

LİNEER OLMAYAN SİSTEMLER İÇİN BİR BULANIK KUADRATİK REGULATOR TASARIMI

Bildiri Konusu: Bilgisayar ve Otomasyon: Otomasyon ve Kontrol

Yusuf OYSAL

Sakarya Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Esentepe Kampüsü Adapazarı
oysal@esentepe.sau.edu.

A. Ferit KONAR

Sakarya Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Esentepe Kampüsü Adapazarı
konar@esentepe.sau.edu.tr

Özet: Temelinde insan düşüncesi ve tecrübesine dayanan kurallar içeren bulanık kontrol tasarımları son dönemlerde endüstride kullanılmaktadır. Bulanık kontrol tasarımının en önemli avantajı, sistemin modeline yada lineer olup olmama durumuna bakmaksızın tasarım yapılabilmesidir. Yani kuralların belirlenmesidir. Bu çalışmada lineer olmayan bir sistem için bulanık kontrol edici tasarlanmıştır. Bulanık kontrol edici Takagi-Sugeno-Kang (TSK) formunda olup parametreleri sürekli zamanda lineer kuadratik regülâtör (LQR) ile hesaplanmıştır. Bu tasarım daha çok uçakların kontrol için kullanılan çoklu Kalman süzgecinden esinlenerek gerçekleştirilmiştir. Hesaplama, lineer olmayan sistem önce seçilen kural sayısına elde edilen durum kombinasyon noktalarında lineerleştirilmiştir. Daha sonra bu lineer sistem modelleri için LQR tasarımı ile elde edilen parametreler, TSK bulanık sistem modelinin bilinmeyen parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Sonuçta elde edilen bulanık kontrol sisteminin başarılı benzetim çalışmaları gösterilmiştir. Bu tasarıma bulanık kuadratik regülâtör (BKR) denmiştir.

Anahtar kelimeler: Bulanık kontrol, çoklu Kalman süzgeci

GİRİŞ

Kararlılık ve optimallik herhangi bir kontrol sistemi için en önemli gereksinimlerdir. Lineer sistemler analitik olarak kolay incelenebildiği için bu iki şartın sağlanması amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Lineer sistemler için kuadratik bir performans ölçütü alınıp bunu en aza indiren kontrol girişi problemi çözüldü ve bu problem, lineer kuadratik regülâtör (LQR) problemi olarak literatürde yerini aldı [1,2]. Kalman LQR problemi için tasarım denklemlerini sağlayarak sistemin optimal kontrolünü tartıştı ve optimallik açısından başarılı sonuçlar elde etti [3]. LQR problemine göre lineer olmayan sistemlerin optimal kontrol problemi daha geneldir. Analitik doğrudan çözüm bulmak kolay değildir. Bununla beraber bulanık denetleyiciler kural tabanlı lineer olmayan denetleyici oldukları için asıl amaç lineer olmayan

sistem kontrolüdür. Optimallik açısından bakacak olursak optimal bulanık kontrol alanı tamamen açıktır. Bu alanda yapılacak çok iş vardır. Yapılan çalışmalar ise parmakla sayılacak kadar azdır. Daha çok bulanık optimal denetleyici tasarımları lineer sistemler için gerçekleştirilmiştir [4-6]. Wang 1998'de yaptığı çalışmada LQR problemini bulanık denetleyici parametrelerini bulmak için çözmüştür ve lineer sistem uygulamalarına örnekler vermiştir. Bu çalışmada ise Wang'ın bulanık LQR çalışması ışığında lineer olmayan sistemler için bulanık kuadratik regülâtör (BKR) tasarımı yapılacaktır. Yapılacak tasarım "Çoklu Kalman süzgeci" çalışmalarından esinlenmiştir. [7] ve [8] nolu çalışmalarda herhangi bir zaman anında sisteme uygulanan kontrol girişi ve gürültü girişini referans olarak çalışan N adet LQR kompanzâtör bulunmaktadır. Bunlar her model için kurulan ayrı zamanlı sürekli rejim LQR denetleyicilerdir. Algoritma her bir modelin t. zaman anında hangisinin daha doğru olduğunu gösteren şartlı öncelik olasılığa sahiptir. Bu olasılıklar algoritma tarafından değerlendirilip hangi modelin daha etkin çalışması gerektiğini hesaplamaktadır. [9] nolu çalışmada ise aynı t. zaman anında farklı sensörlerden bilgi alan paralel çalışan Kalman filtre yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmada her t anında ölçüm yerine, sistemin durumlarının değişimine bağlı olarak bulanık kural tabanlı kuadratik regülâtör tasarlanacaktır.

1.Bölüm'de lineer kuadratik regülâtör probleminin tanıtımı ve çözümü verilecektir. 2.Bölüm'de lineer sistemlerin herhangi bir çalışma noktası civarında lineerleştirilmesi gösterilecektir. Daha sonraki bölümde lineer olmayan sistemler için bulanık kuadratik regülâtör tasarımı için algoritma verilecektir. 4.Bölümde algoritmanın CSTR sistemine uygulanarak elde edilen benzetim çalışması sonuçları sunulacaktır. Sonuçlar kısmında bundan sonra yapılabilecek çalışmalar özetlenecektir.

1. LİNEER KUADRATİK REGULATOR

Bu bölümde kuadratik performans ölçütünün en aza indirilmesine dayalı kararlı bir kontrol sistemi tasarlanacaktır. Sistem lineerdir ve aşağıdaki formdadır:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

Burada $x \in R^n$ durum vektörü, $u \in R^m$ kontrol vektörü, A $n \times n$ ve B $n \times m$ boyutunda sabit katsayı matrisleridir. Burada ele alınacak problem (1) denklemi ile verilen sistem için

$$J = \frac{1}{2} x_f^T S x_f + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2)$$

performans ölçütünü en aza indiren optimal $u(t)$ kontrol vektörünün bulunmasıdır. Burada Q pozitif yarı-tanımlı Hermitian veya reel simetrik matris, R pozitif tanımlı Hermitian veya reel simetrik matris ve u sınırlandırılmamıştır. Bu şekilde tasarlanan sistem kararlıdır. Bunu, Lyapunov'un ikinci yöntemine dayalı bir yaklaşımla göstermek mümkündür [1,2]. LQR probleminin çözümünde Pontryagin'in minimum prensibi uygulandığında optimal kontrol probleminin çözümü şu şekilde olur:

$$u = -R^{-1} B^T P x(t) \quad (3)$$

Bu da zamanda sürekli geribesleme kanununu verir:

$$u(t) = -K(t)x(t) \quad (4)$$

Burada kazanç matrisinin hesaplanabilmesi için Riccati diferansiyel denkleminin çözülmesi gerekir. Riccati diferansiyel denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\dot{P} = -PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q \quad P(t_f) = S \quad (5)$$

Bu, zamanda geriye doğru çözülmesi gereken bir diferansiyel denklemdir. Eğer dinamik sistem aşağıdaki gibi homojen olmayan lineer bir diferansiyel denklemle ifade edilirse bu durumda problem "homojen olmayan lineer kuadratik optimizasyon problemi" adını alır [1].

$$\dot{x} = Ax + Bu + W \quad x(t_0) = x_0 \quad (6)$$

Bu problemin çözümünde optimal kontrol

$$u(t) = -R^{-1} B^T (Px(t) + k) \quad (7)$$

formundadır. Burada Riccati matrisi ve k sürücü vektörü olup P , (7) diferansiyel denkleminde, k ise

$$\dot{k} = (PBR^{-1}B^T - A^T)k - PW, \quad k(t_f) = 0 \quad (8)$$

diferansiyel denkleminde hesaplanır.

2. DOĞRUSALLAŞTIRMA

Bir sürecin dinamik değişkenlerinden birini veya bir kaçını bir yörünge ya da bir çalışma noktası civarında, dış bozuculara, ayar noktası değişimlerine, ölçüm gürültülerine ve sistem parametrelerindeki belirsizliğe rağmen, tutabilmek için yerel kontrol tasarlandığı zaman bir proses küçük değişim modeli gerekmektedir. Eğer fiziksel prosesin dinamiği aşağıdaki diferansiyel ve cebirsel denklemlerle karakterize edilirse [10]

$$\dot{x} = f(\dot{x}, y, x, u, p) \quad (9)$$

$$y = g(\dot{x}, y, x, u, p) \quad (10)$$

$$r = h(\dot{x}, y, x, u, p) \quad (11)$$

Burada $x \in R^n$ durum vektörü, $y \in R^m$ cebirsel toplama noktası değişkeni, $r \in R^m$ çıkış değişkeni, $u \in R^m$ kontrol veya bozucu giriş değişkeni ve proses parametre vektörüdür. (9), (10) ve (11) denklemleri ile verilen proses dinamiklerinin

$$\dot{\tilde{x}} = f(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{x}, \tilde{u}, p) \quad (12)$$

$$\tilde{y} = g(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{x}, \tilde{u}, p) \quad (13)$$

$$\tilde{r} = h(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{x}, \tilde{u}, p) \quad (14)$$

denklemleri ile tanımlanan nominal yörünge etrafında lineerleştirilirse

$$\delta \dot{x} = F_x \delta x + F_y \delta y + F_x \delta x + F_u \delta u \quad (15)$$

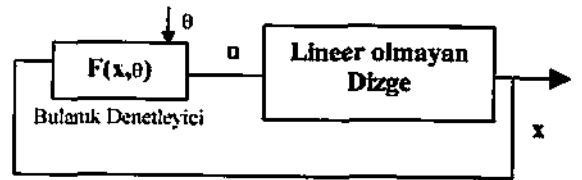
$$\delta y = G_x \delta x + G_y \delta y + G_x \delta x + G_u \delta u \quad (16)$$

$$\delta r = H_x \delta x + H_y \delta y + H_x \delta x + H_u \delta u \quad (17)$$

Lineerleştirmenin temelinde Taylor serisi açılımı vardır. Birinci dereceden yüksek terimler ihmal edilmiştir.

3. BULANIK KUADRATİK REGÜLATÖR (BKR) ALGORİTMASI

Bu bölümde lineer sistemler için tasarlanan LQR kontrol sisteminden yararlanarak lineer olmayan sistemler için BKR tasarımı gerçekleştirilecektir.



Şekil 1. Bulanık kontrol sistemi

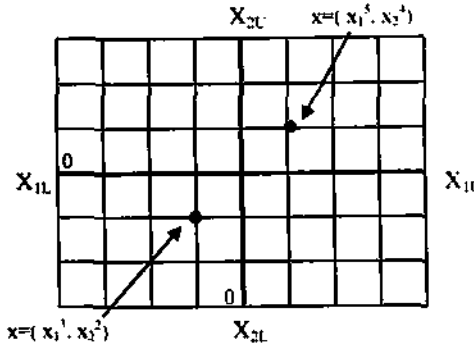
Bu bölümde tasarlanacak bulanık kontrol sisteminin blok şeması şekil 1'de verilmiştir. [7-9] kaynaklarında Kalman filtresi çalışmalarına benzer bir yapıda birçok geribesleme kazanç değerinden en uygun olanının tayinini burada bulanık sistem gerçekleştirecektir. Oradaki çalışmalardan farklı olarak burada kazanç belirlenmesi sistemin durumlarına bağlı olacaktır.

Lineer olmayan bir dinamik sistem aşağıdaki diferansiyel denklemle ifade edilsin.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad x(t_0) = x_0 \quad (18)$$

Burada $x \in R^n$ durum vektörü, $u \in R^m$ kontrol vektörüdür. Lineer olmayan sistemler için BKR tasarımı aşağıdaki algoritma ile gerçekleştirilecektir:

- 1) (18) denklemi ile verilen sistemin durumları için değişim aralığı belirlenip eşit ızgarasal aralıklarla seçilen noktaları belirle. Şekil 2'de iki durumlu bir sistem için seçilen noktalar gösterilmiştir.
- 2) Seçilen her nokta kombinasyonunda sistem lineerleştirilip (A_i, B_i, W_i) homojen olmayan sistem matrislerini bul.
- 3) Her (A_i, B_i, W_i) için (5) Riccati matris ve (8) sürücü diferansiyel denklemlerini sürekli rejim için $(\dot{P}_i = 0, k_i = 0)$ çözülüp (7) formundaki $u_i(t)$ optimal kontrol girişin elde et.



Şekil 2. İki durumlu sistem için durum uzayında ızgarasal nokta seçimi

4) Elde edilen sonuçları

1.kural:

EĞER $x_1 = x_1^1$ ve $x_2 = x_2^1$ ve ... ve $x_n = x_n^1$ İSE
 $u_i = K_1^1 x_1^1 + K_2^1 x_2^1 + \dots + K_n^1 x_n^1 + M_1$

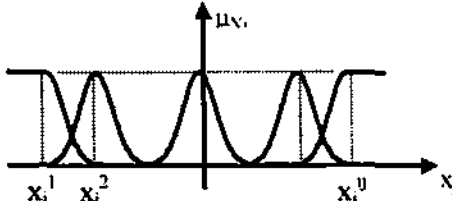
...

r. kural:

EĞER $x_1 = x_1^r$ ve $x_2 = x_2^r$ ve ... ve $x_n = x_n^r$ İSE
 $u_i = K_1^r x_1^r + K_2^r x_2^r + \dots + K_n^r x_n^r + M_r$

formunda $r = i_1 \times i_2 \times \dots \times i_n$ adet bulanık sistem kuralı şeklinde ifade et.

5) 2. Basamaktaki parçalanmış noktalar göre her sistem durumu için Gaussian üyelik fonksiyonlarını (şekil 3) elde et.



Şekil 3. Lineer olmayan dinamik sistem durumlar için Gaussian üyelik fonksiyonu

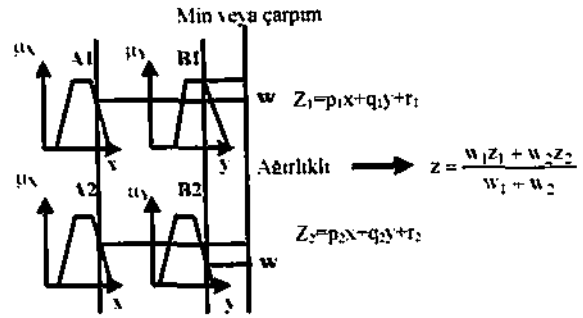
6) Kural zincirinde sonuç kısımları Takagi-Sugeno-Kang (TSK) formunda olduğu için TSK karar mekanizması (şekil 4) kullanan bir bulanık sistemle kontrol düzenliğini gerçekleştir.

Bulanık sistem Tekli (singleton) bulanıklaştırıcı, çarpım karar mekanizması, merkezi ortalama arındırıcı ve Gaussian üyelik fonksiyonuna sahip standart n durumlu bir bulanık sistem aşağıdaki fonksiyona tanımlanmış olur [11]:

$$K(x, t) = \frac{\sum_{i=1}^r (K_i^1 x_1 + \dots + K_n^i x_n + M_i) \prod_{j=1}^n \exp(-\frac{1}{2} (\frac{x_j - c_{ij}}{\sigma_{ij}})^2)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^n \exp(-\frac{1}{2} (\frac{x_j - c_{ij}}{\sigma_{ij}})^2)} \quad (19)$$

Burada K_j^i ($i = 1, \dots, r$ ve $j = 1, \dots, n$) TSK sistem parametreleri 4.basamakta elde edilen r adet kurallardan sırası ile elde edilen durum katsayı değerleridir. c_{ij} ve σ_{ij} sırasıyla i inci kuralın j inci sistem durumunun Gaussian üyelik fonksiyonu için

merkezi ve yayılım parametresidir. Merkez parametreleri 5. Basamakta gösterildiği gibi her bir durum için 1. Basamaktaki ızgarasal aralıklı noktalara karşılık gelmektedir.



Şekil 4. Minimum ya da çarpım operatörü kullanan birinci dereceden Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık modeli

Bu algoritma, her bir entegrasyon basamağında, lineer olmayan dinamik sistemin lineerleştirip sistem durumlarının o anki değerlerine göre, en uygun ağırlığa sahip olanın kazanç matrisini belirlemede daha etkin olduğunun bulanık sistem ile ifade edildiği bir kontrol düzeniğidir.

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

4.1 EKZOTERMİK CSTR SİSTEMİ

Bu çalışmada, Ray'in modeli kullanılmıştır [12]. CSTR, en basit durumda A → B'ye birinci dereceden ekzotermik (ısı veren) terslenemez reaksiyonu içerir. Aşağıda, CSTR'ın matematiksel modeli verilmiştir:

$$\frac{dx_1}{dt} = -x_1 + Da(1 - x_1) \exp\left[\frac{x_2}{1 + x_2 \cdot \gamma}\right] \quad (20)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -x_2 + B_c Da(1 - x_1) \exp\left[\frac{x_2}{1 + x_2 \cdot \gamma}\right] - \beta(x_2 - x_{2c}) + d + \beta u \quad (21)$$

Burada, Da Damköhler sayısı, x_1 ve x_2 sırayla boyutsuz reaktör konsantrasyon ve sıcaklığını temsil eder. Ayrıca, d, u, γ değişkenleri sırayla, besleme sıcaklık bozması, kontrol ve çıkış boyutsuz sapma değişkenleridir. Kontrol olarak soğutucu ceket sıcaklığı alınmıştır.

CSTR sistemin herhangi bir $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ durum noktasında lineerleştirilmesi sonucunda, homojen olmayan lineer sabit katsayılı CSTR modeli elde edilir:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + C \quad (22)$$

Burada

$$A = Da \exp\left[\frac{\bar{x}_2}{1 + \bar{x}_2 \cdot \gamma}\right] \begin{bmatrix} -1 & \frac{1 - \bar{x}_1}{(1 + \bar{x}_2 / \gamma)^2} \\ -B_c & B_c \frac{1 - \bar{x}_1}{(1 + \bar{x}_2 / \gamma)^2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 + \beta \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix}$$

$$C = \left[\begin{array}{c} Da \exp\left(\frac{-\tau}{1-\gamma}\right) \left(1 - \frac{(1-\bar{x}_1)\bar{x}_2}{(1+\bar{x}_2/\gamma)^2}\right) \\ B_c Da \exp\left(\frac{-\tau}{1-\gamma}\right) \left(1 - \frac{(1-\bar{x}_1)\bar{x}_2}{(1+\bar{x}_2/\gamma)^2}\right) + \beta x_{2c} + d \end{array} \right]$$

Benzetim çalışmalarında CSTR'ın nominal parametrelerinin değerleri $B=11$, $\beta=1.5$, $\gamma=50$, $Da=0.135$ olarak alınmıştır. CSTR bu bölgede, çok küçük değişimlere büyük artışlarla cevap vermektedir. 3.bölümde anlatılan algoritmayı uygulamak için aralıklar $x_1=[-1 \ 1]$ ve $x_2=[-5 \ 5]$ olarak alınmıştır. Her aralık 6 eşit parçaya bölünerek 49 adet nokta kombinasyonunda lineerleştirme gerçekleştirilmiştir. Bu noktalarda elde edilen homojen olmayan lineer sistemler için (5) ve (8) diferansiyel denklemlerinin denge değerler hesaplanarak Riccati kazanç matrisi ve sürücü vektörü bulunmuştur. Bu değerler tablo 1'de gösterilmiştir. Kuadratik performans ölçütü parametreleri olarak $Q=I_{2 \times 2}$, $R=1$ ve $S=I_{2 \times 2}$ alınmıştır. Sonuçta 49 adet kural elde edilmiştir. Bu durumda bulanık sistem durum üyelik fonksiyonları şekil 5'te verilmiştir. CSTR için istenen nominal çalışma değerleri $T = 300^\circ\text{C}$ ve $Ca=0.245 \text{ mol/m}^3$ dir. Bunlar $x=(0 \ 0)$ 'a karşılık gelmektedir. CSTR başlangıç durum değerler olarak $x=(0.1 \text{ mol/m}^3 \ 317^\circ\text{C})$ alınmıştır. Sistemin ne kadar hassas değişmeler sergilediğini göstermek için kontrol sıcaklığını 300°C sabit değerde alıp sisteme uygulandığında şekil 6'daki CSTR durum eğrileri elde edilir. Şekil 7'de $t_0=0$ başlangıç zamanında $t_f=10\text{sn}$ zaman anına kadar BKR algoritması uygulanarak elde edilen benzetim sonucu verilmiştir. Görüldüğü gibi CSTR durumları istenen noktaya gelmiştir.

Elde edilen kontrol sisteminin dayanıklılığını göstermek için 4.saniyede bozucu girişi 30°C artırılmıştır. Görüldüğü gibi sistem kararsızlaşp bir reaktör için tehlikeli sonuçlar elde edilmiştir (şekil 8). Aynı bozucu varken bulanık kontrol uygulandığında başarılı sonuçlar elde edilmiştir (şekil 9). Bu benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen kontrol sisteminin dayanıklı bir sistem olduğunu söylemek mümkündür.

5. SONUÇLAR

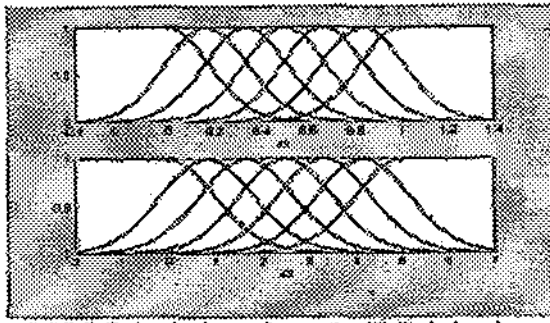
Elde edilen algoritma sonuçları gösteriyor ki bir kontrol tasarımında en önemli iki özellik olan optimallik ve kararlılık şartları bu kontrol algoritması ile sağlanmıştır. Fakat lineer olmayan sistemler için lineerleştirilecek durum aralıkları ve kuadratik performans ölçütünün seçimi çok önemlidir. Bu iyi bir mühendislik ve çalışılan dinamik sistem bilgisi gerektirmektedir. Ayrıca sistemin hızlı işleyen bir sistem olması da bu gibi tasarımların yapılmasını zorlaştırır.

Optimal kontrol ve bulanık sistemlerin ortak kullanılmasına yönelik çalışma alanı çok geniştir.

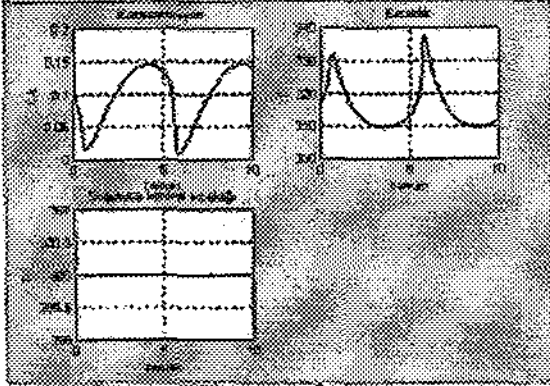
Daha yapılması gereken ve cevaplanması gereken birçok soru mevcuttur. Bu çalışma sadece bir örnektir. Yukarıda yapılan çalışmaya ek olarak bu tip tasarımlarda her benzetim adımı için en etkin bulanık kuralları belirleyip benzetim zamanının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Tablo 1. CSTR 'ın BKR kontrolü için bulanık sistem kuralları için veriler

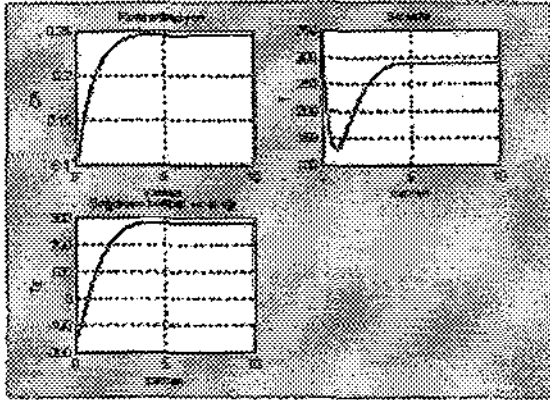
Kural	x_1	x_2	K_1	K_2	K_3
1	-1.00	-5.00	-0.0002	0.2783	-0.00
2	-1.00	-3.33	-0.0014	0.2864	-0.00
3	-1.00	-1.67	-0.0152	0.3421	-0.20
4	-1.00	0	-0.6027	1.2521	-1.00
5	-1.00	1.67	-8.4484	14.3479	19.71
6	-1.00	3.33	-41.7830	71.6991	207.00
7	-1.00	5.00	-175.2768	287.9088	1279.43
8	-0.67	-5.00	-0.0002	0.2781	-0.00
9	-0.67	-3.33	-0.0017	0.2848	-0.00
10	-0.67	-1.67	-0.0157	0.3294	-0.10
11	-0.67	0	-0.4383	0.9154	-0.82
12	-0.67	1.67	-8.1029	11.2462	14.53
13	-0.67	3.33	-41.1087	58.4777	163.32
14	-0.67	5.00	-173.0134	236.5026	1024.41
15	-0.33	-5.00	-0.0002	0.2779	-0.00
16	-0.33	-3.33	-0.0019	0.2832	-0.00
17	-0.33	-1.67	-0.0162	0.3175	-0.11
18	-0.33	0	-0.3086	0.6761	-0.52
19	-0.33	1.67	-7.5378	8.1516	9.43
20	-0.33	3.33	-40.0748	45.2467	119.82
21	-0.33	5.00	-169.5989	185.0848	770.21
22	0	-5.00	-0.0003	0.2777	-0.00
23	0	-3.33	-0.0022	0.2816	-0.00
24	0	-1.67	-0.0168	0.3064	-0.10
25	0	0	-0.2191	0.5143	-0.43
26	0	1.67	-6.4697	5.0922	4.41
27	0	3.33	-38.2859	31.9971	76.72
28	0	5.00	-163.8523	133.6435	517.93
29	0.33	-5.00	-0.0003	0.2774	-0.00
30	0.33	-3.33	-0.0024	0.2800	-0.00
31	0.33	-1.67	-0.0174	0.2960	-0.10
32	0.33	0	-0.1614	0.4054	-0.31
33	0.33	1.67	-4.1604	2.2785	0.23
34	0.33	3.33	-34.4208	18.7087	34.52
35	0.33	5.00	-152.1204	82.1452	270.34
36	0.67	-5.00	-0.0004	0.2772	-0.00
37	0.67	-3.33	-0.0027	0.2785	-0.00
38	0.67	-1.67	-0.0180	0.2862	-0.00
39	0.67	0	-0.1249	0.3304	-0.23
40	0.67	1.67	-1.3494	0.6796	-0.91
41	0.67	3.33	-20.7818	5.5728	-0.52
42	0.67	5.00	-114.6752	30.5468	43.33
43	1.00	-5.00	-0.0004	0.2770	-0.00
44	1.00	-3.33	-0.0030	0.2770	-0.00
45	1.00	-1.67	-0.0186	0.2770	-0.00
46	1.00	0	-0.1015	0.2770	-0.10
47	1.00	1.67	-0.4493	0.2770	-0.63
48	1.00	3.33	-1.3397	0.2770	-1.81
49	1.00	5.00	-2.3296	0.2770	-3.14



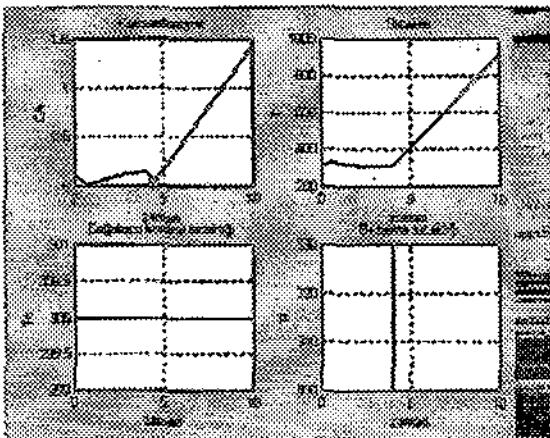
Şekil 5. Bulanık sistem durum üyelik fonksiyonları



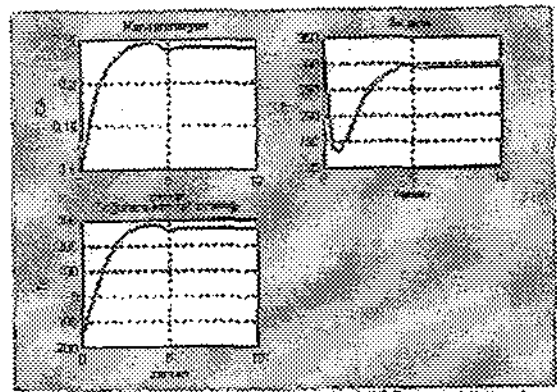
Şekil 6. Kontrol sıcaklığı 300°C sabit alınmış durumda elde edilen CSTR durumları ve kontrol sıcaklığı



Şekil 7. BKR algoritması sonucunda elde edilen CSTR durumları ve kontrol sıcaklığı



Şekil 8. d bozucusu t=4.saniyede 30°C sınırlılığında CSTR durumları ve kontrol sıcaklığı



Şekil 9. d bozucusu t=4.saniyede 30°C aritılığında CSTR durumları ve geribeslem kontrol sıcaklığı

Kaynaklar:

- [1] Bryson A. E. Ho J. Y., *Applied Optimal Control*, Hemisphere Publishing Company, N.W., Washington, D.C., 1975
- [2] Ogata K., *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1990
- [3] Kalman R. E., "Contributions to the Theory of Optimal Control", *Bol. Soc. Mat. Mexicana*, vol.5, pp. 102-119, 1960
- [4] Shoureshi R., and Rahmani K., "Derivation and Application of an Expert Optimal-Control System", *Fuzzy sets and Systems*, vol. 49, Iss 2, pp 93-101, 1992.
- [5] Filev D. and Angelov P., "Fuzzy Optimal-Control", *Fuzzy sets and Systems*, vol. 47, Iss 2, pp 151-156, 1992.
- [6] Wang L. X., "Stable and Optimal Fuzzy Control of Linear Systems", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.6, no 1, pp 137-143, 1998.
- [7] Stein G. And Hartmann G. L., "Adaptive Control Laws for F-8 Flight Test", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.22, no.5, pp.758-767, October 1977.
- [8] Athans M., et al., "The Stochastic Control of the F-8 Aircraft Using a Multiple Model Adaptive Control (MMAC) Method-Part I: Equilibrium Flight", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.22, no.5, pp.768-780, October 1977.
- [9] Hashemipour H. R., Roy S., and Laub A. J., "Decentralized Structures of Parallel Kalman Filtering", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.33, no.1, pp.88-94, January 1988.
- [10] A.F. Konar, and T. Samad, "Hybrid Neural Network/ Algorithmic System Identification." *Technical Report SSDC-91-14051-1*, Honeywell SSDC, 3660 Technology Drive, Minneapolis, MN 55418, 1991.
- [11] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ, 1997.
- [12] W.H. Ray, "New Approaches to the Dynamics of Nonlinear Systems with Implications for Process and

Control System Design", in *Chemical Process Control II*, Edgar Seabor Edit., pp.245-267, 1981.