

# YARI-KESİKLİ STİREN POLİMERİZASYON REAKTÖRÜNÜN GENETİK ALGORİTMA İLE BULANIK KONTROLU

Ayla ALTINTEN<sup>a</sup>, Seçkin ALTINDAL<sup>a</sup>, Sebahat ERDOĞAN<sup>a</sup>, Hale HAPOĞLU<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara

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

[altinten@gazi.edu.tr](mailto:altinten@gazi.edu.tr), [seckin\\_altindal@hotmail.com](mailto:seckin_altindal@hotmail.com), [sebaer@gazi.edu.tr](mailto:sebaer@gazi.edu.tr), [hapoglu@eng.ankara.edu.tr](mailto:hapoglu@eng.ankara.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.11.2010; Kabul/Accepted: 21.03.2011)

## ÖZET

Polimerleşmede esas amaç, istenilen kalitede ürün eldesi olup, polimerleşme proseslerinde kontrol ve tasarım büyük önem taşımaktadır. Çalışmada stirenin yarı-kesikli, ceketli bir reaktörde serbest radikalik çözelti polimerizasyonu incelenmiştir. Ayarlanabilen değişken olarak dalgıç ısıtıcıdan verilen ısı seçilmiştir. Kontrol yöntemi olarak seçilen bulanık kontrol için en iyi kontrolü sağlayacak üyelik fonksiyon kümeleri ve ilişki matrisi genetik algoritma (GA) ile belirlenmiştir. GA için uygunluk fonksiyonu olarak hataların mutlak değerleri toplamı (IAE) seçilmiştir. Belirlenen bulanık kontrol parametreleri yardımıyla deneysel çalışmalara geçilmiştir. Deneysel çalışmalarda stiren ve toluen karışımı reaktöre beslenmiş, başlatıcı olarak benzoil peroksit kullanılmış ve ekzotermik reaksiyon nedeniyle artan reaktör içi sıcaklığı bulanık kontrol yöntemiyle istenilen set noktasında tutulmaya çalışılmıştır. Deney süresince belli zaman aralıklarında alınan numunelerden yüzde monomer dönüşümü ve viskozite ortalama molekül ağırlığı değerleri belirlenmiştir. Parametreleri GA kullanılarak bulunan bulanık kontrol yönteminin yarı-kesikli polimer reaktör sıcaklığını başarıyla kontrol ettiği sonucuna varılmıştır. Deneysel monomer dönüşüm değerlerinin teorik monomer dönüşüm değerlerinden yüksek çıktığı ve deneysel viskozite ortalama molekül ağırlığı değerlerinin teorik olarak hesaplanan sayıca ortalama molekül ağırlığı değerleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Genetik Algoritma, Bulanık Kontrol, Yarı-Kesikli Polimer Reaktörü.

## FUZZY CONTROL OF SEMI-BATCH POLYMERIZATION REACTOR WITH GENETIC ALGORITHM

### ABSTRACT

In the polymerization, main aim is the achievement of desired quality product. For this reason, control and design is very important at polymerization processes. In this study, polymerization of styrene in a jacketed semi-batch reactor was examined. Manipulated variable was the heat  $Q$  which was given from electrical heater. Fuzzy control was chosen as the control method in this study. Membership functions and relation matrix which provide the best fuzzy control were obtained with GA. The fitness function for GA was chosen as the integral of the absolute value of error, IAE. In experimental studies, styrene and toluene mixture was fed continuously to the reactor. As the initiator, benzoyl peroxide was used. Fuzzy control method was used to keep the desired temperature set point. Because reactor temperature is increasing as a result of exothermic reaction. During the experiments, the concentration and molecular weight of polymer were measured analytically by taking samples. It is concluded that GA with fuzzy control is a good way to control the temperature of semi-batch styrene polymerization reactor. It was seen that experimental monomer conversion values are higher than the theoretical values, and viscosity average molecular weights which were obtained experimentally are acceptable when compared with numerical average molecular weights.

**Key Words:** Genetic Algorithm, Fuzzy Control, Semi-batch Polymerization Reactors.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerizasyon reaksiyonları ekzotermik reaksiyonlar olduğu için ortaya çıkan ısı polimerin kalite kontrolünde en önemli işletme değişkenidir. Polimerleşme sırasında dönüşümle viskozitenin artması karıştırma işlemini zorlaştırmakta ve tüm ısı aktarım katsayısını düşürmektedir. Polimerlerin ısı iletim katsayılarının da düşük olması nedeniyle, dönüşüm arttıkça ısı aktarımı zorlaşmakta ve reaktörün sıcaklık kontrolü yapılamaz duruma gelmektedir. Bu nedenle polimerizasyon ürününün belirlenen optimum şartlarda eldesi için ileri kontrol yöntemlerine başvurulur. Literatürde bu konuyla ilgili çalışmalar sınırlıdır. Özkan ve ark. (2001), ceketli kesikli bir serbest radikal çözelti polimerizasyonunda istenen monomer dönüşümü ve molekül ağırlığına ulaşmak için doğrusal olmayan kontrolün performansını incelemişlerdir. Isı girişi ve reaktör sıcaklığı arasındaki ilişkiyi veren NARMAX model, sistem dinamiğini ifade edecek şekilde seçilmiş ve bu modeli kontrol sistemini parametrik bir model olarak tanımlamak için kullanmışlardır [1]. Pal ve ark. (2003), optimize bulanık mantık kontrol ediciler (OFLC) yerine arama uzayını azaltacak teorik olarak daha iyi özelliklere sahip basitleştirilmiş OFLC (ISOFLC) önermiş ve iki durumdaki hesaplama performansı karşılaştırılmıştır [2]. Altınten ve ark. (2004), ceketli kesikli bir polistiren reaktöründe parametreleri GA ile belirlenen adaptif PID denetici ile sıcaklık kontrolünü incelemişlerdir [3]. Antures ve ark. (2005), metil metakrilatın kesikli polimerizasyon reaktöründe sıcaklık kontrolü için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bulanık kontrolün performansı geleneksel PID kontrol ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak çalışılan polimerizasyon prosesi için PID-bulanık kontrolün PID kontrole göre daha uygun ve güvenilir performans gösterdiği görülmüştür [4]. Altınten ve ark. (2006), stirenin ceketli kesikli polimerizasyon reaktöründe, parametreleri GA kullanılarak bulunan bulanık denetici ile sıcaklığın istenen sabit set sıcaklığında kontrolünü incelemişlerdir. GA için uygunluk fonksiyonu IAE olarak seçilmiştir [5]. Altınten ve ark. (2008) sonraki çalışmalarında, ceketli kesikli bir polistiren reaktöründe GA kullanarak kendinden ayarlamalı PID kontrol yöntemi ile sıcaklık kontrolünü incelemişlerdir. Kendinden ayarlamalı PID kontrolün ayar parametreleri genetik algoritma kullanılarak bulunmuştur. Sonuç olarak stirenin ceketli kesikli polimerizasyon reaktörünün, GA kullanılarak kendinden ayarlamalı PID kontrol ile başarılı şekilde kontrol edilebildiği gözlenmiştir [6]. Yapılan çalışmada ise, stirenin yarı-kesikli, ceketli bir reaktörde polimerizasyonu, istenilen kalitede (dönüşüm ve molekül ağırlığı) polistirenin elde edilmesi hedeflenerek incelenmiştir. Yapılan çalışma kapsamında, optimizasyon metodu olan genetik algoritmalar (GA) ve GA için uygunluk fonksiyonu

olarak hataların mutlak değerleri toplamı, IAE seçilmiştir. Böylece kontrol yöntemi olarak seçilen bulanık kontrol için en iyi kontrolü sağlayacak üyelik fonksiyon kümeleri ve ilişki matrisi GA kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen bulanık kontrol parametreleri yardımıyla yapılan deneysel çalışmalarda reaktör içi sıcaklık istenilen set noktasında bulanık kontrol yöntemiyle tutulmaya çalışılmıştır. Deney süresince belli zaman aralıklarında alınan numunelerden yüzde monomer dönüşümü ve viskozite ortalama molekül ağırlığı değerleri belirlenmiştir.

## 2. YARI-KESİKLİ POLİMERİZASYON REAKTÖRÜNÜN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE SEMI-BATCH POLYMERIZATION REACTOR)

Optimizasyon ve kontrol çalışmalarında kullanılan yarı-kesikli soğutma ceketli polimer reaktörünün matematiksel modeli, monomer ve başlatıcı madde denklemleri, reaktör ve ceket enerji denklemlerini ve ölü polimer zincirinin sıfıncı ve ikinci model denklemlerini içermektedir. Başlatıcı ve monomer kütle denklemleri için; reaktörde tam karıştırma olup tüm bölgelerde sıcaklık ve konsantrasyon aynı olduğu, yoğunluğun artmasından dolayı hacim azalmasının ihmal edildiği, uzun zincir yaklaşımının geçerli olduğu ve jel etkisinin olmadığı varsayımları yapılmıştır.

$$\frac{dV}{dt} = Q_f \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{V}Q_f - k_d I \quad (2)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Q_{fm}}{V} M_0 - \frac{Q_f}{V} M - k_p \sqrt{\frac{2fk_d}{k_t}} I^{1/2} M \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_f}{V} (T_{besleme} - T_R) + \frac{Q}{V\rho C_p} + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} \quad (4)$$

$$\left\{ k_p \sqrt{\frac{2fk_d}{k_t}} I^{1/2} M \right\} - \frac{UA}{V\rho C_p} (T_R - \bar{T}_c)$$

$$\frac{dT_{co}}{dt} = \frac{\dot{m}_c}{V_c \rho_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{V_c \rho_c C_{pc}} (T_R - \bar{T}_c) \quad (5)$$

$$\frac{d\lambda_0}{dt} = 0,5k_d I - \frac{Q_f \lambda_0}{V} \quad (6)$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{3k_p^2 M^2}{k_t} + 5k_p M \left( \frac{Ik_d}{k_t} \right)^{0,5} \quad (7)$$

$$+ 2Ik_d - \frac{\lambda_2 Q_f}{V}$$

Ayrıca  $U$ : tüm ısı aktarım katsayısı viskoziteye bağlı olarak alınmıştır [7].

$$U = \frac{1}{\mu_r^{0,33} S + F} \quad (8)$$

Burada  $S$  ve  $F$  reaktör boyutuna ve fiziksel özelliklere bağlı bir sabit,  $\mu_r$  ise bağlı viskozitedir.

### 3. GENETİK ALGORİTMA (GENETIC ALGORITHM)

Genetik algoritmalar doğadaki doğal seçim ve doğal genetik mekanizmasını temel alan stokastik bir arama yöntemidir [8]. Genetik algoritmalar doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak sürekli iyileşen çözümler üretir. Bunun için "iyi" nin ne olduğunu belirleyen bir uygunluk (fitness) fonksiyonu ve yeni çözümler üretmek için yeniden kopyalama (recombination), çaprazlama (crossover), mutasyon (mutation) gibi operatörler kullanılır. Genetik algoritmaların bir diğer önemli özelliği de arama uzayının geniş olmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözüm içinden iyi (uygunluk değeri yüksek) bireyler seçilip kötü (uygunluk değeri düşük) bireyler elenebilir [9,10].

### 4. BULANIK MODELE DAYALI KONTROL (FUZZY MODEL BASED CONTROL)

Bulanık mantık ve bulanık küme işlemleri kullanılarak makinelerin insanlar gibi kararlar vermesi sağlanabilmektedir. Bulanık mantığın bu uyumluluğunun yapay sinir ağları veya genetik algoritmalarla desteklenmesi sonucu bulanık mantık sistemler veya genetik-bulanık sistemler ortaya çıkmıştır [11].

Bir-girdili, bir-çıkıtlı, 1.mertebeden bir sistem için bulanık model genel formu şu şekilde verilebilir [12].

$$Y_k = Y_{k-1} \circ U_{k-d} \circ R \quad (9)$$

Burada  $Y$  ve  $U$  model için çıkış ve giriş değişkenlerinin olasılık vektörleri,  $R$  model ilişki matrisidir. İndis olan  $k$  şimdiki zamanı,  $k-1$  geçmişteki bir örnekleme zamanını ve  $k-d$  geçmişteki  $d$  ölü zamanlı örnekleme periyodunu ifade etmektedir.

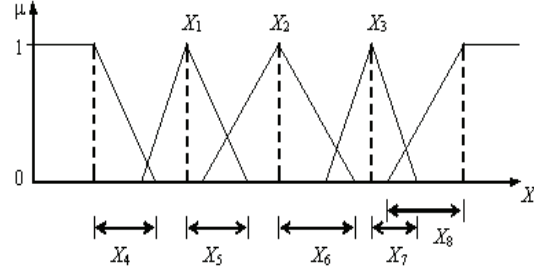
Model ilişki matrisi şu şekildedir;

$$R' = U_{k-d} \times Y_{k-1} \times Y_k \quad (10)$$

### 5. GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK BULANIK MODELE DAYALI KONTROL TASARIMI (DESIGN OF FUZZY MODEL BASED CONTROLLER USING GENETIC ALGORITHM)

Bulanık model yapısının oluşturulmasında ya da bulanık model parametrelerinin tanımlanmasında ya da bunların paralel olarak belirlenmesinde genetik

algoritma yaklaşımı kullanılabilir. Yapılan çalışmada GA kullanılarak bulanık kontrol uygulamasında girdi ve çıktı için beşli üçgensel-tip üyelik fonksiyonu seçilmiş (Şekil 1), arama etkinliğini düşürmemek için üçgensel üyelik fonksiyonlarının simetrik olduğu kabul edilmiş ve uygunluk fonksiyonu IAE olarak seçilmiştir.



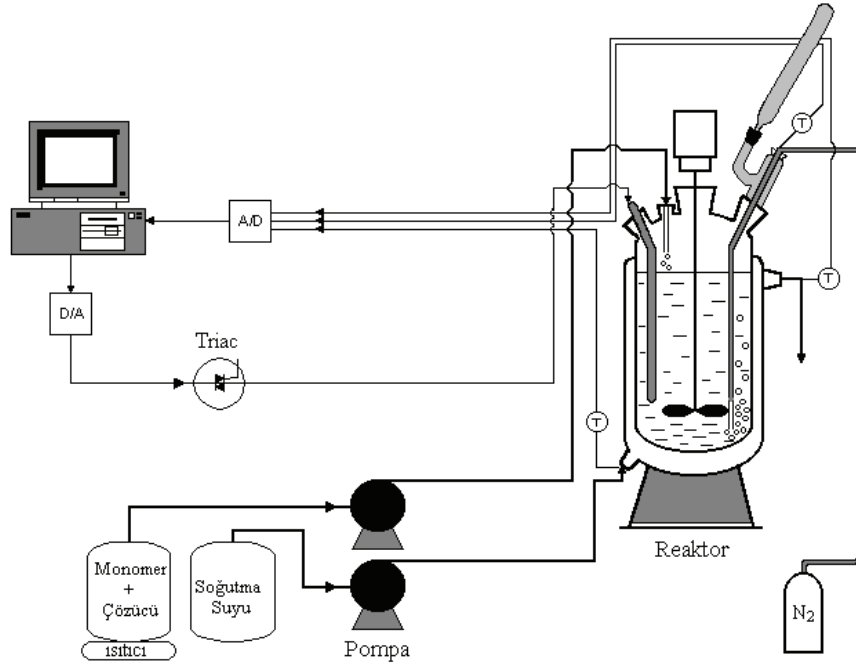
**Şekil 1.** Sekiz parametrenin bulunacağı beşli üyelik fonksiyon kümesi (A set of five membership functions, in which there are eight parameters to be determined)

Bulanık kontrol parametrelerinin genetik ayarı için önerilen metod aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır [5, 13].

- Adım 1:* Girdi ve çıktı için üyelik fonksiyonu şeklinin ve sayısının belirlenmesi
- Adım 2:* Uygunluk fonksiyonunun tanımlanması
- Adım 3:* Yığın genişliği, çaprazlama oranı ve mutasyon oranının bulunması
- Adım 4:* İkili dizilerin bir başlangıç neslinin rastgele oluşturulması
- Adım 5:* Nesildeki her bir üye için,  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  değerlerine karşılık gelen ikili dizinin çözülmesi
- Adım 6:* Adım 5'deki üyelik fonksiyon kümesi için uygunluk değerlendirilmesi
- Adım 7:* Seçim yöntemi kullanılarak yeni neslin üretilmesi
- Adım 8:* Adım 3'deki çaprazlama oranına göre yeni nesildeki üye çiftlerinin çaprazlanması
- Adım 9:* Adım 3'deki mutasyon oranına göre yeni nesildeki üyelerin mutasyonu
- Adım 10:* Önceden belirlenen nesil sayısına ulaşıncaya kadar Adım 5-9'daki işlemlerin tekrarı.

### 6. DENEYSEL SİSTEM (EXPERIMENTAL SYSTEM)

Deneysel çalışmalarda, 1,1 litre hacminde camdan yapılmış ceketli bir reaktör kullanılmıştır. Reaktörün kapağına mekanik karıştırıcı, geri soğutucu, dalgıç ısıtıcı, azot gazı girişi, termoçift ve besleme girişi yerleştirilmiştir. Dalgıç ısıtıcı ile reaktöre verilen ısı miktarını ayarlamak ve sıcaklık kontrolünü yapmak için bilgisayar ile ısıtıcı arasına triyak modülü yerleştirilmiştir. Bilgisayarın girişi ve çıkışında A/D çeviriciler vardır ve soğutma suyu akış hızı peristaltik pompa ile ayarlanmaktadır.



Şekil 2. Deneysel sistem (Experimental system)

Deney sistemi Şekil 2’de gösterilmiştir. Polimer deneylerinde %70’i stiren %30’u toluen olmak üzere 1100ml çözelti hazırlanmış ve bu çözeltinin %60’ı reaktöre konulmuş %40’ı ise reaktöre beslemek üzere istenen set sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Reaktör içerisindeki çözelti ile besleme akımı istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra kontrol programı devreye alınmış ve başlatıcı aniden reaktöre atılırken sisteme monomer-çözücü beslemesi başlatılmıştır. Artan sıcaklık, parametreleri GA ile teorik olarak belirlenen bulanık kontrol algoritması ile engellenmiş ve reaktör içi sıcaklığının istenilen set noktasını takip etmesi sağlanmıştır. Reaksiyon süresince sıcaklıklar (reaktör içi, set, soğutma suyu çıkış sıcaklığı) ve triyak modülü aracılığı ile ısıtıcıya gönderilen değerler bilgisayardan takip edilmiş ve bir dosyaya kaydedilmiştir. Deney süresince alınan 5ml’ik numuneler ile dönüşüm ve molekül ağırlığı hesaplamaları yapılmıştır.

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

Yapılan çalışma teorik ve deneysel olmak üzere iki kısımda gerçekleştirilmiştir. Teorik çalışmada, soğutma ceketli yarı-kesikli polimer reaktörü için sistem modellenmesi yapılmış ve sistem modeli, bulanık kontrol, GA kullanılarak sistem için FORTRAN 90 programlama dilinde simülasyon programı hazırlanmıştır. Program dahilinde bulunan GA, bulanık kontrol üyelik fonksiyon kümeleri ve bunlara bağlı olarak ilişki matrisinin belirlenmesini sağladığı için kontrol performansı üzerinde oldukça etkilidir. Bu

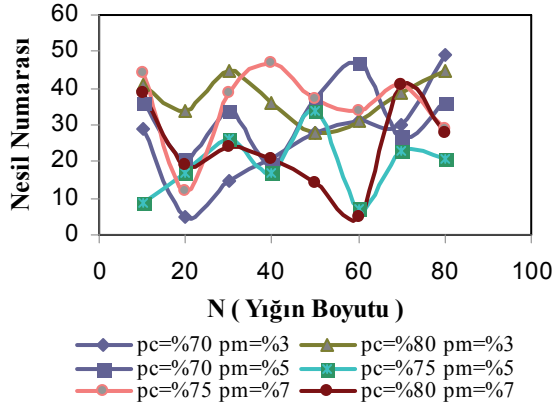
nedenle en iyi GA parametrelerinin bulunması için çalışmalar yapılmıştır.

### 7.1. GA Parametrelerinin Belirlenmesi

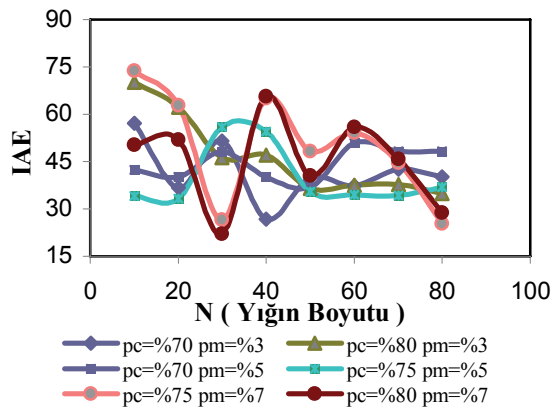
Bulanık kontrol algoritmasının parametreleri doğal seçim ve doğal genetik mekanizmasına dayanan GA ile bulunmuştur. GA için yeniden üretim operatörü olarak turnuva seçim, çaprazlama operatörü olarak uniform çaprazlama kullanılmıştır. GA için yığın boyutu (N), çaprazlama olasılığı ( $p_c$ ), mutasyon olasılığı ( $p_m$ ) bulunacak parametrelerdir. Çalışmada maksimum nesil sayısı (M), 50 olarak seçilmiştir.

**7.1.1. Yığın Boyutu (N):** Kontrol sistemi için kullanılacak en iyi yığın boyutunu bulmak için uygunluk fonksiyonu olarak farkların mutlak değerleri toplamı (IAE) seçilmiştir. Yığın boyutu değerleri farklı çaprazlama ve mutasyon olasılıklarında 10-20-30-40-50-60-70-80 alınarak program çalıştırılmıştır. Program sonunda maksimum nesil sayısına ulaşıncaya kadar elde edilen en iyi değer (kontrol sistemi için IAE’nin en az olduğu değer) ve en iyi değerlerin bulunduğu nesil numaraları bulunmuştur. Farklı yığın boyutu değerleri kullanılarak elde edilen en iyi sonucun nesil numarası Şekil 3’te, IAE (uygunluk) sonuçları ise Şekil 4’te verilmiştir.

Şekil 3 ve 4’te görüldüğü gibi nesil numarası ve IAE değerleri yığın boyutu 20 için minimuma yaklaşmıştır. Buna bağlı olarak en uygun yığın boyutu 20 olarak seçilmiştir.

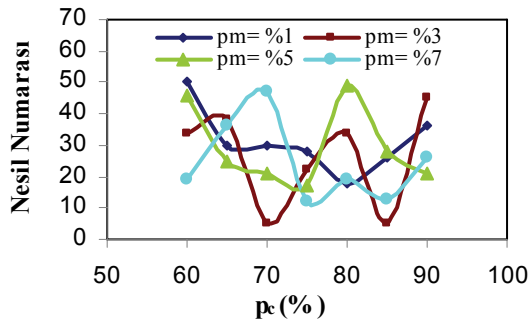


**Şekil 3.** Farklı yığın boyutu değerleri kullanılarak elde edilen en iyi nesil numarası (The best number of generation for different population size)

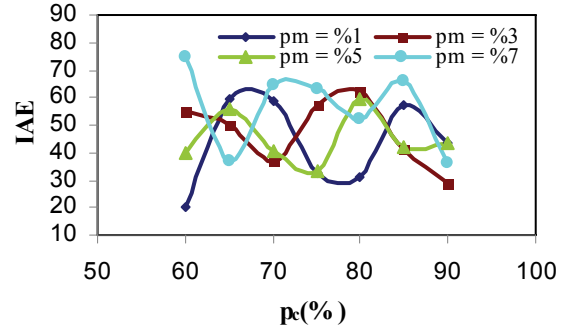


**Şekil 4.** Farklı yığın boyutu değerleri kullanılarak elde edilen IAE sonuçları (The result of IAE obtained for different population size)

**7.1.2. Çaprazlama olasılığı ( $p_c$ ):** Çaprazlama önceki nesildeki bireylerden iyi özellikler alınarak elde edilen yeni nesildeki bireylerin daha iyi olması umuduyla yapılır. Maksimum nesil sayısı 50 ve belirlendiği gibi yığın boyutu 20 seçilerek %1, %3, %5, %7 gibi farklı mutasyon olasılıklarında çaprazlama olasılığı %60, %65, %70, %75, %80, %85 ve %90 alınarak program çalıştırılmış ve Şekil 5 ve 6'daki sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 5.** Farklı çaprazlama olasılığı değerleri kullanılarak elde edilen en iyi nesil numarası (The best number of generation for different crossover probability)

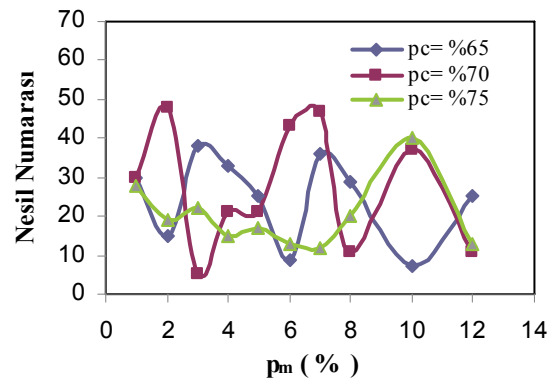


**Şekil 6.** Farklı çaprazlama olasılığı değerleri kullanılarak elde edilen IAE sonuçları (The result of IAE obtained for different crossover probability)

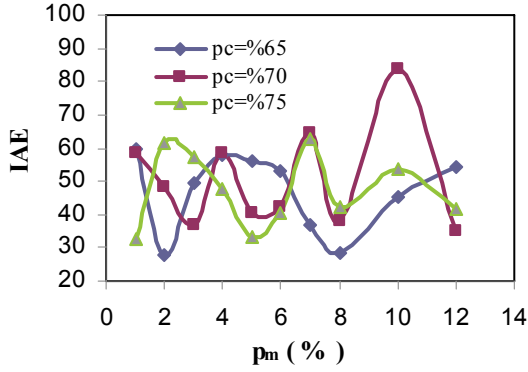
Şekil 5' te %75 çaprazlama olasılığını için çalışılan dört farklı mutasyon değeri benzer davranış göstermiş ve birbirlerine yaklaşmıştır. Şekil 5 ve 6 birlikte incelendiğinde minimum nesil numarasına ulaşmak için %75 çaprazlama olasılığı uygun bulunmuştur.

**7.1.3. Mutasyon Olasılığı ( $p_m$ ):** Mutasyon olasılığı, kromozom parçalarının ne kadar sıklıkla mutasyon geçireceğini belirtir. Maksimum nesil sayısı 50 ve belirlendiği gibi yığın boyutu 20 seçilerek %65, %70 ve %75 çaprazlama olasılığı değerlerinde mutasyon olasılığı %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8, %10 ve %12 alınarak program çalıştırılmış ve Şekil 7 ve 8'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde, seçilen çaprazlama olasılığı değerlerinin minimum nesil sayısına ulaşması için %5 mutasyon olasılığı değerinde benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Yüksek mutasyon olasılığı iyi bireylerin özelliklerini kaybetmesine neden olacağından küçük mutasyon olasılığı değeri kullanılır. Şekil 7 ve 8 birlikte incelendiğinde %5 mutasyon olasılığı değeri, minimum nesil numarası ve IAE değerine ulaşmak için uygun bulunmuştur.



**Şekil 7.** Farklı mutasyon olasılığı değerleri kullanılarak elde edilen en iyi nesil numarası (The best number of generation for different mutation probability)



**Şekil 8.** Farklı mutasyon olasılığı değerleri kullanılarak elde edilen IAE sonuçları (The result of IAE obtained for different mutation probability)

Sonuç olarak, bu çalışma sonunda genetik algoritma için en uygun yığın boyutu 20, çaprazlama olasılığı %75 ve mutasyon olasılığı %5 olarak seçilmiş ve bu değerlerle çalıştırılan genetik algoritma ile bulanık kontrol parametreleri bulunmuştur.

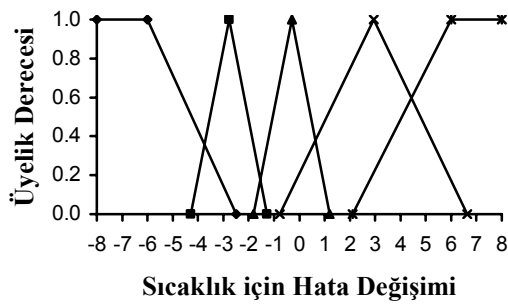
## 7.2. Bulanık Kontrol Parametreleri ve Deneysel Sonuçlar

İstenen monomer dönüşümü ve sayıca ortalama molekül ağırlığına minimum zamanda ulaşmak amacıyla optimum işletim koşulları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada seçilen üç farklı işletim koşulunda deneyler gerçekleştirilmiştir ve 65000 g/mol sayıca ortalama molekül ağırlığı ile % 40-45-52 dönüşüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Seçilen işletim koşulları Tablo 1' de verilmiştir.

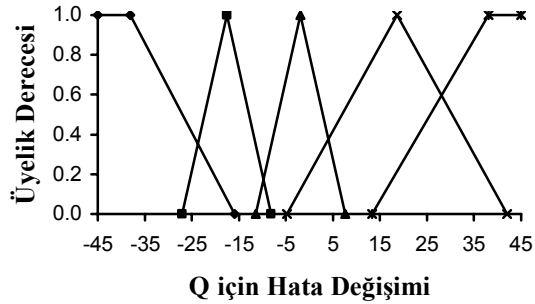
GA için bulunan kontrol parametreleri: yığın boyutu ( $N=20$ ), çaprazlama olasılığı ( $p_c= \%75$ ), mutasyon olasılığı ( $p_m= \%5$ ) ve maksimum nesil sayısı ( $M=50$ ) değerleri teorik programa girilerek GA ile en iyi kontrolü sağlayan bulanık kontrol üyelik fonksiyon kümeleri ve bunlara bağlı ilişki matrisi oluşturulmuştur. Tablo 1' de verilen üç işletim koşulu için elde edilen bulanık üyelik fonksiyon kümeleri sırasıyla Şekil 9-11' de gösterilmiştir. Deneysel olarak bulanık kontrol, GA ile teorik olarak bulunan bulanık üyelik fonksiyon kümeleri ve ilişki matrisi VisiDAQ programına yazılarak gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** İşletim koşulları (The operating conditions)

Deney no	$M_0$ (mol/l)	$I_0$ (mol/l)	$\bar{M}_{nd}$ (g/mol)	$X_d$ (%)	$T_R$ ( $^{\circ}C$ )	$t_f$ (s)
1	6,092	0,0073	65000	40	102	6800
2	6,092	0,008	65000	45	10000	
3	6,092	0,008	65000	52	104	9400

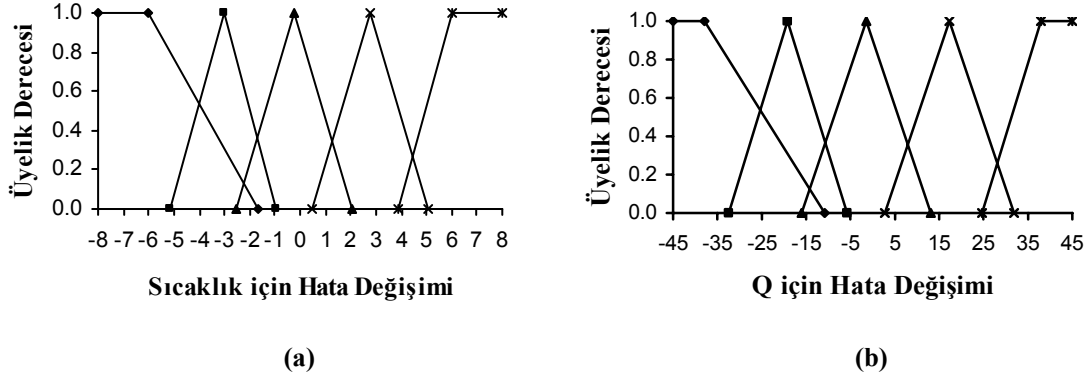


(a)

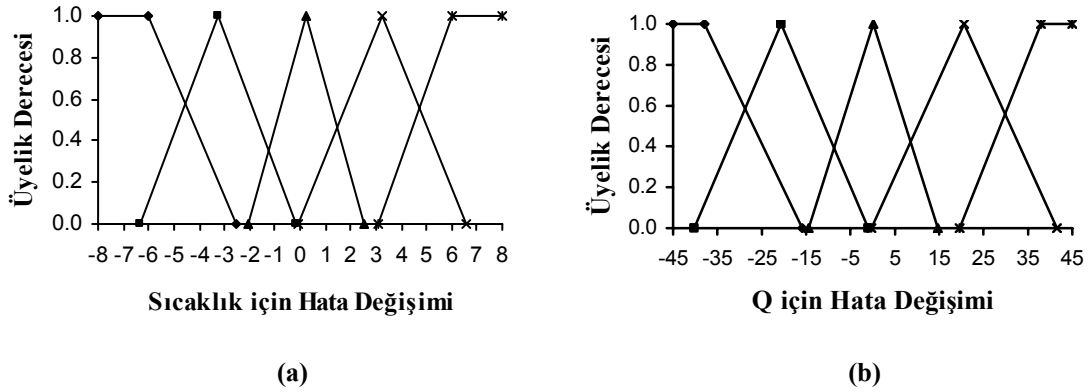


(b)

**Şekil 9.** Birinci işletim koşulunda (a) T için hata değişimi ve (b) Q için hata değişimi bulanık üyelik fonksiyonları (The fuzzy membership functions for (a) change in error for T and (b) change in error for Q in the first operating condition)



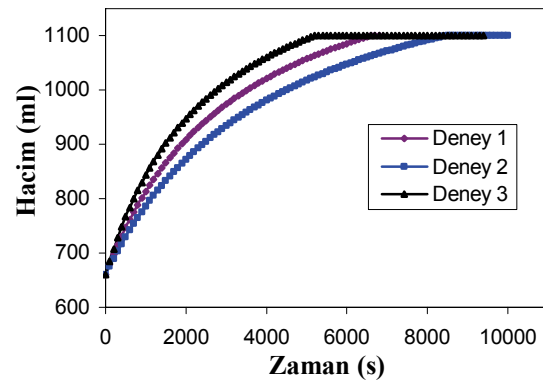
**Şekil 10.** İkinci işletim koşulunda (a) T için hata değişimi ve (b) Q için hata değişimi bulanık üyelik fonksiyonları (The fuzzy membership functions for (a) change in error for T and (b) change in error for Q in the second operating condition)



**Şekil 11.** Üçüncü işletim koşulu için (a) T için hata değişimi ve (b) Q için hata değişimi bulanık üyelik fonksiyonları (The fuzzy membership functions for (a) change in error for T and (b) change in error for Q in the third operating condition)

Deneysel çalışmalarda sistem önce belirlenen çalışma sıcaklığına kadar ısıtılır ve daha sonra sisteme ani olarak başlatıcı ilavesi ile deney başlatılır. Bu aşamada bulanık kontrol devreye alınır ve aynı zamanda da besleme akımı belirlenen akış hızı profilinde sisteme beslenmeye başlanır. Üç işletim koşulu için reaktör hacminin zamanla değişimi Şekil 12' de verilmiştir.

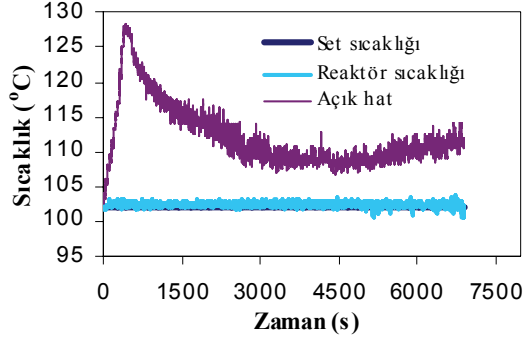
Tablo 1' de verilen birinci işletim koşulu için kontrolsüz (açık-hat) ve bulanık kontrol yöntemi ile yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen reaktör içi sıcaklık değişimi Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bulanık kontrol 26 °C gibi büyük bir sıcaklık farkını iyi derecede kontrol edebilmektedir. Bu işletim koşulunda kontrol kullanılmadan yapılan deneysel çalışmada elde edilen ürünün özellikleri hedeflenen değerden oldukça saptığı gözlenirken kontrollü deney sonucunda hedeflenen değerlere yakın özellikte polimer elde edilmiştir.



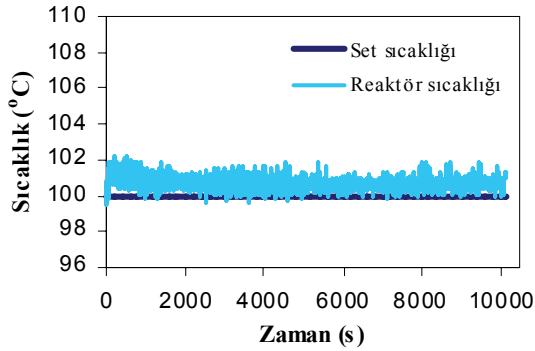
**Şekil 12.** Reaktör hacminin zamanla değişimi (Time variations of reactor volume)

Tablo 1' de verilen ikinci ve üçüncü işletim koşullarında yapılan kontrol çalışması sonucunda elde edilen reaktör içi sıcaklığının zamanla değişimi sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15' de gösterilmiştir.

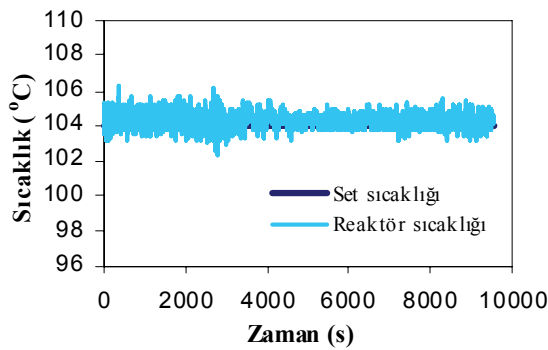




**Şekil 13.** Birinci işletim koşulu için reaktör sıcaklığının zamanla değişimi ( $I_0 = 0,0073$  mol/l,  $T_R = 102$  °C,  $t_f = 6800$  s) (Time variations of reactor temperature for first operating condition)



**Şekil 14.** İkinci işletim koşulu için reaktör sıcaklığının zamanla değişimi ( $I_0 = 0,008$  mol/l,  $T_R = 100$  °C,  $t_f = 10000$  s) (Time variations of reactor temperature for second operating condition)



**Şekil 15.** Üçüncü işletim koşulu için reaktör sıcaklığının zamanla değişimi ( $I_0 = 0,008$  mol/l,  $T_R = 104$  °C,  $t_f = 9400$  s) (Time variations of reactor temperature for third operating condition)

Üç işletim koşulu için de parametreleri GA ile bulunan bulanık kontrolün reaktör içi sıcaklığını istenen set noktasında başarı ile tutabildiği gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen monomer dönüşümü ve ortalama molekül ağırlık

değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Deneysel olarak bulunan monomer dönüşümünün teorik olarak bulunan dönüşüm değerlerinden yüksek çıktığı, deneysel olarak bulunan viskozite ortalama molekül ağırlığı değerlerinin ise teorik olarak hesaplanan sayıca ortalama molekül ağırlığı değerleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda dönüşüm değerlerinin teorik olarak beklenenden fazla çıkmasının nedeni olarak modelleme çalışmalarında ihmal edilen jel etkisi, toluenin buharlaşması ile meydana gelen az miktardaki hacim azalması ve ısı polimerleşme gösterilebilir.

**Tablo 2.** Deneysel dönüşüm ve ortalama molekül ağırlık değerleri (Experimental conversion and average molecular weight values)

Deney no	X (%)	$\bar{M}_v$ (g/mol)
1	44,6	66876,3
2	50	60410,6
3	54,7	59882

## 8. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bulanık kontrol yöntemi yarı-kesikli bir polimer reaktörünün sıcaklığını istenen set noktasında tutmak amacıyla kullanılmıştır. Bulanık kontrol parametreleri olan üyelik fonksiyon kümeleri ve ilişki matrisi GA kullanılarak bulunmuştur. Üç farklı işletim koşulu için teorik ve deneysel kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Parametreleri GA ile bulunan bulanık kontrol yönteminin yarı-kesikli polimerizasyon reaktörünün ekzotermik reaksiyon nedeniyle artan reaktör içi sıcaklığını başarı ile kontrol ettiği sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda hedeflenen monomer dönüşümünden daha yüksek dönüşümler elde edilmiştir. Ortalama molekül ağırlığı açısından ise hedeflenen değerlere yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

## SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

A	Toplam ısı transfer alanı ( $m^2$ )
$C_p, C_{pc}$	Reaktör içerisindeki çözeltinin ve soğutma suyunun ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
F	Başlatıcı verimi
$\Delta H$	Reaksiyon ısısı (kJ/kmol)
I, $I_0$	Başlatıcı konsantrasyonu, başlatıcının başlangıç konsantrasyonu (mol/l)
$k_d$	Radikal oluşum hız sabiti ( $s^{-1}$ )
$k_p, k_t$	Gelişme basamağında hız sabiti, sonlanma basamağında hız sabiti (l/mol s)
$\lambda_0, \lambda_2$	Sıfırıncı ve ikinci dereceden moment
M, $M_0$	Monomer konsantrasyonu, monomerin başlangıç konsantrasyonu (mol/l)
$\dot{m}_c$	Soğutma suyu akış hızı (kg/s)
$\bar{M}_{nd}$	İstenen sayıca ortalama molekül ağırlığı (g/mol)



$\bar{M}_v$	Viskozite ortalama molekül ağırlığı (g/mol)
$\mu_r$	Bağıl viskozite
$Q$	Isıtıcıdan verilen ısı miktarı (kW)
$Q_f$	Besleme akış hızı (ml/s)
$Q_{fm}$	Beslemedeki monomer akış hızı (ml/s)
$\rho, \rho_c$	Reaktör içerisindeki çözelti yoğunluğu, soğutma suyu yoğunluğu (kg /m <sup>3</sup> )
$T_{ci}, T_{co}$	Soğutma suyunun giriş, çıkış sıcaklığı (°C)
$\bar{T}_c$	Soğutma suyunun ortalama sıcaklığı (°C)
$T_R$	Reaktör içi sıcaklık (°C)
$U$	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$V, V_c$	Reaktör içerisindeki çözelti hacmi, ceket hacmi (l)
$X, X_d$	Monomer dönüşümü, istenen monomer dönüşümü (%)

### KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

GA	Genetik Algoritma
IAE	Hatanın mutlak Değerinin İntegrali (Integral of the Absolute Value of Error)
ISOFLC	Basitleştirilmiş Optimize Bulanık Mantık Kontrol Ediciler
NARMAX	Doğrusal olmayan ARMAX modeli (The nonlinear autoregressive moving average with exogenous inputs)

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi 06/2008-21 kodlu BAP projesi ile desteklenmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Özkan, G., Özen, Ş., Erdoğan, S., Hapoğlu, H. ve Alpaz, M., "Nonlinear control of polymerization reactor", **Computers and Chem. Eng.**, Cilt 25, No 757- 763, 2001.
- Pal, T., Pal, N. R. ve Pal, M., " Learning Fuzzy Control Rules for Controllers with Genetic Algorithms", **International Journal of Intelligent Systems**, Cilt 18, 569- 592, 2003.
- Altınten, A., Erdoğan, S., Alioğlu, F., Hapoğlu H. ve Alpaz, M. "Application of adaptive PID control with genetic algorithm to a polymerization reactor", **Chem. Eng. Comm.**, Cilt 191, 1158-1172, 2004.
- Antures, A.J.B., Pereira, J.A.F.R. ve Fileti, A.M.F., "Fuzzy control of a PMMA batch reactor: Development and experimental testing", **Computers and Chem. Eng.**, Cilt 30, 268-276, 2005.
- Altınten, A., Erdoğan, S., Hapoğlu H., Aliev, F. ve Alpaz, M. "Application of fuzzy control method with genetic algorithm to a polymerization reactor at constant set point", **Chem. Eng. Research and Design**, Cilt 84, No A11, 1012-1018, 2006.
- Altınten, A., Ketevanlıoğlu, F., Erdoğan, S., Hapoğlu H. ve Alpaz, M. "Self-tuning PID control of Jacketed batch polystyrene reactor using genetic algorithm", **Chem. Eng. J**, Cilt 138, 490-497, 2008.
- Güzel, Y., Hasan, A.R., Karagöz, A.R., Erdoğan, S., Alpaz, M. ve Saçak, M., "The Dynamic Properties of Jacketed Batch Reactor of Radical Styrene Polymerization", **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, Cilt 17, No 2, 81-90. 1993.
- Holland, J.H., **Adaptation in natural and artificial systems**, Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- Altınten A., **Genetik Algoritma Kullanılarak Fuzzy Kontrol Yöntemi İle Bir Stiren Polimerizasyon Reaktörünün Kontrolü**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- Gözen, Ş., **Bulanık esnek akış tipi çok prosesli çizelgeleme probleminin genetik algoritma ve tavlama benzetimi ile çözümü**, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- Atlaş, İ. H., "Bulanık Mantık: Bulanık Denetim", **Enerji, Elektrik, Elektromekanik - 3e**, 64: 76- 81, 1999.
- Newell, R. B. ve Lee, P. L., **Applied Process Control: A Case Study**, Prentice Hall, 97-111, 1989.
- Altınten, A., Erdoğan, S., Hapoğlu, H. ve Alpaz, M., "Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm", **Comput. Chem. Eng.**, Cilt 27, No 7, 1031-1040, 2003.

