zaman gecikmesi dikkate alındığında sistemin matematiksel modeli, sistemin toplam enerjisi (1) eşitliğindeki gibi göz önüne alınarak:

$$q_T = q + q_{giren} - q_{çikan} - q_{kayıp} \quad (1)$$

Sistemin ısıl değerleri (2) ile verilmekte,  $m$  akışkanın kütleliğini,  $T_a$  ortam sıcaklığını ve  $C$  ısıl kapasiteyi betimlemektedir. Sıcaklık değişimi  $\Delta T = T - T_a$ , ile ısıl denge denklemi (3) ile ifade edilmektedir.

$$q_T = C \cdot \frac{dT}{dt}, q_{giren} = C \cdot m \cdot T_a, q_{çikan} = C \cdot m \cdot T \quad (2)$$

(2) ifadesi tekrar düzenlenerek ısıl eşitlik oluşturulursa:

$$q_{giren} - q_{çikan} - q_{kayıp} = -\frac{1}{R} \Delta T \quad (3)$$

Bu şekilde ısıl sistemin giriş voltajı ile sensör çıkışı arasındaki ilişki (4) ile verilen birinci dereceden zaman gecikmeli bir transfer fonksiyonu ile ifade edilir.

$$\frac{\Delta T(s)}{q_{giren}(s)} = \frac{1/R}{R \cdot C \cdot s + 1}, P(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K_p e^{-\tau_d s}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

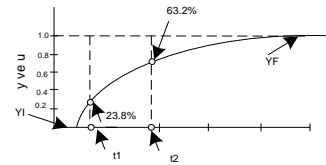
DeneySEL çalışmalar, National Instrument firmasına ait: 32 analog giriş, 16 analog çıkış, 48 dijital giriş/çıkış, 250Ks/s-16 bit maksimum örnekleme özelliklerine sahip bir veri toplama kartı ve Matlab/Simulink® ve RTW ortamında gerçek zamanlı arayüz ile gerçekleştirilmektedir.

### 2.2. Süreç Reaksiyon Eğrileri ile Sistem Tanılama

Grafiksel yöntemler olarak da bilinen süreç reaksiyon eğrilerinde, iki-noktalı ve üç-noktalı metot ve alana dayalı metotlar ele alınmaktadır. Açık döngü durumunda adım sinyali uygulamasına dayanan süreç reaksiyon yöntemleri, sistemin zaman bölgesi dinamik karakteristikleri kalıcı duruma erişikten sonra oluşturulan eğriler ile edilmektedir [4]. Birinci ve ikinci derece zaman gecikmeli model yöntemleri ele alınan modeller olup (5),  $K$  sistem kazancını ve  $\tau$  zaman sabitini ifade etmektedir.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_d s}}{\tau_p s + 1} \approx \frac{K_p}{(\tau_p s + 1)(t_d s + 1)} \quad (5)$$

Birinci derece ölü zamanlı model (5) için  $t_d$  ve  $\tau_p$  olarak ifade edilen sistem parametreleri  $t_d = 1.3t_{35.3} - 0.29t_{85.3}$ ,  $\tau_p = 0.67(t_{85.3} - t_{35.3})$  ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2: Adım cevabı karakteristiği

İki-noktalı ve üç-noktalı yöntem ile sistem tanılamada model parametreleri Şekil-2 ile verilmekte olan grafik üzerinden (6) parametrelerinin elde edilmesine dayanır [5].

$$K_p = \frac{Y_f - Y_l}{U_f - U_l} = \frac{\Delta Y}{\Delta U}, \quad \tau = 1.5(t_2 - t_1), \quad (6)$$

$$t_d = 1.5[(t_1 - t_0) - \frac{1}{3}(t_2 - t_0)]$$

Alana dayalı yöntem sistem modeli üzerinde daha fazla bilgi barındırdığından daha doğru model elde etme olanağı sunar ve eğrinin altında kalan alanın hesaplanması ile  $y(t)$  hesaplanır [5].

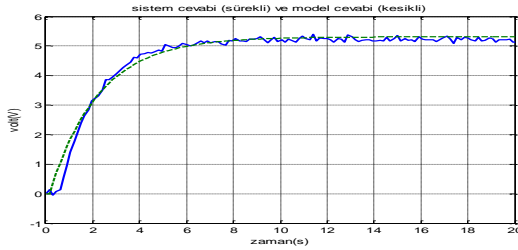
$$y(t) = Y_l \quad \forall t < L, \quad (7)$$

$$y(t) = Y_l + K_p(1 - e^{-\frac{t-L}{\tau}})\Delta U, \quad \Delta U = U_f - U_l \quad \forall t \geq L,$$

ve sistemin kalıcı durum ilişkisi (8) ile verilmektedir.

$$Y_f = Y_l - K_p \Delta U \quad (8)$$

DeneySEL uygulamalarda tanılama sırasında gürültüden kaynaklanabilecek hatalar  $Y_f$  ve  $Y_l$  değerlerinin ortalaması göz önünde bulundurularak bertaraf edilir. Isıl sistemin alana dayalı grafiksel yöntem ile elde edilen modeli ve sistem çıkışı Şekil.3 ile sunulmaktadır.



Şekil 3: Alan hesabına dayalı modelleme

Sistemdeki zaman gecikmesi ( $t_d$ ) ve zaman sabitinin ( $\tau$ ) kestirimi için  $\delta y(t) = Y_f - y(t)$  ile verilen ifade  $\tau_{Alan} > t_d$  kullanılarak (9) ile alan hesaplaması yapılır [5].

$$A_\tau = \int_0^\tau \delta y(t) dt = K_p \Delta U (t_d + \tau - \tau e^{-\frac{\tau-t_d}{\tau}}) \quad (9)$$

Burada  $\tau \rightarrow \infty$  için (9) ifadesi (10) ile yeniden düzenlenerek

$$A_\infty = \int_0^\infty \delta y(t) dt = K_p \Delta U (t_d + \tau) = K_p \Delta U T_{ar} \quad (10)$$

$T_{ar}$  ortalama oturma zamanı ve  $\tau_{Alan} = \tau + t_d = T_{ar}$

$$A_0 = \int_0^{T_{ar}} \delta y(t) dt = K_p \Delta U (t_d + \tau - \tau e^{-1}) \quad (11)$$

$$= A_\infty - K_p \Delta U \tau e^{-1}$$

(10) ve (11) ifadeleri ile  $K_p$  ve  $\Delta U$  kullanılarak, zaman gecikmesi ve zaman sabitesi (12) ile elde edilir [5].

$$\tau = (A_\infty - A_0) \frac{e}{K_p \Delta U}, \quad t_d = \frac{A_\infty}{K_p \Delta U} - \tau \quad (12)$$

Elde edilen sistem transfer fonksiyonu:

$$P(s) = \frac{0.62}{1.59s + 1} e^{-0.58s} \quad (13)$$

### 2.3. Ayrık Zamanlı Anlık Sistem Tanılama

Ayrık-zaman tanım kümesinde fark denklemleri ile ifade edebileceğimiz sistem (13) ile verilmektedir [6-7].

$$Ay(k) = Bu(k-1) + Dv(k) + Ce(k) \quad (14)$$

Burada;  $A$  çıkış katsayısı,  $B$  giriş katsayısı,  $D$  bozucu katsayısı,  $C$  modelleme hatası katsayısını ifade eden ve (15) ile verilen polinomlardır.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \quad (15)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$D(z^{-1}) = d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}$$

Ayrık zamanda ifade edilen modelin çıkışı (16) ile verilmektedir.

$$y(k) = \phi^T(k)\theta + e(k) \quad (16)$$

$\phi(k)$ , giriş çıkış verilerinin toplandığı vektördür ve (17) ile verilmektedir.  $\theta$  ise parametre vektörünü ifade etmekte ve  $e(k)$  ise modele dâhil olan gürültüyü betimlemektedir.

$$\phi(k) = [-y(k-1) - y(k-2) \dots - y(k-n_a) \quad (17)$$

$$u(k-d-1) \dots u(k-d-n_b)]^T$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n]^T$$

Teorik açıdan incelendiğinde özyinelemeli en küçük kareler yöntemine dayalı ayrık sistem tanılama yaklaşımlarında çoğu zaman gecikme teriminin bilindiği varsayımı üzerinden sistem modeli oluşturulur ancak birçok pratik uygulamada zaman gecikmesi bilinmemektedir. Bu yaklaşımda ölü zamanın doğru kestirimi için  $B$  polinomunun  $n_b > d_{max} + 2$  olarak (gecikme terimini kapsayacak kadar büyük) seçilmesi öngörülmektedir. Burada  $d_{max}$  beklenen en büyük zaman gecikmesi terimidir. Zaman gecikmesinin değişken olduğu durumda ise  $d \in [d_{min}, d_{max}]$  olarak seçilir. Öncelikle  $d = d_{min}$  kullanılarak  $n_b > d_{max} - d_{min} + 2$  seçilir. Tanılama işleminde  $B(z)$  polinomunun ilk katsayısı sıfır ise,  $d$  terimi artırılarak tanılama işlemi yeniden gerçekleştirilir. Özyinelemeli en küçük karelerde her örneklemede güncellenebilen parametre vektörü (14) ile sunulmaktadır.

$$\hat{\theta} = [\phi^T(k)\phi(k)]^{-1} [\phi^T(k)y(k)] \quad (18)$$

Böylelikle öz yinelemeli algoritmalarda sistemden edinilen verilerin her bir örnekleme anında güncellendiği ifade edilmekte,  $k-1$  anında ki parametre vektörü olan  $\hat{\theta}(k-1)$ ,  $k$  anındaki sistem çıkışını,  $\hat{y}(k)$  etkilemektedir. Kestirilen sistem çıkışı ile gerçek sistem çıkışı karşılaştırılmakta ve  $\varepsilon(k)$  hata sinyali (20),  $P(k)$  kovaryans matrisini ise (19) ile verilmektedir [6].

$$P(k) = [\phi^T(k)\phi(k)]^{-1} \quad (19)$$

Öz yinelemeli en küçük kareler yönteminde model kestirim hatası (20) ve parametrelerin güncelleme ifadesi (21) ile verilmektedir.

$$\varepsilon(k) = y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (20)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k)\phi(k)\varepsilon(k) \quad (21)$$

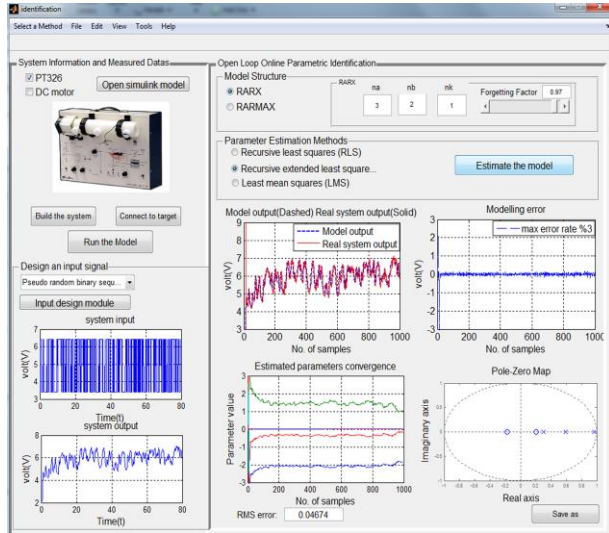
Burada  $P(k)$  kovaryans matrisinin güncellenmesi matris tersleme kuralı kullanılarak (22) gibi elde edilmektedir.

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} P(k-1) \left[ I_z - \frac{\phi(k)\phi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)} \right] \quad (22)$$

Tablo 1: Anlık Sistem Tanılama ile elde edilen Ayrık Transfer fonksiyonu

Model	Transfer Fonksiyonu
2.derece	$G(z^{-1}) = \frac{0.009264 z^{-1}}{1 - 1.807 z^{-1} + 0.8145 z^{-2}}$
3.derece	$G(z^{-1}) = \frac{0.007855 z^{-2}}{1 - 2.091 z^{-1} + 1.439 z^{-2} - 0.341 z^{-3}}$

Anlık (çevrimiçi)<sup>1</sup> parametre güncelleme algoritmaları aynı zamanda uyarlamalı kontrol ve hata tespit-teşhis uygulamaları içinde bir alt yapı tesis etmektedir, sistem değişikliklerinin her örneklemde anında güncellenebilmesi felsefesine dayanan öz yinelemeli algoritmalar, kendinden ayarlamalı sistemler içinde vazgeçilmezdir.



Şekil 4: Sistem tanılama ara yüzü ve ısıtma süreci modeli.

Sistem tanılama ara yüzü ile elde edilen ayrık zamanlı model parametreleri Tablo.1 ile verilmektedir. Modelleme hatası, kutup-sıfır durumu ve gerçek sistem ile model çıkışının karşılaştırılması Şekil.4 ile gösterilmektedir.

<sup>1</sup> İng. *Online identification*

### 3. Zaman Gecikmeli Isıl Sürecin Kontrolü

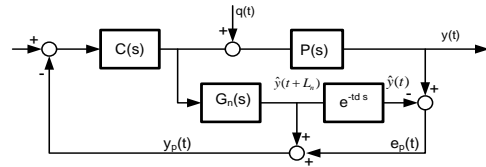
#### 3.1. PI Tabanlı Smith Öngörücüsü ile Kontrol

Klasik PI ya da PID tabanlı kontrol yaklaşımları gecikmeli sistemlerin kapalı döngü performans isteklerini tek başına sağlamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu tür sistemler için Şekil.5 ile verilen Smith öngörücüsü tabanlı kontrol yaklaşımları daha iyi sonuç vermektedir [5]. (4) ile verilmekte olan zaman gecikmeli bir sistem modeli için tasarlanan kapalı döngü transfer fonksiyonu (23) ile sunulmaktadır.

$$C_e(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)[G_n(s) - P_n(s)]} \quad (23)$$

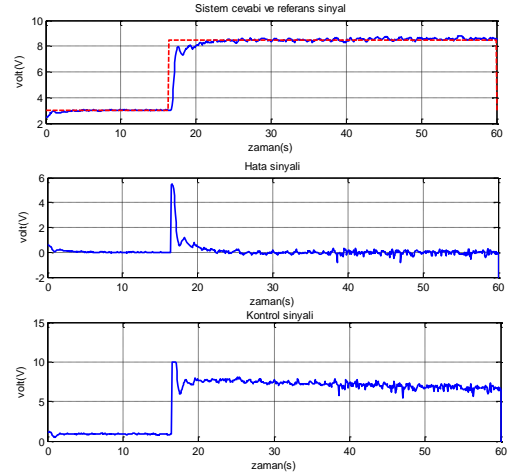
Smith öngörücüsü için tasarlanan PI tabanlı kontrolörün kazanç ayarlaması açık çevrim kutbunu elemine edecek şekilde yapılır. Sistemin karakteristik denklemi:

$$1 + C(s)G_n(s) = 1 + \frac{K_1 K_p}{\tau s} \quad (24)$$



Şekil 5: Smith öngörücüsü yapısı.

Bu yaklaşımda Smith öngörücüsü sistemin kontrolcüsünü sistem modeli ve gecikme terimi ile besleyerek çıkışa iletir. Smith öngörücüsü için tasarlanan PI kontrolcü parametre değerleri  $K_I=1.94$  ve  $T_I=1.23$  olarak seçilmiş ve Isıl süreç üzerine uygulanan kontrolör ile sistemin kapalı döngü cevabı Şekil.6 ile verilmektedir.



Şekil 6: Sistemin kapalı döngü performansı.

#### 3.2. İki Serbestlik Dereceli Smith Öngörücüsü ile Kontrol

İki serbestlik dereceli kontrol<sup>2</sup> yapısı Şekil.7 ile verilen blok diyagramında gösterilmektedir [5]. Bozucunun etkili olduğu

<sup>2</sup> İng. *2DOF, Degree of Freedom*

durumlarda kapalı döngü sistemin en az aşım ve bozucuyu hızlı bastırabilen yapıda olması için iki serbestlik dereceli kontrol yaklaşımı tercih edilmektedir. Blok diyagramı Şekil.7 verilen iki serbestlik dereceli (2DOF) Smith öngörücüsü bozucu etkili ölü zamanlı sistemlerin kontrolünde etkili olan diğer bir yaklaşımdır. Bu yöntemde parametre ayarlama şu şekilde özetlenebilir. PI tabanlı bir kontrolcü yapısı ile seçilen  $C(s)$  ve  $G_n(s)$  (25) ile verilmektedir [5].

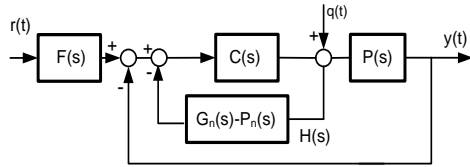
$$G_n(s) = \frac{K_p}{1 + \tau s}, C(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \quad (25)$$

ve  $T_i = \tau$  seçilerek karakteristik denklem:

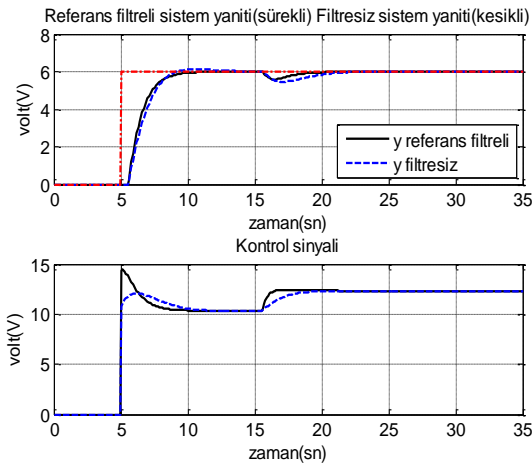
$$1 + C(s)G_n(s) = 1 + \frac{k_c K_p}{sT_i} \quad (26)$$

Kapalı döngü için uygun  $\tau_{sc}$  (zaman sabiti) seçilerek  $k_c$  terimi (27) ile hesaplanır [5].

$$k_c = \frac{T_i}{K_p \tau_{sc}}, F(s) = \frac{1 + s\beta T_i}{1 + sT_i} \quad (27)$$



Şekil 7: İki serbestlik dereceli Smith öngörücüsü.



Şekil 8: İki serbestlik dereceli Smith öngörücüsü ile sistem cevabi.

Şekil.8 ile verilmekte olan sistem cevabi için küçük  $k_c$  değerleri seçildiğinde etki eden bozucular daha hızlı bastırılmakta ve aşım gözlemlenmemektedir. Bununla birlikte referans filtresi için küçük  $\beta$  değerleri sistem cevabını yavaşlatmaktadır.

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada yazarlar tarafından tasarlanan etkileşimli sistem tanılama ara yüzü üzerinden ısı süreci sisteminin gerçek zamanlı tanılanması yapılarak sürekli ve ayrık sistem modelleri oluşturulmuştur. Sistemin değişken yapıda gecikmeli durumda olması halinde uyarılar bir kontrolcü tasarımı esas amaçtır bu sebeple ilkin modelleme ve özyinelemeli en küçük kareler yaklaşımı ele alınmaktadır.

Bununla birlikte elde edilen sürekli model ele alınarak, zaman gecikmeli sistemlerin kontrolünde önemli bir yere sahip Smith öngörücüsü yapısını içeren bir takım uygulama sonuçları ele alınmaktadır. Yapılan çalışmada bahsi geçen tüm kontrol yöntemlerinin parametreleri yöntemlerin temel yapılarıyla çalışmıyacak ve gerçek zamanlı sisteme uygulanabilecek olmasına özen gösterilmiştir.

İleriki çalışmalarda sistemin dijital zamanlı gecikmeli yapısı için ayrık zamanlı Smith öngörücüsü tasarlanacak ve kararlılık analizi üzerine odaklanılacaktır.

## Teşekkür

N.Sinan ÖZBEK, Doktora araştırmaları sırasında 2214-A programı kapsamında, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından desteklenmektedir.

## 5. Kaynaklar

- [1] Efe. M. Ö. *Otomatik kontrol sistemleri*, Seçkin yayıncılık, 2013, Ankara
- [2] Södeström T., Stoica P., “Recursive identification methods”, *System Identification*, Printice Hall 1989, s.320-373.
- [3] Wellstad P.E and Zarrop M.B., “Computational alternatives for recursive estimation”, *Self Tuning Systems*, Wiley 1991, s: 123-170.
- [4] Furat M., Eker İ., “Computer-Aided experimental modeling of a real system using graphical analysis of a step response” *Comput. App.Eng. Educ.*, Eylül 2010 DOI:10.1002/cae.20482
- [5] Normey-Rico J.E., and Camacho E. F., *Control of Dead-time Processes*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [6] Eker İ., “ Open-loop and closed-loop experimental online identification of three mass electromechanical system”, *Mechatronic*, Cil.4, No.5, s:549-565, Haziran 2004
- [7] Eker İ., “Experimental on-line identification of an electromechanical system”, *ISA Trans.* Cil.43, No.1, s:13-22, Ocak 2004.