

# KESİKLİ BİR POLİMERİZASYON REAKTÖRÜNE FARKLI OPTİMAL ŞARTLARDA SICAKLIK KONTROLUNUN UYGULANMASI

Sevil Çetinkaya<sup>a</sup>, Hasan H. Durmaz<sup>a</sup>, Zehra Zeybek<sup>b</sup>, Hale Hapoğlu<sup>b</sup>, Mustafa Alpbaz<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

<sup>b</sup>Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06100, Tandoğan, Ankara

[cetinkaya.sevil@gmail.com](mailto:cetinkaya.sevil@gmail.com), [hdurmaz@cumhuriyet.edu.tr](mailto:hdurmaz@cumhuriyet.edu.tr), [Zehra.Zeybek@eng.ankara.edu.tr](mailto:Zehra.Zeybek@eng.ankara.edu.tr),

[Hale.Hapoglu@eng.ankara.edu.tr](mailto:Hale.Hapoglu@eng.ankara.edu.tr), [alpbaz@eng.ankara.edu.tr](mailto:alpbaz@eng.ankara.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.10.2012; Kabul/Accepted: 28.03.2013)

## ÖZET

Genelleştirilmiş öngörmeli kontrol(GPC) ile genelleştirilmiş delta kuralı(GDK) izotermal koşullar altında stirenin polimerizasyonunun gerçekleştiği ceketli kesikli bir reaktörün sıcaklığını kontrol etmede kullanılmıştır. Monomer dönüşümü, viskozite ortalama molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu üzerine değişik optimal koşulların etkileri incelenmiştir. Reaktör sıcaklığı ve reaktöre verilen ısı arasındaki etkileşime dayanan yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. GPC'li GDK'nın etkinliği belirlenen sabit sıcaklıklarda GDK parametreleri kullanılarak deneysel ve benzetim ile incelenmiştir. Sonuçlar Self-Tuning PID (STPID) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kontrol deneyleri sonucunda GDK-GPC kontrol yönteminin iyi bir performans gösterdiği ve istenilen özelliklerde polimer elde edildiği gözlenmiştir. Ayrıca GDK-GPC yönteminin STPID yönteminden daha iyi olduğu hem kontrol performansından hem de elde edilen polimer özelliklerinden gözlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Polimerizasyon reaktörü, genelleştirilmiş delta kuralı algoritması, genelleştirilmiş öngörülüş kontrol

## APPLICATION OF TEMPERATURE CONTROL IN A BATCH POLYMERIZATION REACTOR AT DIFFERENT OPTIMAL TEMPERATURES

### ABSTRACT

The generalized delta rule (GDR) algorithm with generalized predictive control (GPC) was used to control the temperature of a jacketed batch reactor in which styrene polymerization occurs under isothermal conditions. The effects of different optimal conditions were examined on monomer conversion, average viscosity molecular weight and chain length. The neural network model based on the relation between the reactor temperature and heat input to the reactor was used. The efficiency of the GDR with GPC was examined by simulation and experimentally using GDR parameters specified at constant temperatures, and compared with Self-Tuning PID (STPID). It was observed that the control experiments provided a good performance in maintaining the reactor temperature at its set point and yielded polymer product with desired properties.

**Keywords:** Polymerization reactor, generalized delta rule algorithm, generalized predictive control

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri genellikle molekül ağırlıklarıyla yakından ilgilidir. Düşük molekül ağırlıklı polimerler zayıf moleküler özelliklere sahiptirler ve çeşitli kimyasallarla etkileşimdedirler. Spesifik bir polimerin ortalama molekül ağırlığı polimerin mekanik özellikleri

üzerinde etkilidir. Serbest radikal polimerizasyon metoduyla oluşan polimerin moleküler ağırlığını etkileyen ana parametreler başlangıç başlatıcı konsantrasyonu ve sıcaklığıdır [1]. Prosesin amacı, mekanik dayanım, erime viskozitesi, yumuşama sıcaklığı gibi son kullanım özelliklerine sahip ürünler elde etmektir. Bu ticari özelliklerin ortalama molekül ağırlık dağılımı ile ilişkilidir [2]. İstenilen polimer

kalitesini elde etmek için polimerizasyon reaktörlerinin kontrolü baş edilmesi gereken önemli bir problemdir. Polimerizasyon reaktörlerinin karmaşık ve doğrusal olmamasına ek olarak besleme koşulları, karıştırma ve reaktör sıcaklığı gibi değişkenler de ürün kalitesini etkileyen faktörlerdendir [3-5].

Çeşitli kontrol metotları optimum koşullar için polimerizasyon reaktörlerine uygulanmış, kontrolün etkinliği ve ürün kalitesi artırılmaya çalışılmıştır [6-8]. Polimerizasyon kinetiğinin ve sıcaklık değişiminin, elde edilen polimerin kalitesi ve fiziksel özellikleri üzerinde, büyük bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Böylece istenilen polimer kalitesine ulaşmak için reaktör sıcaklığı etkili biçimde kontrol edilmelidir. Çeşitli kontrol metotları, sabit ve değişken set noktalarında, hem teorik hem de deneysel olarak sistemlere uygulanmıştır.

Altınten ve arkadaşları [9] genetik algoritmali(GA) Fuzzy Kontrol(FK) metodunu sabit bir set noktasında bir polimerizasyon reaktörüne uygulamıştır. Onlar, hem de değişen sıcaklık izinde GA ile fuzzy kontrolörün performansını araştırmışlardır [10]. Erdoğan ve arkadaşları [3] çalışma koşullarının kesikli polimerizasyon reaktörünün performansını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Onlar, Lagrange's Çarpanları metoduyla hesaplanan optimal koşullar altında kesikli bir polimerizasyon reaktörüyle deneysel olarak çalışmışlardır. Ayrıca, Erdoğan ve arkadaşları Self-Tuning PID (STPID) ve PID kontrol metotlarını, değişken set noktalarında, kesikli bir polimerizasyon reaktörüne hem teorik hem de deneysel olarak uygulamış ve polimer kalitesi için monomer dönüşümü, moleküler ağırlığı ve ortalama zincir uzunluğu sayısının önemini vurgulamıştır. Lewis ve arkadaşları [12] radikal polimerizasyon üzerinde başlatıcı miktarının önemini vurgulamıştır. Altınten ve arkadaşları [13] kesikli ceketli bir polimerizasyon reaktöründe genetik algoritma(GA) ile Self Tuning PID(STPID) kontrolörünü uygulamıştır. Hem deneysel hem de benzetim olarak optimal sıcaklık profilinin izleme performansını araştırmışlardır. Optimal yol izleme üzerinde GA ile STPID performansının PID kontrol metodundan daha başarılı bir biçimde yürütüldüğünü göstermişlerdir.

Polimerizasyon reaktörüne yapay sinir ağlarının uygulanmasıyla ilgili az çalışmaya rastlanmıştır. Zhang ve arkadaşları [14] polimer kalitesi ile kesikli yöntemler arasındaki ilişkiyi bulmak için güçlü bir sinir ağı (robust neural network) kullanmışlardır. Bu sinir ağı, eğitilen yeni datalar ve bunların birleşiminden oluşan birçok sinir ağlarının geliştirilmesi ile elde edilir. Benzetimi yapılmış bir kesikli reaktör için önerilen tekniğin uygulaması, polimer kalitesini tam olarak önceden tahmin edebilen ve tahmini kontrol için kullanılabilen bir teknik olduğunu gösterir. Yang ve arkadaşları [15] yarı

kesikli bir polimerizasyon reaktörünü farklı üç yaklaşım için modellemede yapay sinir ağlarını (YSA) kullandılar ve YSA kullanılarak yarı kesikli bir reaktörün modellenmesi için onları değerlendirdikten sonra üç aşamalı modelleme yaklaşımı tavsiye edildi. Onların sonuçları önerilen çok aşamalı yaklaşımın, yarı kesikli süreç için, kabul edilebilir bir doğrulukla polimer değişkenlerini ölçmekte kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Zeybek [16] Uyarlanırs Keşifsel Kritik Etme (Adaptive Heuristic Criticism, AHC) temelinde bir endüstriyel fırının çok değişkenli kontrol yapısını geliştirdi ve uyguladı. Bu algoritma üç katmanlı ileri yapay sinir ağıydı (YSA). Çalışmasında, AHC'nin kararsız / minimum olmayan faz ve zamanla değişen davranışları içeren farklı işletmeler için uygun olduğunu gösterdi.

Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (Generalized Predictive Control, GPC) algoritması genellikle polimerizasyon reaktörlerinde kullanılır [17,18]. Fakat GPC algoritması nadiren sinir ağı modelleri ile yapılmıştır. Zeybek ve arkadaşları [19] farklı değişen sıcaklık izleri için genelleştirilmiş öngörmeli kontrol ile genelleştirilmiş delta kuralını (GDK) geliştirdiler ve kesikli bir polimerizasyon reaktörüne deneysel olarak uyguladılar. Eğer model eşitlikleri bilinmiyorsa veya girdi-çıkı verileri bulunmuyorsa sistem tanımlama için GDK uygulanabilir. Ayrıca GDR algoritmasının geçmiş girdi-çıkı verilerini kullanmaya ihtiyacı yoktur. Onlar GDK-GPC algoritmasının performansının doğrusal olmayan sistemler için mükemmel olduğunu ve istenilen molekül ağırlığı, monomer dönüşümü ve zincir uzunluklarına ulaşabileceklerini gösterdiler. Hsu ve arkadaşları [20] yaptıkları çalışmada sabit set noktasının önemini vurguladılar. Onlar, sitirenin önceden belirlenen ve son monomer dönüşümü ve ortalama molekül ağırlığı için, Lagrangian'ın çarpanları metodunu kullanarak farklı zaman aralıklarında sabit sıcaklık izinde toplam reaksiyon zamanını minimize etmek için bir metot geliştirdiler.

Makalelerde kimyasal prosesler üzerine yürütülen birçok sinir ağları algoritmaları verilmesine [21,14] ve değişen sıcaklık izi üzerine bir çok deneysel çalışma olmasına rağmen [10,13,17,22,23], sabit set noktası üzerine, sinir ağlarını kullanarak, çok az çalışma yapılmıştır [9,18].

Bu çalışmada, genelleştirilmiş delta kuralı (GDK) ile genelleştirilmiş öngörmeli kontrol(GPC) algoritması bir polisitiren reaktörünü sıcaklığını kontrol etmek için, sabit set noktasında, ilk defa uygulanmıştır. Değişken set noktasında, gel etkisinden ve doğrusal olmayan bir sistem olmasından dolayı, salınımların çok olması bekleneceğinden bu çalışmada sabit set noktası uygulanmıştır [24]. GPC li GDK'nin performansı Self Tuning-PID ile karşılaştırılarak ürün kalitesi açısından GDK\_GPC'nin önemi tartışılmıştır.

## 2. GDK ALGORİTMASI (GDR ALGORITHM)

GDK algoritması çok tabakalı ağların eğitimine izin veren önemli bir algoritmadır. Rumelhart [27] ve arkadaşları tarafından delta kuralından elde edilen bir genelleştirilme gizli tabakalı ağlar için gereklidir. Rumelhart ve arkadaşları GDK'yi popüler hale getirmelerine rağmen, kendi kendine öğrenme kuralı önceleri üç ayrı bağımsız durum ortaya çıkardı; ilki 1974'de Werbos [28], daha sonra 1982'de Parker [29] ve son olarak da 1986 da LeCun [30] tarafından ortaya atıldı. Gerçekte, GDK geri yayılma (back propagation) (BP) şeklinin basit bir temelidir. Onun en genel haliyle, BP büyük sistemlerin kontrolüne ve tahminine katkıda bulunur ve sık sık söz edildiği gibi denetimli öğrenmesi basit değildir. Sonuçta, BP herhangi bir diferansiyellenebilir, seyrek, doğrusal olmayan sisteme uygulanabilir. Hata minimizasyonunun geleneksel metotlara göre BP'nin temel avantajı, bir N faktörünün türevlerinin hesaplama maliyetini azaltır. Böylece, problemlerin uygulanabilmesi için hassasiyete ve yüksek derecede nonlieneer olmaya izin verir.

BP öğrenmede ağırlıkların iyileştirilmesi, bir sinir ağı BP öğrenme algoritmasının gelişmesinde temel rolü olan genelleştirilmiş delta kuralına izin verir. Delta kuralı veya 'Widrow-Hoff rule' [31] kuralı aşağıdaki amaç fonksiyonlu bir optimizasyondan çıkarılır [32]:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (y_{pj} - y_{pj}^d)^2 \quad (1)$$

Burada  $E_p$ , I/O (girdi/çıktı) örnek p için hata ölçümüdür ve  $E = \sum E_p$  hata toplamıdır. Genelleştirilmiş delta kuralı  $E_p$ 'yi minimize etmek için dik iniş yaklaşımı (gradient descent approach) ile elde edilebilir. Doğrusal bir sinyal farz edilerek, delta kuralı basitçe aşağıdaki gibi verilebilir:

$$-\frac{\partial E_p}{\partial W_{ji}} = \delta_j u_j \quad (2)$$

$$\Delta W_{ji} \alpha \frac{\partial E_p}{\partial W_{ji}} \quad (3)$$

$$\Delta W_{ji} = \eta \delta_j u_j \quad (4)$$

Burada  $\eta$  öğrenme hızını gösterir veya plastiklik katsayısı olarak adlandırılır:  $\{\delta_j = (y_j - y_j^d), j=1, n\}$  geri bildirim öğrenme olarak kullanılan hata sinyalleridir. R ve n sırasıyla girdi ve çıktı katmanlarındaki nöron sayılarını gösterir.

### 2.1. Doğrusal Olmayan GPC'li GDK Algoritmasının Dizayını (Design of GDR algorithm with nonlinear GPC)

Bu çalışmada, doğrusal olmayan sistemler için, doğrusal olmayan sinir ağı modeli kullanımı

NARMAX (Nonlinear Auto Regressive Moving Average) modeline tercih edilmiştir. NARMAX model aşağıdaki gibidir;

$$y(k) = F[y(k-T), y(k-2T), y(k-n_y T), u(k-T), u(k-2T), \dots, u(k-n_u T)] \quad (5)$$

Burada önceki çıktının bazı fonksiyonları  $y(k-T)$ ,  $y(k-2T)$  ve girdiler  $u(k-T)$ ,  $u(k-2T)$ , ...

Önerilen gelecek kontrol dizisi  $\{u(t+j)\}$

aşağıdaki gibi bir maliyet fonksiyonunu minimize etmek için t zamanında GPC tarafından dizayn edilir.

$$J(N_1, N_2, N_u, \lambda) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \varepsilon^2(t+j) + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta U^2(t+j-1) \quad (6)$$

Burada,  $N_1$  minimum maliyet ufku,  $N_2$  maksimum maliyet ufku ve  $N_u$  kontrol maliyet ufkudur.  $\varepsilon$ , tahmini gelecek sistem hatalarından  $(W(t+j) - \hat{y}(t+j))$  oluşan hata vektörünü verir. W sinyali sistem çıktısını izlemek için seçilen referans sinyalidir ve  $\lambda$  kontrol ağırlığıdır. GPC'li GDK'nin fiili uygulamasında,  $N_2$  maksimum girdi ufkunda  $N_2$  sistem girdisi oluşturulur. Gelecek zaman adımında, giriş hesabı tekrarlanır. Ayrıca, kontrol modele dayalı kontrol şeklinde kabul edilebilir.

Bu kontrol için, NARMAX model kullanılır. GDK-NARX modeli geliştirmek de mümkündür. Bu model Sekil 1.'de görülmektedir.

GPC'ye göre aşağıdaki ifade yazılır:

$$\hat{y} = \bar{G} \Delta \bar{u} + f \quad (7)$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_u-1} & g_{N_u-2} & \dots & g_0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \dots & g_{N_2-N_u} \end{bmatrix}_{N_2 \times N_u}$$

GDR-GPC algoritmasını oluşturmak için kullanılan model aşağıda verilmiştir:

$$A y_t = B f(u_{t-1}) + \frac{C e_t}{\Lambda} \quad (8)$$

$$f(\cdot) = \frac{I}{1+e^{-\sum w_{ji} I_i}} \quad \text{GDK-NARX için}$$

Veya,

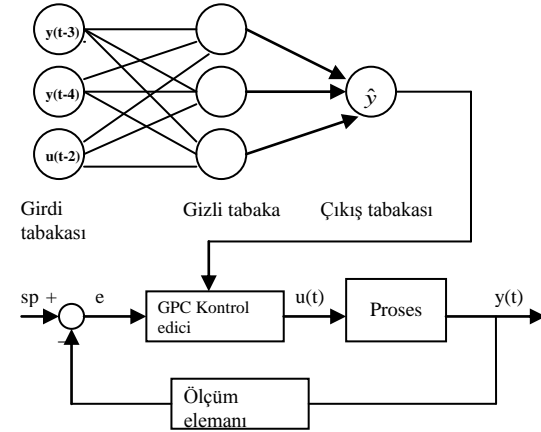
NARMAX için

$$f(\cdot) = a_1 y_{t-1} + b_1 u_{t-1}^4$$

$$W_{1,1}y(t-1) + W_{2,1}y(t-2) + W_{3,1}U(t-1) = y(t),$$

$$A = I - W_{1,1} - W_{2,1} \text{ ve } B = -W_{3,1}$$

$$\Delta = 1 - z^{-1}$$



**Şekil 1.** Bir polimerizasyon reaktörünün kontrolünde GDK'li GPC'nin şematik gösterimi (sp=set noktası, e= hata) (Fig. 1. Schematic diagram of the structure of GDR with GPC on polymer temperature control (sp= set point, e = error)).

$\Delta$  fonksiyonu, offset'i, kargaşa ve bunun gibi etkileri yok etmek için kullanılan kontrol edicideki integral etkisidir.  $C(z^{-1})$  polinomu kararlı polinom olarak kabul edilebilir.

GDK'de  $T_{1i} = y(t-1)$ ,  $T_{2j} = y(t-2)$  ve  $T_{3k} = u(t-1)$  uygulanır. Bu değerler YSA'nın tüm ağa giren nöronları boyunca güncellenir

$$\frac{C}{A\Delta} e(t+j) = Ee(t+j) + z^{-j} \frac{F}{A\Delta} e(t+j) \quad (9)$$

Burada  $Ee(t+j)$  gelecek veriyi,  $(F/\Delta A)$   $e(t)$  geçmiş veriyi gösterir. E değeri, t zamanında bilinmeyen bütün verileri içerir.

$$E = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1} \quad (10)$$

Böylece istenen tanımlama:

$$C = EA\Delta + z^{-j}F \quad (11)$$

Eşitlik 8, eşitlik 11'de yerine yazılır ve  $t=t+j$  koyarak;

$$y(t+j) = \frac{B}{A} f[u(t+j-1)] + Ee(t+j) + \frac{F}{A\Delta} e_t \quad (12)$$

$$\Delta y(t+j) = \frac{B}{A} \Delta f[U(t+j-1)] + \Delta Ee(t+j) + \frac{F}{A} e_t \quad (13)$$

$$f[U(t+j-1)] = \exp(u(t+j-1))$$

$$\Delta f[U(t+j-1)] = \Delta \exp(u(t+j-1)) = e^{u(t+j-1)} - e^{u(t+j-2)} = f_1(\Delta U_{t+j-1}) \quad (14)$$

Burada,  $U_{t+j-1} = e^{u_{t+j-1}}$   
Eşitlik (8)'den  $e_t$  yerine konulursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$y_{t+j} = \frac{F}{C} y_t + \frac{EB}{C} f_1(\Delta U_{t+j-1}) + Ee_{t+j} \quad (15)$$

Son terim sıfır alınarak  $y_{t+j}$ 'minimum varyans tahmini;

$$y_{t+j} = \frac{F}{C} y_t + \frac{EB}{C} f_1(\Delta U_{t+j-1}) \quad (16)$$

Burada, t zamanında bilinen sinyallerin ve henüz hesaplanmamış gelecek kontrol girdilerinin bir fonksiyonudur. Geçmiş ve gelecek kontrol verilerini ayırmak için ikinci Diophantine eşitliği uygulanır.

$$\frac{EB}{C} f_1(\Delta U_{t+j-1}) = Gf_1(\Delta U_{t+j-1}) + \frac{\Gamma}{C} f_1(\Delta U_{t-1}) \quad (17)$$

Burada  $G\Delta u_{t+j-1}$  gelecek datayı  $(\Gamma/C)\Delta u_{t-1}$  ve geçmiş ve şimdiki datayı gösterir. Böylece istenen denklem;

$$\frac{EB}{C} = G + z^{-j} \frac{\Gamma}{C} \quad (18)$$

Eşitlik 18 ile birleştirilerek

$$\hat{y}_{t+j} = Gf_1(\Delta U_{t+j-1}) + \frac{\Gamma}{C} f_1(\Delta U_{t-1}) + \frac{F}{C} y_t \quad (19)$$

Elde edilir ve;

$$\hat{y}_{t+j/t} = \frac{\Gamma}{C} f_1(\Delta U_{t-1}) + \frac{F}{C} y_t \quad (20)$$

Burada  $\hat{y}_{t+j/t}$ , t-1 zamanı sıfır olduktan sonra gelecek kontrol artışlarını farz eden  $y_{t+j}$ 'nin serbest cevap tahminini gösterir.  $f_2$  vektörü tahmini serbest cevap vektörü ise, o zaman:

$$f_2 = [\hat{y}_{t+1/t}, \hat{y}_{t+2/t}, \hat{y}_{t+3/t}, \dots, \hat{y}_{t+N_2/t}]^T \quad (21)$$

Yani  $\hat{y}(t+j)$ ,  $j=1, \dots, N_2$  tahmini,  $j=0, \dots, N_u-1$  için  $u_{t+j} = 0$  yerde,  $(u_{p-1}, y_p, p \leq t)$  uygulanır.

Gelecek kontrol artış vektörü  $\hat{u}$  aşağıdaki gibi olacaktır:

NARMAX için

$$U = [\Delta u_t^4, \Delta u_{t-1}^4, \dots, \Delta u_{t+N_u-1}^4]^T \quad (22)$$

$$\text{GDK-NARX için} \\ U = [f_1(\Delta U_t), f_1(\Delta U_{t-1}), \dots, f_1(\Delta U_{t+N_u-1})]^T \quad (23)$$

Kontrol edilen sistem çıktılarının tahmini vektörü aşağıdaki gibi verilir:

$$\hat{y} = [\hat{y}_{t+1}, \hat{y}_{t+2}, \dots, \hat{y}_{t+N_2}]^T \quad (24)$$

GDK-NARX-model ile modellenip kontrol edilecek sistemin bir adım ileri tahmini aşağıdaki gibi verilir;

$$\hat{y}(t) \equiv \hat{y}(t+k/t) = G(y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-\tau), \dots, u(t-\tau-m)) \quad (25)$$

Eşitlik 25'te  $G$ , gecikme süresi,  $\tau$ , en az bir tane kabul edilirken, sinir ağları ile oluşan  $g_i$  sistem modelinde impuls yanıt parametrelerinin matrisini kasteder. Yukarıdaki modele göre,  $n$  geçmiş çıktı ve  $m$  geçmiş kontrol girdisi, girdi olarak alınır. Bu da GDK-NARX model olarak adlandırılır. Ölçülen çıktı  $t-1$ 'e kadar uygundur. Daha sonra  $-\hat{y}(t)$ ,  $y(t)$  yerine kullanılır.

Aşağıdaki eşitlikler, gizli tabaka ve bir doğrusal çıktı tabakasındaki aktivasyon fonksiyonları  $1/(1+e^{-x})$  ile üç tabaka GDK-sinir ağı olacağı farz edilen, eklenen  $g$  ile ortaya çıkar.

$$\hat{y}(t+k) = \sum_{j=1}^{n_h} W_j f(H(k, j)) + W_0 \quad (26)$$

Burada

$$f(x) = 1/(1+e^{-x}) \quad \text{ve}$$

$$H(k, j) = \sum_{i=1}^{\min(k,n)} w_{ji} \hat{y}(t+k-i) + \sum_{i=\min(k,n)}^n w_{ji} y(t+k-i) + \sum_{i=0}^m w_{ji} u(t-\tau+k-i) + w_{j0} \quad (27)$$

$y(t+k/t)$ ,  $N_1 \leq k \leq N_2$  tahminlerinin her birini direk olarak üretmek için  $N_2 - N_1 + 1$  sinir ağlarını eğitmek mümkündür.

Optimal kontrolde verilen  $J_{\min}$  için çözüm, aşağıda verilen, gelecekte artan kontrol vektörü  $U$ 'dur.

$$\bar{u}_{opt} = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (28)$$

burada  $U = \Delta U(t)$  ve gerçek kontrol çıktısı

$U(t)$  aşağıdaki gibi değerlendirilir:

$$\hat{U}(t) = \hat{U}(t-1) + g^T (w - f) \quad (29)$$

$$g^T = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T = Kc \quad (30)$$

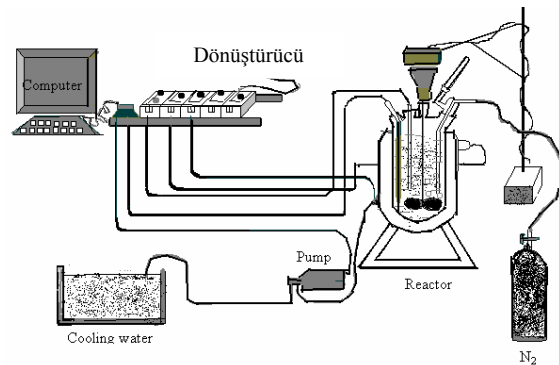
Burada,  $w$  aşağıda gösterildiği gibi referans sinyalinin tanımları:

$$w = [w_{t+1}, w_{t+2}, \dots, w_{t+N_2}]^T \quad (31)$$

Eşitlik 28'deki kontrol kazancı sabit kalır. Yalnızca  $f$  ve  $w$  vektörleri gelecek örnekleme zamanı için güncellenir.

### 3. DENEYSEL SİSTEM (EXPERIMENTAL SYSTEM)

Deneysel sistem Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu çalışmada ceketli silindirik bir reaktör kullanılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarını ölçmek için iki termoçift, reaktör içi sıcaklığını ölçmek için bir termoçift gerekli yerlere yerleştirilmiştir; pompa akış hızını, sisteme verilen ısı miktarını ayarlamak için çevirici modülüne kablolar ile bağlantılar yapılmıştır. Bu çalışmada iki çıktı (pompa ve ısıtıcı) ve üç girdi (reaktör sıcaklığı, soğutma suyu giriş sıcaklığı ve soğutma suyu çıkış sıcaklığı) için modüle bağlantılar modül üzerinden ve VisiDAQ programından yapılmıştır. Soğutma suyu reaktör ceketine bir peristaltik pompa yardımıyla gönderilir. Reaktörün ısıtılması, içine konulan; kuars camdan yapılmış bir dalgıç ısıtıcı ile yapılmaktadır. Bütün deneylerde ayarlanabilen değişken reaktöre gönderilen ısı olarak alınmıştır.



Şekil 2. Deneysel sistem (Experimental system)

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

Bu çalışmada, farklı bezoil peroksit başlangıç başlatıcı derişimleri için minimum polimerizasyon zamanında optimum reaktör sıcaklıkları belirlenmiştir. Kontrol amacı için iki farklı optimum sıcaklık set noktası olarak alınmıştır. Doğrusal olmayan GPC-GDK, bu optimum sıcaklıklarda, stirenin monomer olarak kullanıldığı bir polimerizasyon reaktörüne uygulanmıştır. Optimum

reaktör sıcaklıklarını hesaplamak için Lagrange's çarpanları metodu kullanılmıştır [18]. Bu çalışmada kullanılan çalışma koşulları Tablo 1.'de verilmiştir.

Bu çalışmada, YSA'nın (Yapay Sinir Ağı) bir polimerizasyon reaktöründe modelleme ve kontrol için kullanıldı. GPC'li model parametreleri GDK algoritması kullanarak tahmin edildi. Ağların ağırlıkları off-line tahmin edildi ve öğrenme uygun açık hat deneyleri ile sağlanan girdi-cıktı verileriyle gerçekleştirildi. GDR üç girdi ağı, bir gizli tabakada üç saklı ağı ve bir çıktı ağına sahiptir.

Bu sistemin benzetimi için MATLAB programı kullanıldı. Optimum model parametreleri aşağıda verilmiştir:

$$a_1=-1,33339; a_2=0,73475; b_1=-0,02043;$$

$$y(t)=a_1y(t-1)+a_2y(t-2)+b_1U(t-1), \quad (32)$$

burada,

$$U(t-1)=\exp u(t-1) \quad (33)$$

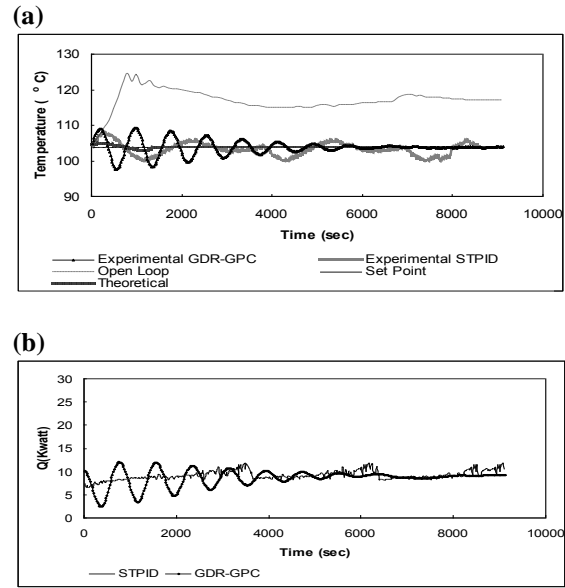
GDK-GPC yönteminin etkinliği STPID kontrol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. STPID model katsayıları Bierman Algoritması ve en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır. Kesikli reaktörün tanımlı modeli aşağıdaki gibidir:

$$y(t) = \frac{0,00084}{1 - 0,004515z^{-1} + 0,007z^{-2}} u(t-1) \quad (34)$$

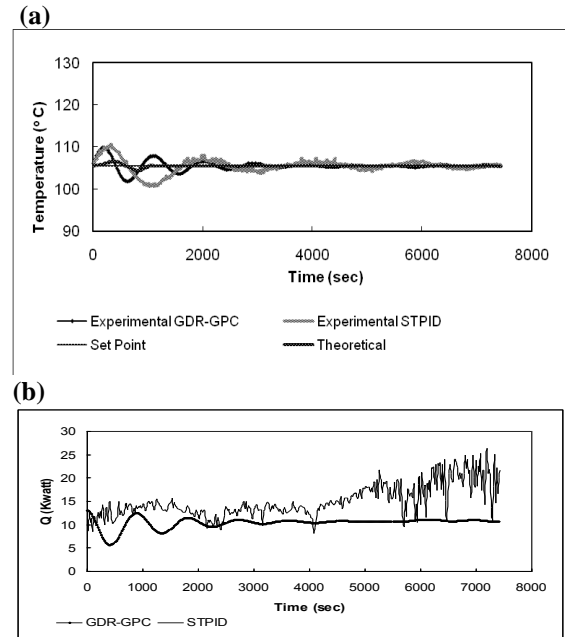
STPID algoritması için gerekli parametreler açık-hat basamak etkisi ile oluşturulan eğri kullanılarak elde edilmiştir (Sekil 3a). Bu çalışmada, istenen polimer kalitesine göre bazı deneyler yapılmıştır. Monomerin dönüşümü, ortalama viskozite molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu üzerine optimal şartların etkisi incelenmiştir. Tablo 1.'de gösterilen optimal şartlar, Lagrange'in çarpanlar metodu kullanılarak hesaplanmıştır [25]. Polimerizasyon reaktörün sıcaklığı ısıtıcı gücü ayarlanabilen değişken olarak kullanılarak kontrol edilmiş ve kontrol performansı izlenmiştir.

VisiDAQ programı, veri toplamak ve sistemi kontrol etmek için kullanılmıştır. Benzetim sonucuna göre reaktör sıcaklığı çok iyi bir şekilde set noktasında tutularak kontrol sağlanmıştır (Sekil 3). GDK-GPC'nin performansını görmek ve STPID ile karşılaştırma yapmak için bazı deneyler yapılmıştır. Sekil 3(a) ve 4(a), farklı başlangıç başlatıcı derişimlerinde zamanla sıcaklık değişimini göstermektedir. Başlangıçta, her iki kontrol yöntemi için de set noktasını aşan salınımlar gözlenmektedir. 4000. saniyeden sonra GDK-GPC kontrol edicinin sıcaklığı set noktasına getirdi ve burada tuttuğu gözlenmesine rağmen aynı performans STPID kontrol yönteminde gözlenmemiştir. STPID kontrol yönteminde salınımlar deney sonuna kadar devam

etmiştir. Deney sırasında bilgisayarla yürütülen ayarlanabilen değişkenin (Q) ilerlemesi Sekil 3(b) ve 4(b)'den gözlenir.



**Şekil 3. a)** Deneysel olarak sıcaklığın zamanla değişimi **b)** GDK-GPC ve STPID için ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi ( $I_0= 0,0126 \text{ mol L}^{-1}$ )  
Fig. 3. **a)** Temperature response, **b)** manipulated variable changes with time



**Şekil 4 a)** Deneysel olarak sıcaklığın zamanla değişimi **b)** GDK-GPC ve STPID için ayarlanabilen değişkenin zamanla değişimi ( $I_0= 0,0038 \text{ mol L}^{-1}$ ).  
(Fig. 4. **a)** Temperature response, **b)** manipulated variable changes with time under GDR with GPC and STPID respectively ( $I_0= 0,0038 \text{ mole L}^{-1}$ ))

**Tablo 1.** Optimum çalışma koşulları (Optimal operating conditions used in experimental studies).

Deney no	$T_R(^{\circ}C)$	$I_0(\text{mol L}^{-1})$	$M_0(\text{mol L}^{-1})$	$t_f(\text{s})$	$X_d(\%)$	$L_{nd}(\text{gmol}^{-1})$	$T_{ci}(^{\circ}C)$
1	103,8	0,0126	6,092	9036	50	500	21
2	105,5	0,0038	6,092	7440	30	1000	21

Deney sonunda ölçülen monomer dönüşümü, ortalama zincir uzunluğu ve viskozite ortalama molekül ağırlık değerleri, istenen değerler ile karşılaştırılmalı olarak Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’den GDK-GPC için bulunan bu değerlerin, STPID için elde edilen değerlere göre, optimum değerlere daha yakın olduğu gözlenmiştir. GDK-GPC kontrol edicinin performansını, daha önce aynı şartlarda aynı polimerizasyon reaktöründe yapılan, FC (fuzzy control) [9], DMC (dynamic matrix control) [24], IMC (internal model control) [33] gibi çalışmalarla karşılaştırıldığında GDR-GPC’nin daha iyi performans gösterdiği Tablo 3’te belirtilmiştir. Tablo 4’te ISE, IAE ve ITAE kriterleri STPID kriterleri ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Bu tablodan da

GDR-GPC’nin performansının en iyi olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada kullanılan kriter performansı aşağıda verilir:

$$ISE = \sum_{t=0}^{t_f} (y(t) - y_{sp}(t))^2 \quad (35)$$

$$IAE = \sum_{t=0}^{t_f} |y(t) - y_{sp}(t)| \quad (36)$$

$$ITAE = \sum_{t=0}^{t_f} t |y(t) - y_{sp}(t)| \quad (37)$$

**Tablo 2.** İstenen değerler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması (Comparison of experimental results with target values)

<b>T (° C)</b>	<b>103,8</b>	<b>105,5</b>
$I_0(\text{mol L}^{-1})$	0,0126	0,0038
<b>İstenen dönüşüm, <math>X_d(\%)</math></b>	<b>50</b>	<b>30</b>
Deneysel dönüşüm, m(%), (GDK-GPC)	51,2	31,8
Deneysel dönüşüm, m(%), (STPID)	51,5	35,7
<b>İstenen zincir uzunluğu, <math>L_{nd}</math></b>	<b>500</b>	<b>1000</b>
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (GDK-GPC)	485	960
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (STPID)	478	913
<b>İstenen ortalama viskozite molekül ağırlığı</b>	<b>52000</b>	<b>104000</b>
Deneysel ortalama viskozite molekül ağırlığı, (GDR-GPC)	49815	96787
Deneysel ortalama viskozite molekül ağırlığı, (STPID)	49712	94952

**Tablo 3.** Önceden yayınlanmış eserler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of experimental results with previously published works)

<b>T (° C)</b>	<b>103,8</b>	<b>105,5</b>
$I_0(\text{mol L}^{-1})$	0,0126	0,0038
<b>İstenen dönüşüm, <math>X_d(\%)</math></b>	<b>50</b>	<b>30</b>
Deneysel dönüşüm, m(%), (GDK-GPC, bu çalışmada)	51,2	31,8
Deneysel dönüşüm, m(%), (STPID, bu çalışmada)	51,5	35,7
Deneysel dönüşüm, m(%), (DMC [24])	52	40
Deneysel dönüşüm, m(%), (IMC [24])	52,5	42
Deneysel dönüşüm, m(%), (FC [9])	59,8	35,5
<b>İstenen zincir uzunluğu, <math>L_{nd}</math></b>	<b>500</b>	<b>1000</b>
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (GDK-GPC, bu çalışmada)	485	960
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (STPID, bu çalışmada)	478	913
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (DMC [24])	488	920
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (IMC [24])	480	935
Deneysel zincir uzunluğu, $L_n$ , (FC [9])	527	993

İstenen %50 dönüşüm için farklı optimum şartlarda çeşitli kontrol metodlarının polimerizasyon reaktörüne uygulamaları Tablo 5'te verilmiştir. Bu tablodan farklı metodların performansı, değişen ve sabit set noktalarının her ikisi için de gösterilmiştir. Sabit set noktası için kullanılan GDK-GPC metodundan elde edilen monomer dönüşümünün diğerlerinden daha iyi olduğu görülür. Bunun nedeni, sürekli değişen şartların jel etkisini ve güçlü eğriselliği artırdığı için set noktası etrafındaki sıcaklıkta salınımlar artar [24]. Böylece yüksek zincir uzunluğu ve molekül ağırlığını elde edebilmek için, sabit set noktasında uygulanan metod daha iyi sonuç verir (Tablo 2).

**Tablo 4.** Hata kriterlerinin karşılaştırılması (T=105,5 °C) (Comparison of the performance of the control strategies)

Kontrol Yöntemleri	ISE	IAE	ITAE
GDK-GPC	11624,85	347,978	1144747
STPID	12197,84	535,079	1723149

**Tablo 5.** Farklı kontrol metod performanslarının karşılaştırılması (Comparison of the performance of different control methods)

Kontrol metodları	X <sub>d</sub> (%)
<b>İstenen dönüşüm, X<sub>d</sub> (%)</b>	<b>50</b>
GDR-GPC (103,8 °C sabit sıcaklıkta, bu çalışmada )	51,2
STPID (103,8 °C sabit sıcaklıkta, bu çalışmada)	51,5
FC (103,8 °C sabit sıcaklıkta, [9])	59,8
GDR-GPC (92,7 °C başlangıç sıcaklığında, [19])	55
FC ( 92,7 °C başlangıç sıcaklığında, [10])	65,35

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada GPC'li GDK' nin kontrol stratejisi, önceden hesaplanan optimum şartlarda, kesikli bir polimerizasyon reaktöründe deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. GDK-GPC kontrol edicinin performansı STPID ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar GDK-GPC kontrol edicinin performansının STPID'den daha iyi olduğunu göstermiştir. Ek olarak, sabit izde elde edilen polimerin istenen değerlerinin, diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, değişken sıcaklık ile yapılan deney sonuçlarından daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bütün bu sonuçlardan GDR-GPC'nin daha karmaşık ve doğrusal olmayan sistemler için kullanılabilceği kanısına varılmıştır.

#### Semboller (Symbol)

a<sub>i</sub> : A polinomunun parametreleri  
a<sub>i</sub> : Tabaka 1'deki ağlardan elde edilen çıktı

b<sub>j</sub> : Tabaka 1'deki ağlardan elde edilen çıktı  
B(z<sup>-1</sup>) : Kesikli zaman sıfırlarını gösteren z-alan polinomu  
b<sub>i</sub> : A polinomunun parametreleri  
C(z<sup>-1</sup>) :Z-alanındaki proses gurultusunun sıfırlarını gösteren polinom  
c<sub>k</sub> : Tabaka 3'teki ağlardan elde edilen çıktı  
d<sub>k</sub> : Tabaka 3'ten elde edilen istenen çıktı  
e(t) : Beyaz gurultu  
L<sub>n</sub>, L<sub>nd</sub> : Ortalama zincir uzunluğu, istenen ortalama zincir uzunluğu  
Q : Kontrol girişinde etkili olan polinom  
Q<sub>w</sub> : Isı gücü (W)  
r(t) : t- zamanında set noktası  
R(z<sup>-1</sup>) : Set noktası üzerine etkili olan ağırlık polinomu  
T<sub>ij</sub> : i<sup>th</sup> tabakada j<sup>th</sup> ağ için çapraz fonksiyon  
T<sub>R</sub> : Reaktör içi sıcaklığı, °C  
t, t<sub>f</sub> : Zaman, polimerizasyon zamanı, s  
u(t) : t zamanında girdi değişkeni  
v<sub>ij</sub> : Tabaka 1-2 bağlantı ağırlıkları  
w<sub>jk</sub> : Tabaka 2-3 bağlantı ağırlıkları  
X, X<sub>d</sub> : Model çıktısının monomer dönüşümü, istenen monomer dönüşümü  
y(t) : t zamanında çıktı değişkeni  
y(t-1) : t-1 zamanında çıktı değişkeni.

#### Yunan Harfleri (Greek characters)

β : Öğrenme oranı  
∂E/∂v<sub>ij</sub>, ∂E/∂W<sub>ij</sub> : j<sup>th</sup> tabakada i<sup>th</sup> ağda gradyant soyu

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Barner-Kowollik, C., & Davis, T.P., "Using Kinetics and Thermodynamics in the controlled synthesis of low molecular weight polymers in free-radical polymerization", **Macromol. Theory Simul.**, 10, 255, 2001.
2. Scali, C., Morretta, M., & Semino, D., "Control of the quality of polymer products in continuous reactors: comparison of performance of state estimators with and without updating of parameters", **J. Proc. Cont.**, 7, 357, 1997.
3. Erdoğan, S., Alpbaz, M., & Karagöz, A.R., "The effect of operational conditions on the performance of batch polymerization reactor control", **Chem. Eng. J.**, 86, 259, 2002.



4. Yang, J., Li, X., Mou, H.-G., & Jian, L., "Control-Oriented Thermal Management of Solid Oxide Fuel Cells Based on a Modified Takagi-Sugeno Fuzzy Model", **Journal of Power Sources**, 188, 475-482, 2009.
6. Richards, J.R. & Congalidis, J.P., "Measurement and control polymerization reactors", **Comput. Chem. Eng.**, 30, 1447, 2006.
7. Seki, H., Ogawa, M., Ooyama, S., Akamatsu, K., Ohshima, M., & Yang, W., "Industrial application of a nonlinear model predictive control to polymerization reactors", **Cont. Eng. Pract.**, 9, 819, 2001.
8. Xaumier, F., Lann, M-V.L., Cabassud, M., & Casamatta, G., "Experimental application of nonlinear model predictive control: temperature control of an industrial semi-batch pilot-plant reactor", **J. Proc. Cont.**, 12, 687, 2002.
9. Altınten, A., Erdoğan, E., Hapoğlu, H., Aliev, F., & Albaz, M., "Application of fuzzy control metod with genetic algorithm to a polymerization reactor at constant set point", **Chem. Eng. Res. Des. (ICHEME)**, 84(A11), 1012, 2006.
10. Altınten, A., Erdoğan, E., Hapoğlu, H., & Albaz, M., "Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm", **Comp. Chem. Eng.**, 27, 1031, 2003.
11. Erdoğan, S., Özkan, G., & Albaz, M., "Self-Tuning control of batch polymerization reactor", **J. Chem. Eng. Japan**, 31, 499, 1998.
12. Lewis, G.T., Nguyen, V., & Cohen, Y., "Synthesis of poly(4-vinylpyridine) by reverse atom transfer radical polymerization", **J. Polym. Sci.**, 45 (Part A), 5748, 2007.
13. Altınten, A., Ketevanlioğlu, F., Erdoğan, S., Hapoğlu, H., & Albaz, M., "Self-tuning PID control of jacketed batch polystyrene reactor using genetic algorithm", **Chem. Eng. J.**, 138, 490, 2008.
14. Zhang, J., Morris, A.J., Martin, E.B., & Kiparissides, C., "Prediction of polymer quality in batch polymerization reactors using robust neural network", **Chemical Eng. J.**, 69, 135, 1998.
15. Yang, S.H., Chung, P.W.H., & Brooks, B.W., "Multi-stage modelling of a semi-batch polymerization reactor using artificial neural networks", **Trans ICHEME**, 77 (Part A), 779, 1999.
16. Zeybek, Z., "Role of adaptive heuristic criticism in cascade temperature control of an industrial tubular furnace", **Applied Thermal Engineering**, 26, 152, 2006.
17. Özkan, G., Hapoğlu, H., & Albaz, M., "Generalized predictive control of optimal temperature profiles in a polystyrene polymerization reactor", **Chemical Engineering and Processing**, 37, 125, 1998.
18. Yüce (Çetinkaya), S., **Nonlinear Model Predictive Control of Reactor Temperature in**
5. Leite, M. S., Santos, B. F., Lona, L. M. F., Silva, F. V., & Fileti, A. M. F., "Application of Artificial Intelligence Techniques for Temperature Prediction in a Polymerization Process", **Chemical Engineering Transactions**, 24, 385-390, 2011.
- Agitated Batch Polymerization Reactor Operating Optimal Condition**, Ph.D Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Ankara, Turkey, 2001.
19. Zeybek, Z., Çetinkaya, S., Hapoğlu, H., & Albaz, M., "Generalized delta rule (GDR) algorithm with generalized predictive control (GPC) for optimum temperature tracking of batch polymerization", **Chem. Eng. Sci.**, 61, 6691, 2006.
20. Hsu, K-Y., & Chen, S-A., "Optimal piecewise constant temperature policies for batchwise thermally initiated bulk polymerization of styrene", **Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers**, 17(5), 315, 1986.
21. Zaheer-uddin, M., & Tudoroiu, N., "Neuro-PID tracking control of a discharge air temperature system", **Energy Conversion and Management**, 45, 2405, 2004.
22. Ekpo, E.E., & Mujtaba, I.M., "Evaluation of neural networks-based controllers in batch polymerization of methyl methacrylate", **Neurocomputing**, 71, 1401, 2008.
23. Valigi, P., Fravolini, M.L., & Ficola, A., "Improved temperature control of a batch reactor with actuation constraints", **Cont. Eng. Pract.**, 14, 783, 2006.
24. Yüce, S., Hasaltun, A., Erdoğan, S., & Albaz, M., "Temperature control of a batch polymerization reactor", **Trans ICHEME**, 77 Part A, 413, 1999.
25. Chen, S.A., & Jeng, W.F., "Minimum end time policies for batch-wise radical polymerization", **Chem Eng Sci.**, 33, 735, 1978.
26. Karagöz, A.R., Özkan, G., Erdoğan, S., & Albaz, M., "Modeling optimization and control of batch polymerization reactors", **Control and Computers**, 25(1), 21, 1997.
27. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., & Williams, R.J., "Learning representations by backpropagation errors", **Nature**, 323, 533, 1986.
28. Werbos, P., **Beyond Regression: New tools for predicting and analysis in the behavioral sciences**, Ph.D Thesis, Cambridge, MA: Harvard University Committee on Applied Mathematics, 1974.
29. Parker, D., "Learning-logic", invention report S81-64, file 1, Office of Technology Licensing, Stanford University, Stanford, CA, 1982.
30. LeCun, Y., "Learning process in an asymmetric threshold network in disordered systems and biological organization", **Les Houches**, France, 223, 1986.

31. Widrow, B. & Hoff, M., "Adaptive switching circuits, In Western Electronic Show and Convention", **Institute of Radio Engineers (IEEE)**, 4, 96, 1960.
32. Lu, Y-Z., **Industrial intelligent control, fundamentals and applications**, 1. Edition, 1996.
33. etinkaya, S., **Dynamic matrix control of a batch polymerization reactor under the optimal conditions**, M.Sc. Thesis, Department of Chemical Engineering, Ankara University, Turkey, 1996.