

Bir Biyoreaktör Sisteminin Gürbüz Nörokontrolü

Başak Ünal¹ ve Mehmet Önder Efe²

¹Makina Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü, Ankara
bunal@etu.edu.tr

²Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü, Ankara
onderefe@etu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada literatürde bazı çalışmalara konu olmuş biyoreaktör kontrol problemi ele alınmıştır. Çalışmada sistem parametrelerinin sıcaklıkla değişim gösterdiği durum ele alınmış, nominal sistem için daha önce geliştirilen nonlinear kontrolörün kararsız olduğu, sayısal gözlemlere dayanarak türetilen bir nörokontrolör ile sistemin durum değişkenlerinin belirli bir sıcaklık aralığı için istenen değerlere yönlendirilebildiği gösterilmiştir.

1. Giriş

Nonlinear sistemlerin kontrolü sistem dinamiğindeki nonlinear terimlerin ve bu terimlerin davranışa etkilerinin iyi anlaşılmasını gerektirir ve kimi zaman kesinsizliklerin ve bozucu etmenlerin de etkisiyle son derece karmaşık bir problem tanımı ortaya çıkar. Kimyasal süreçleri ifade eden modeller çoğunlukla nonlinear modellerdir ve kontrol sistemi tasarımında bahsedilen güçlükleri barındırırlar. Geçmişte PID tipinde kontrolörler bu alanda yaygın biçimde kullanılmış olsa da [1], yeni teknolojilerin ortaya çıkması ve performans beklentilerinin yükselmesi araştırmacı ve tasarımcıları yeni arayışlara yönlendirmiştir.

Süreç kontrolünde giderek popüler olan bir yaklaşım da algoritmik tekniklerin mantıksal çıkarım ve buluşsal teknikler ile harmanlanmasıdır. Bu tip sistemler akıllı kontrol sistemleri olarak bilinmektedir. Kontrol problemlerinde geniş uygulama alanı bulan bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi teknikler klasik yapay zeka kavramlarından türetilmişlerdir ve değişen çalışma şartlarına uyarlabilirlik özelliklerinden dolayı bu yöntemlere dayalı nonlinear kontrol sistemleri klasik yöntemlere nazaran daha iyi sonuçlar verebilmektedir, [2].

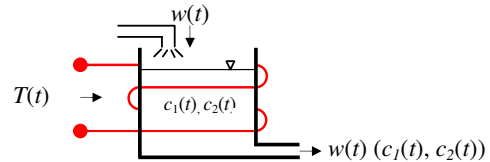
Bildiride ele alınan biyoreaktör kontrol probleminin nominal hali geçmişte bazı çalışmalara konu olmuştur. Hücre miktarının istenen bir değerde tutulmasını gösteren [3] kaynağında geribeslemeli kontrol ile hücre gelişimini betimleyen denklem birinci dereceden bir ifadeye dönüştürülmüştür. Ardından kullanılan bir YSA ile sistem modelindeki bir nonlinear fonksiyon gerçekleştirilmiş ve bir referans modelin öngördüğü çıkış değerleri elde edilmiştir. Puskirous ve Feldkamp ise aynı nominal model üzerinde YSA kullanımının etkinliğini incelemiş ve kararlı bölgedeki bir çalışma noktasından kararsız bölgedeki bir çalışma noktasına YSA tabanlı bir kontrolör ile geçişi göstermiştir, [4]. Brengel

ve Seider ise [5] kaynağında tahminli kontrol kuramına dayanan bir çok-adımlı kontrolör tasarlamış ve tasarımı bu çalışmada ele alınan sistem modeline benzer bir model üzerinde doğrulamıştır. Aynı çalışmada azami hücre miktarı sergileyen çalışma koşullarının tercih edilirliliği vurgulanmış ve bu koşulların periyodik yörüngelerden uzak olmasının da istenen bir durum olduğu belirtilmiştir. Anderson ve Miller, bu çalışmada nominal modele denk düşen modelin dahi oldukça zengin bir dinamik yapıya sahip olduğunu ifade etmekte ve besin miktarında herhangi bir kararsızlığa mahal vermeksizin istenen hücre miktarının sağlanmasını dikkate değer bir kontrol problemi olarak addetmektedir, [6]. Açığı ki bahsi geçen çalışmalarda vurgulanan gerçeklik biyoreaktör kontrol probleminde yeni yaklaşımların denenmesi ve tartışılması hususunda araştırmacıları motive etmektedir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde çalışmaya konu olan biyoreaktör sistemi incelenmiş ve nominal sistemin elde edildiği koşullar verilmiştir. 3. bölümde nominal modele dayalı, [3] kaynağında ele alınan model dayanaklı kontrol yönteminin mevcut çalışma koşullarında iyi neticeler vermediği gösterilmiş, 4. bölümde kontrolörün ileri yönlü yapay sinir ağları ile nümerik verilere dayanarak elde edilmesi ve simülasyonu aktarılmış ve 5. bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

2. Biyoreaktör Sistemi

Biyoreaktör sistemi Şekil 1'de de gösterildiği gibi besin ve hücrelerin su içerisinde karışımından müteşekkil, dış ortamdan saf su ile seyreltilen ve atık yoluyla reaksiyon hacminin sabit tutulduğu nonlinear bir sistemdir. Ungar [7] tarafından tanımlanan biyoreaktör denektaşı¹ problemi (1)-(2) denklemleri ile verilmektedir.



Şekil 1: Reaksiyon tankı.

¹ İng. benchmark

$$\dot{c}_1 = -c_1 w + c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma_n} \quad (1)$$

$$\dot{c}_2 = -c_2 w + c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma_n} \frac{1 + \beta_n}{1 + \beta_n - c_2} \quad (2)$$

Reaksiyon tankı içerisinde yer alan hücre miktarı c_1 , besin miktarı c_2 değişkenleri ile gösterilmektedir. Tanka saf su ilave edilirken tank içerisindeki karışım belli bir oranda tahliye edilmektedir ve bu işlemde katılan ve ayrılan sıvı debisi aynı olup w değişkeni ile gösterilmektedir. Modelde nominal besin inhibasyonu $\gamma_n=0.48$ ve nominal büyüme oranı $\beta_n=0.02$ ile verilmektedir. Kontrol problemi ise w değişkenini izin verilen sınırlar içerisinde değiştirerek reaksiyon tankı içerisinde istenen bir hücre düzeyini sürdürebilmektir.

Bu çalışmada, besin inhibasyonu değişkeninin (γ) ve büyüme oranı parametresinin (β) ortam sıcaklığına göre değişim gösterdiği durum incelenmektedir. Bu değişiklikte birlikte sistemi betimleyen denklemler aşağıdaki gibi olur.

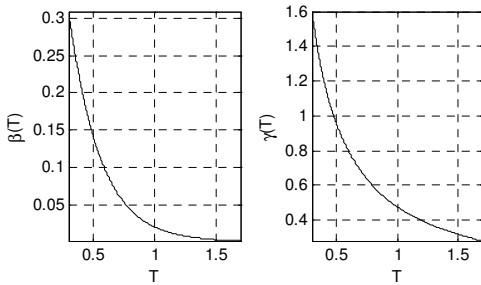
$$\dot{c}_1 = -c_1 w + c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma(T)} \quad (3)$$

$$\dot{c}_2 = -c_2 w + c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma(T)} \frac{1 + \beta(T)}{1 + \beta(T) - c_2} \quad (4)$$

T ile verilen normalize edilmiş sıcaklık değişkeni zamanla değişmektedir ve sistem parametrelerinin bu değişkene bağlılığı aşağıdaki gibidir.

$$\gamma(T(t)) = \frac{\gamma_n}{T(t)} \text{ ve } \beta(T(t)) = \beta_n^{T(t)} \quad (5)$$

Dikkat edilmelidir ki $T = 1$ olduğu duruma karşı düşen model nominal modeldir ve daha önce [3-4,7] kaynaklarında ele alınmıştır. Şekil 2'de parametrelerin sıcaklıktan nasıl etkilendikleri gösterilmektedir.



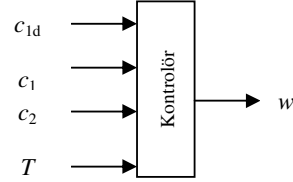
Şekil 2: Sıcaklığın parametreler üzerindeki etkisi.

Bir işletim çevrimi esnasında sıcaklığın 0.3 ile 1.7 arasında değişebileceği, durum değişkenleri ve kontrol girdisinin ise (6) ile verilen koşulları sağlaması gerektiği vurgulanmalıdır.

$$\begin{aligned} 0 < c_1, c_2 < 1 \\ 0 < w < 4 \end{aligned} \quad (6)$$

Nominal modelin kararlı durumlarından birisi $c_1 = 0.1207$, $c_2 = 0.8801$ ve $w = 0.7500$, olarak tanımlanmaktadır. Ungar bu sistemin diğer denge durumları ve bunların kararlılık

özelliklerini detaylı olarak vermektedir. Bu çalışmada, sistemin yukarıda verilen denge durumu etrafında, değişen sıcaklık koşulları altında kontrolü ele alınmaktadır. Şekil 3'te kontrolör ve sistem giriş ve çıkış değişkenleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere kontrolör çıktısı debidir ve amaç, arzu edilen hücre miktarını sürdürecektir debinin saptanmasıdır.



Şekil 3: Kontrolör ve sistem giriş-çıkışları.

3. Model Dayanaklı Kontrol, [3]

Biyoreaktör kontrol problemi için daha önce önerilen kontrol kuralı (7) ile verilmektedir.

$$w = \frac{f + c_1 - c_{1d}}{c_1}, \quad f = c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma_n} \quad (7)$$

Bu kuralda istenen hücre düzeyi c_{1d} ile gösterilmektedir ve nominal sistem için kapalı çevrimde (8)-(9) denklemleri ile ifade edilir. Bu sistemin istenen hücre düzeyini sürdürürken kararlı bir besin gelişimi gösterdiği [3] kaynağında bulunabilir.

$$\dot{c}_1 = -c_1 + c_{1d} \quad (8)$$

$$\dot{c}_2 = -c_2 \frac{f + c_1 - c_{1d}}{c_1} + f \frac{1 + \beta_n}{1 + \beta_n - c_2} \quad (9)$$

(7) ifadesiyle verilen kontrol kuralı, (3)-(4) ile verilen ve sıcaklık değişimlerinden etkilenen sistem dinamiğinde yerine yazılırsa (10)-(11) ile verilen ifadelere ulaşılacaktır.

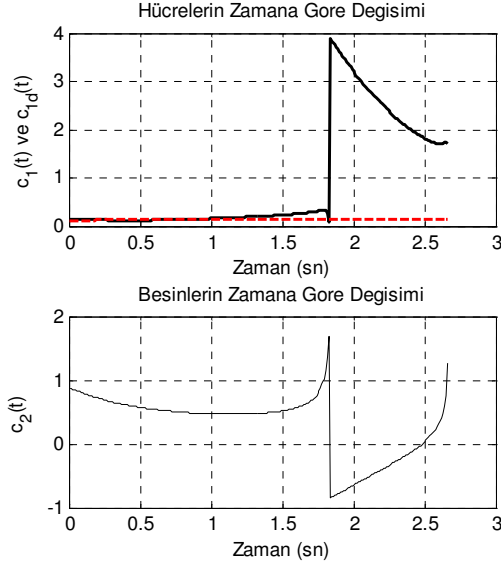
$$\dot{c}_1 = -c_1 + c_{1d} - c_1 (1 - c_2) \left(e^{c_2 / \gamma_n} - e^{c_2 / \gamma(T)} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{c}_2 = -c_2 \frac{c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma_n} + c_1 - c_{1d}}{c_1} + \\ c_1 (1 - c_2) e^{c_2 / \gamma(T)} \frac{1 + \beta(T)}{1 + \beta(T) - c_2} \end{aligned} \quad (11)$$

Nominal sistem modeline bakılarak belirlenen ve (7) ile verilen kontrol kuralı, kapalı çevrimde Şekil 4'te gösterilen kararsız sonucu üretmektedir.

Şekle göre hücre düzeyi hızla artmakta ve (6) ile verilen kısıtlar ihlal edilmekte ve herhangi bir yaklaşıma gözlemlenememektedir. Bu netice, mevcut bildirideki çalışmanın temel motivasyonunu teşkil etmektedir. Biyoreaktör sisteminin çıkışları (durum değişkenleri) ve sistem girdileri ölçülebilmektedir ve bu ölçümlerin

kullanımıyla sıcaklık değişimlerine karşı gürbüz bir kontrolör tasarlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 4: Model dayanaklı kontrol tekniği için elde edilen sonuçlar.

4. Nörokontrolör Tasarımı

Yapay Sinir Ağlarının² (YSA) karmaşık eşleştirmeleri başarıyla gerçekleştirebildikleri artık iyi bilinen bir gerçektir. Beynin bağlaşım yapısının taklidi gayretleriyle geliştirilen birçok sinir ağı yapısı bugün gerek imge ve video işlemede, gerek finans uygulamalarında, gerekse biyomedikal mühendisliğinde başarıyla uygulanmaktadır. Sistem ve kontrol mühendisliği pratiği de YSA yapılarının bu etkinliğinden birçok problemde başarıyla yararlanmıştır, [8-10].

Burada ele alınan problem için kontrolör tasarımının ilk adımı eğitim verileri kümesini oluşturmaktır. Bu maksatla gerçek sistemden veri toplama işlemini simüle etmek için (3)-(4) denklemleri $\Delta = 0.01$ saniye aralığında ayrıştırılmış ve (6) ifadesindeki koşulları sağlayan başlangıç değerleri için sistemin bir sonraki cevabı hesaplanmıştır. Mevcut durum, girdi ve sıcaklık değerlerinin neden olduğu yeni değerler türeve birinci dereceden Euler yaklaşımı ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$c_1(k+1) = c_1(k) + \Delta(-c_1(k)w(k) + c_1(k)(1-c_2(k))e^{c_2(k)/\gamma(T(k))}) \quad (12)$$

$$c_2(k+1) = c_2(k) + \Delta(-c_2(k)w(k) + c_1(k) \times (1-c_2(k))e^{c_2(k)/\gamma(T(k))} \frac{1+\beta(T(k))}{1+\beta(T(k))-c_2(k)}) \quad (13)$$

$c_1(k+1)$ değeri $c_1(t)$ değişkeninin $t = (k+1)\Delta$ saniye anındaki değerini gösterir. Bu ifadelerin rastgele seçilen 1000 adet farklı başlangıç koşulu için çalıştırılması ile eğitim verileri kümesi elde edilmiştir. Bu durum (14) ifadesinde verilmiştir.

$$\begin{pmatrix} c_1(k) \\ c_2(k) \\ w(k) \\ T(k) \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{Ayrık} \\ \text{Sistem} \\ \text{Dinamiği} \\ (12)-(13) \end{matrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} c_1(k+1) \\ c_2(k+1) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Yukarıdaki ifade şöyle okunmalıdır. Durum değişkenleri, giriş debisi ve sıcaklık biliniyorsa durum değişkenlerinin bir sonraki değeri hesaplanabilir. Sistem dinamiği k anındaki durumu $k+1$ anındaki duruma taşıyan eşleştirmedir. Aynı verileri bir nörokontrolör tasarımında kullanabilmek için (15) ifadesindeki eşleştirmeyi ele alalım.

$$\begin{pmatrix} c_1(k+1) \\ c_1(k) \\ c_2(k) \\ T(k) \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{Nöro} \\ \text{Kontrolör} \end{matrix} \Rightarrow w(k) \quad (15)$$

Bu ifadede nörokontrolör, k anındaki durum bilgisini $k+1$ anı için verilen bir değere eşleştirecek w değerini üretecektir. Besin miktarının hücre miktarını karşılayacak seviyede olması yeterlidir ve besinlerin sınırlı gelişmesi istenmektedir. Bu nedenle kontrolöre sadece hücre miktarının istenen değeri uygulanmaktadır. Bu ifadelere göre Şekil 3'te verilen nörokontrolör elde edilecektir. Kontrolör, şekilde de görüldüğü üzere 4 girişli bir çıkışlı bir YSA'dan ibarettir.

Nörokontrolör 4-10-1 yapısındadır ve gizli katmanda hiperbolik tanjant tipinde aktivasyon fonksiyonları, çıkış katmanında ise lineer nöronlar vardır. Nörokontrolör parametreleri Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasıyla uyarlanmıştır.

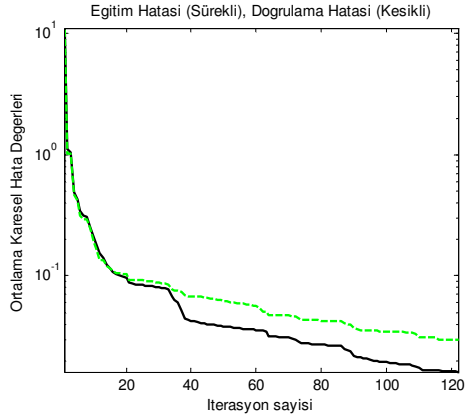
Levenberg-Marquardt tekniği, eğitim düşümü³ yöntemiyle Newton yöntemi arasında bir denge algoritmasıdır, [11], ve bu algoritmayla parametre güncelleme kuralı (16) denkleminde verilmiştir.

$$\phi \leftarrow \phi + (\mu I + J^T J)^{-1} J^T e \quad (16)$$

Burada ϕ uyarlanacak parametre vektörünü, J , Jakobiyen matrisini, e de çıkış hataları vektörünü simgeler. Ezberlemeye engel olmak maksadıyla eğitim verilerinin dışında 400 adet doğrulama verisi üretilmiş ve nörokontrolör eğitimi Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Eğitim esnasında Şekil 5'te gösterilen ortalama karesel hatalar gözlemlenmiştir. Şekilde eğitim verileri için gözlenen eğri sürekli, doğrulama verileri için gözlenen eğri ise kesikli çizgilerle çizilmiştir. 121. adımda eğitim, doğrulama hatasının artma eğilimi göstermesi dolayısıyla durmuş ve nörokontrolör parametreleri kaydedilmiştir.

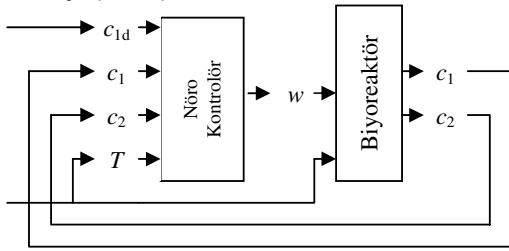
² İng. *Artificial Neural Networks*

³ İng. *Gradient Descent*



Şekil 5: Eğitim ve doğrulama hatalarının değişimi

Elde edilen nörokontrolörün kapalı çevrimde kullanımı Şekil 6’da gösterilmiştir. Bu blok diyagrama göre istenen hücre düzeyinin sürekli olduğu ve ani değişiklikler sergilediği durumları incelemek üzere iki farklı benzetim çalışması yürütülmüştür. Her iki çalışmada da biyoreaktör kararlı durum etrafında çalıştırılmıştır.

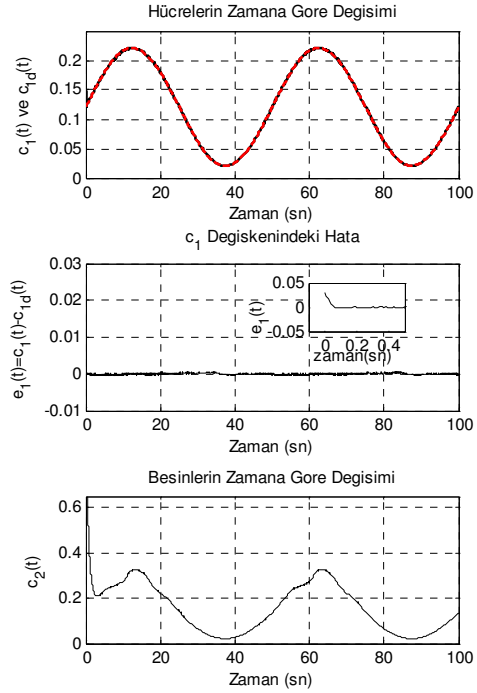


Şekil 6: Geribeslemeli çevrim blok diyagramı.

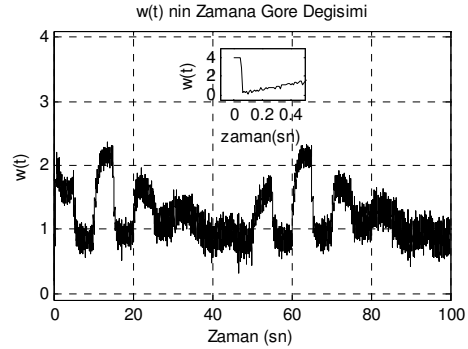
İlk denemelerde sıcaklığın ani değişiklikler gösterdiği çalışma koşulları denenmiş, başarılı sonuçlar alınmış ancak bu duruma dair sonuçlar sıcaklığın ani değişiklikler gösteremeyeceği dolayısıyla burada sunulmamıştır. Bu çalışmada sıcaklık değişkeni fiziksel gerçekliğe yakın olması için birinci dereceden bir sistem üzerinden elde edilmiş ve izin verilen sınırlar içerisindeki değişimleri göz önüne alınmıştır.

İlk deneyde $c_{1d}(t) = 0.1207 + 0.1 \sin(2\pi t/50)$ şeklinde seçilen referans sinyali için Şekil 7’de en üstte verilen netice elde edilmiştir. Açıkça görülmektedir ki sistem çıkışı istenen hücre miktarını yakından takip etmektedir. Bu iki eğrinin arasındaki fark aynı şeklin ikinci alt şeklinde gösterilmiştir. Hatanın sıfıra çok yakın olması ve pencere grafikte de görüldüğü üzere başlangıçtaki geçici rejimin hızla yakınsaması bu tipte bir referans sinyali için nörokontrolörün yeterince iyi performans sergilediği, en alt şekilde de görüldüğü üzere besin gelişiminde herhangi bir kararsızlığa mahal vermediği gözlemlenmektedir.

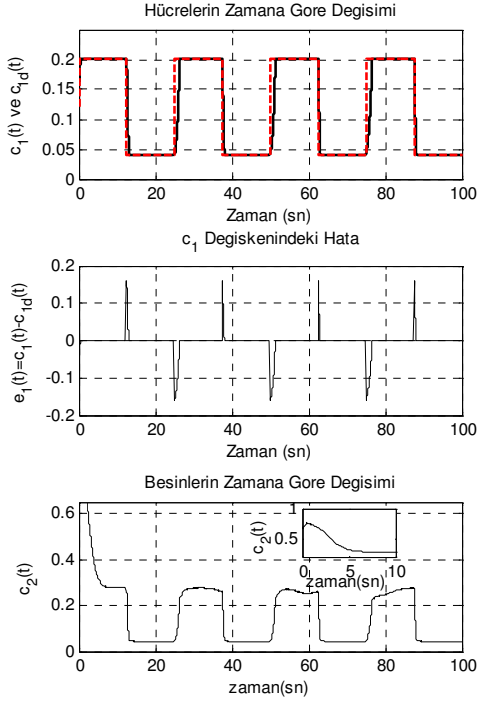
Sistemin beklenen düzeydeki hücre miktarında kalması için gerekli olan debinin (kontrol sinyali, w) zamana bağlı değişimi ise Şekil 8’de görülmektedir. Debinin; sıcaklık, besin ve hücre değişimlerine karşı çok hızlı cevap verdiği, bunun gözlem gürültüsünden kaynaklandığı fiziksel uygulanabilirlik açısından bir dezavantaj teşkil ettiği de vurgulanmalıdır.



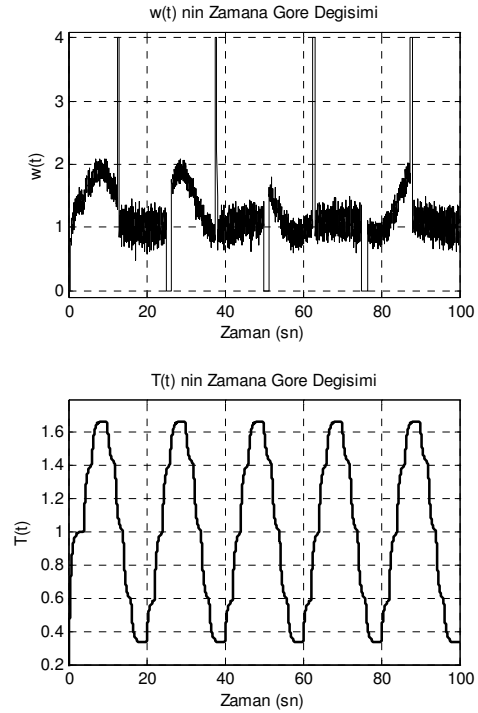
Şekil 7: Sinüzoidal referans sinyali için elde edilen sonuçlar: durum değişkenleri ve izleme hatası.



Şekil 8: Sinüzoidal referans sinyali için elde edilen kontrol sinyali ve sıcaklığın zamanla değişimi.



Şekil 9: Basamak biçimli referans sinyali için elde edilen sonuçlar: durum değişkenleri ve izleme hatası.



Şekil 10: Basamak biçimli referans sinyali için elde edilen kontrol sinyali ve sıcaklığın zamanla değişimi.

Benzetimlerin ikinci kısmında hızlı geçişli bir referans sinyali kullanılmış ve Şekil 9'da üstte verilen hücre gelişimi cevabı elde edilmiştir. Bu duruma ait referans sinyali $c_{1d}(t) = 0.1207 + 0.08 \text{sgn}(\sin(2\pi t/25))$ ile verilmektedir ve ana amaç, kontrol sisteminin basamak gibi şok değişimlere karşı kararlılığını ve performansını koruyabildiğini görmektir. Aynı şeklin altında izleme hatası gösterilmekte ve geçiş anlarındaki yakınsaklık daha açık görülebilmektedir. En alt grafik ise besin miktarının sınırlı gelişim gösterdiğini ve başlangıç anında gerçekleşen geçici rejimin de yakınsak olduğunu ifade etmektedir.

Şekil 10'da ise bu duruma dair üretilen kontrol sinyali ve sıcaklığın zamana göre değişimi gösterilmiştir. Kontrol sinyali gözlem gürültüsünden dolayı hızlı değişimler içermekte ve istenen limitler içerisinde kalmaktadır. $T(t)$ değişkeninin frekansı bilinçli olarak referans girdisinin frekansından farklı bir değere atanmış, böylelikle nörokontrolörün mümkün olduğunca farklı rejimlerde sağladığı izleme performansını göstermek mümkün olmuştur.

Çalışma koşullarını çeşitlendirmek mümkündür ancak elde edilen sonuçlar, nümerik verilerle elde edilen YSA tabanlı bir kontrolörün nominal modelden sapmalar meydana geldiğinde nonlineer kontrolörün (Bkz (7)) sürdürmediği hücre düzeyini, performans ve kararlılık ölçütlerini zorlamadan sağlayabildiği gözlemlenmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada literatürde daha önce ele alınmış bir biyokimyasal sürecin geribeslemeli kontrolü üzerinde durulmaktadır. Süreç iki adet nonlineer diferansiyel denklem ile ifade edilmektedir ve iki adet durum değişkeni vardır. Buna rağmen oldukça zengin bir dinamik davranış zenginliği sergileyen biyoreaktör sistemi, bir denektaş problemi olarak takdim edilmiş ve araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Yapay sinir ağları birçok alanda başarılı neticeler rapor eden uygulamalarla ismini duyurmuş, hassas yaklaştırma, çok parametrelili ve karmaşık veri kümelerindeki gizli ilişkileri ortaya çıkarabilme ve basit yapısal özellikleri dolayısıyla araştırmacıların zaman hasrettiği bir yaklaşım olmuştur. Bu çalışmada, biyoreaktör sisteminin sıcaklıkla etkilendiği durum ele alınmış ve daha önce önerilen nonlineer kontrol kuralının başarılı sonuçlar vermediği gösterilmiştir. Bu motivasyonla gerçek sisteme tekabül ettiği düşünülen ve parametreleri değişkenlik gösteren sistemden nümerik veriler toplanmış ve iki farklı referans sinyali için sistem performansı incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre sunulan çalışmanın olumlu yönleri şöyle özetlenebilir:

- Nörokontrolör çok küçük izleme hataları ile istenen hücre düzeyinin sürdürülebilmesini mümkün kılmaktadır.
- Referans sinyalindeki ani değişimleri hızla bertaraf edilebilmektedir.
- Nörokontrolör eğitiminin hızlı yapılabilmesi prototipleme anlamında olumlu bir neticedir.
- Reaksiyon tankı içerisindeki besin miktarı istenen sınırlar içerisinde gelişim göstermektedir.
- Kontrol sinyali istenen sınırlar içerisinde gelişim göstermektedir.

Aynı sonuçlara göre sunulan çalışmanın olumsuz yönleri ise şunlardır:

- Kapalı çevrim sisteminin kararlılık analizi nörokontrolörün getirdiği nonlineer etkinin karmaşık olmasından dolayı yapılamamaktadır
- Üretilen kontrol sinyalleri gürültüden olumsuz etkilenmektedir bu nedenle kontrol sinyalinde hızlı değişimler gözlenmekte, uygulamada bu değişimleri sağlayabilecek hızlı eyleyici ihtiyacını doğurmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ETÜ - BAP 2006 / 04 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] B.W. Bequette, "Process Control," Prentice Hall, 2002.
- [2] J.-S.R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing, PTR Prentice-Hall, 1997.
- [3] M.Ö. Efe, E. Abadoğlu, O. Kaynak, "A Novel Analysis and Design of a Neural Network Assisted Nonlinear Controller for a Bioreactor," Int. Journal of Robust and Nonlinear Control, v.9, no.11, pp.799-815, 1999.
- [4] G.V. Puskorius, L.A. Feldkamp, "Neurocontrol of Nonlinear Dynamical Systems with Kalman Filter Trained Recurrent Networks," IEEE Trans. on Neural Networks, v.5, n.2, pp.279-297, 1994.
- [5] D.D. Brengel, W.D. Seider, "Multistep Nonlinear Predictive Controller," Ind. Eng. Chem. Res., v.28, pp.1812-1822, 1989.
- [6] C.W. Anderson, W.T. Miller III, "Challenging Control Problems," Neural Networks for Control, W.T. Miller III, R. S. Sutton, P. J. Werbos, Eds, MIT Press, pp.475-510, 1990.
- [7] L.H. Ungar, "A Bioreactor Benchmark for Adaptive-Network Based Process Control," Neural Networks for Control, W.T. Miller III, R. S. Sutton, P.J. Werbos, Eds, MIT Press, pp.387-402 1990.
- [8] Y.H. Hu, J.-N. Hwang, Eds. "Handbook of Neural Network Signal Processing," CRC Press, 2001.
- [9] P.J.G. Lisboa, E.C. Ifeachor, P.S. Szczepaniak (Eds.) "Artificial Neural Networks in Biomedicine," Springer, 2000.
- [10] F.N Chowdhury, P. Wahi, R. Raina, S. Kaminedil "A Survey of Neural Networks Applications in Automatic Control," Southeastern, 2001. Proc. of the 33rd Symposium on System Theory, 18-20 March, pp. 349-353, 2001.
- [11] M.T. Hagan, M.B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm", IEEE Trans. on Neural Networks, v.5, n.6, pp. 989-993, 1994.