

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ENDÜSTRİYEL EKMEK MAYASI FERMENTASYONUNDA ÖZGÜL ÜREME HIZI VE BİYOKÜTLE KESTİRİMİ

Cihan KARAKUZU¹, Mehmet YAKUT¹, Mustafa TÜRKER²
Sıtkı ÖZTÜRK¹,

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve
Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/ İzmit,

²Pakmaya, PO. Box 149, 41001, Kocaeli/ İzmit

ÖZET

Endüstriyel fermantasyon süreçlerinin kontrolü ve optimizasyonu özellikle biyokütle ve kullanılmamış hammadde gibi anahtar süreç değişkenlerinin ölçümü için on-line ölçüm yapan enstrümanların olmayışı sebebiyle sınırlıdır. Bu değişkenlerin ölçümü sadece çevrimdışı (off-line) süreçten alınan örneklerle yapılan laboratuvar analizi ile yapılabilmektedir. Bu çalışma, proses modeli ve üretim ortamından alınan ölçümlere dayalı olarak, maya derişimi (Cx) ve özgül üreme hızı (μ) değişkenleri için birer yapay sinir ağı (YSA) kestirimci sunmaktadır. Verilen sonuçlar, YSA yazılım-sensörlerin üretim ortamında biyokütle derişimi ve özgül üreme hızını başarılı bir şekilde kestirdiğini göstermektedir. Böylece bu değişkenlerin gözlenmesi ve etkin on-line kontrol yapısı kurulumu mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: YSA, Biyokütle Kestirimi, Ekmek Mayası,
Fermantasyon

BIOMASS AND SPECIFIC GROWTH RATE ESTIMATION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN INDUSTRIAL BAKER'S YEAST FERMENTATION

ABSTRACT

Control and optimisation of fermentation process are limited cause of unavailability of on-line measurement sensors for state variable such

as biomass and unutilised substrate. During a fermentation process, these variables are only measured by off-line laboratory analysis. This study presents artificial neural network (ANN) estimators for each one of biomass concentration and specific growth rate variables, based on process model and measurements from real production media. The given results show that the ANN soft-sensors could successfully estimate biomass concentration and specific growth rate in real production media. Hence, observation of these variables and installing effective on-line control structure will be possible.

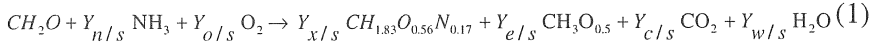
Keywords: Neural Networks, Estimation of Biomass, Baker's Yeast, Fermentation

1. GİRİŞ

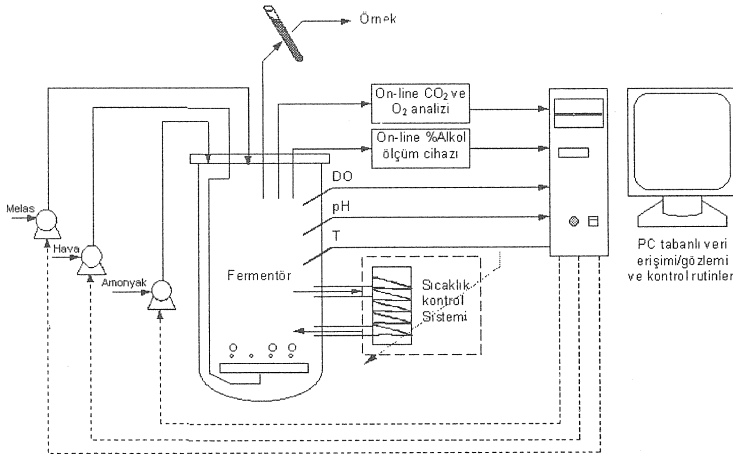
Ekmek mayası fermantasyonunda biyokütle ve glikoz konsantrasyonları gibi önemli değişkenlerin on-line ölçümü mümkün değildir. Bu değişkenlerin ölçümü off-line olarak yapılabilir, fakat bu ölçümler uzun zaman almaktadır. Biyokütle konsantrasyonunun on-line ölçülebilmesi sebebiyle, bu değişkenle doğrudan ilintili özgül üreme hızı (μ) değişkeninin de on-line ölçümü mümkün olmamaktadır. Bu temel sorununun üstesinden gelebilmek için on-line ölçülemeyen anahtar durum değişkenlerinin kestirimi üzerindeki çalışmalar 1990'lardan bu yana devam etmektedir. Literatürde, bu amaçla yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı olarak yapılmış çalışmalar mevcuttur [1,2,3]. Bu anlamda son on yıl içinde YSA biyoteknolojide kendine saygın bir yer edinmiştir. YSA'nın modellenen proses hakkında detaylı ön bilgi gerektirmeksizin, karmaşık bağıntıları öğrenebilme yeteneği bu alandaki kullanımının temel sebebidir. Fermantasyonun verimliliğinin artırılması için etkin kontrol stratejileri geliştirmek gerekir. Bu da temel durum değişkenlerinin uygun sıklıkla ölçülebilir olması ile mümkündür. Bu makalede verilecek çalışmaların temel dayanağı budur.

2. ENDÜSTRİYEL ÜRETİM PROSESİNİN TANITIMI

Fermantasyon, istenen bir ürünün oluşması için kontrollü koşullar altında mikro-organizmaların yetiştirilmesi sürecidir. Ekmek mayası "*Saccharomyces cerevisiae*" mikro-organizmanın melas hammaddesi ile üremesi sağlanarak üretilir. Mikro-organizmanın temel besin kaynağı melas içindeki sükrözdür. Maya hücresinin enerji üretim, bakım ve biyokütle dönüşüm reaksiyonlarını makroskopik olarak (1) eşitliğindeki net bir reaksiyonla ifade edebiliriz.



Eşitlikte CH_2O , $CH_{1.83}O_{0.56}N_{0.17}$ ve $CH_3O_{0.5}$ sırasıyla C-mol cinsinden glikoz, maya ve etanoldür. Y_{ij} 'lere stokiyometrik katsayılar denir ve i. bileşiğin j. bileşikten oluşma oranı olarak da ifade edilebilir. Endüstriyel üretimde yarı kesikli (fed-batch) tip fermantasyon kullanılır. Bu tip fermantasyonda biyoreaktöre fermantasyon boyunca bir veya bir kaç besin hammaddesi sürekli olarak ve zamanla artan bir oranda verilir [4]. Buna karşılık ürün ise fermantasyonun sonunda reaktörden alınır. Yarı kesikli tip fermantasyonda fermantasyon zamanı 15-20 saattir. Endüstriyel ekmek mayası üretim sisteminin blok yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ekmek mayası üretim sisteminin blok yapısı.

Sistemin girişleri melas besleme hızı, amonyak besleme hızı ve hava giriş hızıdır. Sistemin ölçülebilen çıkışları ise alkol, oksijen, karbondioksit ve çözülmüş oksijenin ortamdaki yüzde olarak oranlarıdır. Sistemde maya konsantrasyonu (C_x) ve glikoz konsantrasyonu (C_s) on-line ölçülemeyen durum değişkenleridir.

3. PROSES MODELİ

Bu bölümde verilecek model, reaktör ve hücre modelini içerecektir. Verilen model reaktördeki sıvının homojenliğini sağlayacak bir şekilde karıştırıldığı, asit-baz dengesinin (pH) ve sıcaklığının sabit tutulduğu varsayımlarına dayalıdır.

3.1 Maya Hücresi Modeli (Kinetik Model)

Bu çalışmada kullanılan maya hücresi davranışını tanımlayan kinetik model Sonnleitner ve Kappeli tarafından [5]'de kesikli (batch) kültür için tanımlanan ve yapılan deneylerle belli parametreler için iyi sonuç verdiği gösterilmiş modelin (2) ve (3) eşitliklerinin son terimleri ile güncellenmiş halidir. Bu güncellemeler [6]'daki çalışmalardan esinlenerek yapılmıştır. Güncellenmiş bu kinetik model Tablo 1'de (2)-(13) eşitliklerinde verilmiştir. Bu terimlerin eklenmesi ortamdaki özgül oksijen tüketim hızı (q_o) ve etanol konsantrasyonu (C_e) değişimlerinin endüstriyel fermentörden alınan verilere uyumu sağlanmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4'e Bknz.).

Tablo 1. Ekmek mayasının metabolizmasını tanımlayan kinetik model.

$$q_s = q_{s,max} \frac{C_s}{K_s + C_s} (1 - e^{-t/td}) \quad (2)$$

$$q_{o,lim} = q_{o,max} \frac{C_o}{K_o + C_o} \frac{K_i}{K_i + C_e} \quad (3)$$

$$q_{s,lim} = \frac{\mu_{cr}}{Y_{x/s}^{ox}} \quad (4)$$

$$q_{s,ox} = \min \left(q_s, q_o / Y_{o/s} \right) \quad (5)$$

$$q_{s,red} = q_s - q_{s,ox} \quad (6)$$

$$q_{e,up} = q_{e,max} \frac{C_e}{K_e + C_e} \frac{K_i}{K_i + C_s} \quad (7)$$

$$q_{e,ox} = \min \left(q_{e,up}, (q_{o,lim} - Y_{o/s}^{ox}) Y_{o/e} \right) \quad (8)$$

$$q_{e,pr} = Y_{e/s} q_{s,red} \quad (9)$$

$$\mu = Y_{x/s}^{ox} \cdot q_{s,ox} + Y_{x/s}^{red} \cdot q_{s,red} + Y_{x/e}^{ox} \cdot q_{e,ox} \quad (10)$$

$$q_c = Y_{c/s}^{ox} \cdot q_{s,ox} + Y_{c/s}^{red} \cdot q_{s,red} + Y_{c/e}^{ox} \cdot q_{e,ox} \quad (11)$$

$$q_o = Y_{o/s}^{ox} \cdot q_{s,ox} + Y_{o/e}^{ox} \cdot q_{e,ox} \quad (12)$$

$$RQ = \frac{q_c}{q_o} \quad (13)$$

3.2 Reaktör Modeli (Dinamik Model)

Reaktör modeli; dinamik olarak ilk koşullar ve manipüle edilen değişkenler tarafından yönlendirilen reaktörün sıvı ve gaz fazındaki ana bileşiklerin konsantrasyonlarını ve mayanın biyolojik reaksiyonlarını tanımlar. Basit olması açısından hem sıvı hem de gaz fazının ideal bir şekilde karıştırıldığı varsayılır. Bu sebeple, model adi diferansiyel eşitlikleri içerir. Bu çalışma çerçevesinde prosesin sıvı fazı ile ilgilenildiği için bu bölümde sadece sıvı fazı modeli verilecektir.

Maya konsantrasyonu C_x , şeker (glikoz) konsantrasyonu C_s , etanol konsantrasyonu C_e , çözülmüş oksijen konsantrasyonu C_o ve sıvı hacmi V ana durum değişkenleri olmak üzere sıvı fazı modeli basit kütle dengelerinden çıkarılır. Yarı-kesikli (fed-batch) reaktör için dinamik model (14)-(18)'de verildiği gibi yazılabilir. Modelden de görüleceği üzere dinamikleri kinetik model değişkenleri belirlemektedir. Sistem modeli bir bütün olarak düşünüldüğünde, sistemin karmaşıklığı görülebilir.

$$\frac{dC_x}{dt} = \mu.C_x - \frac{F}{V}C_x \quad (14)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = -\left(\frac{\mu}{Y_{x/s}^{ox}} + \frac{q_{e,pr}}{Y_{e/s}} + q_m\right)C_x + \frac{F}{V}(S_o - C_s) \quad (15)$$

$$\frac{dC_e}{dt} = (q_{e,pr} - q_{e,ox}).C_x - \frac{F}{V}C_e \quad (16)$$

$$\frac{dC_o}{dt} = -q_o.C_x - \frac{F}{V}C_o + k_{OL}a(C_o^* - C_o) \quad (17)$$

$$\frac{dV}{dt} = F \quad (18)$$

3.3 Modelin Üretim Ortamından Alınan Ölçümlerle Kıyaslaması

Yukarıda tanımlanan modeller bilgisayar benzetimi için Matlab 6.0 Simulink'de oluşturulmuştur. Bu yazılım kullanılarak bulunan benzetim sonuçları, endüstriyel üretim için kullanılan büyük boyutlu ($100m^3$) bir bubble kolon reaktörden alınan verilerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Benzetimde kullanılan ilk koşullar endüstriyel reaktörde geçerli ilk koşullardır. Benzetimde kullanılan melas beslemesi de endüstriyel reaktörde geçerli melas beslemesi ile uyumludur. Benzetimde kullanılan parametrelerin tümü Tablo 2'de verilmiştir. Benzetim sonuçları kıyaslamalı olarak Şekil 2-Şekil 4'de verilmiştir.

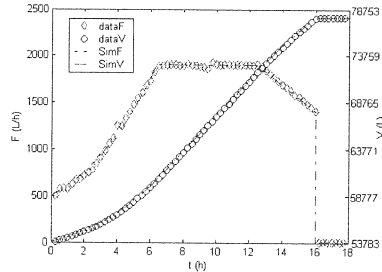
Tablo 2. Endüstriyel boyutlu reaktörden alınan veri ile kıyaslamalı benzetimde kullanılan parametreler.

Parametre	Simge	Değer
Kritik büyüme oranı	μ_c	^a 0.21 h ⁻¹
Bakım enerjisi	M	^a 0.03 gr-glikoz/gr-biyokütle h
Etanol doygunluk sabiti	Ke	^a 0.10 gr-etanol/L
Oksijen doygunluk sabiti	Ko	^a 9.6e-5 gr-oksijen/L
Etanol indirgeme sabiti	Ki	^b 2.516gr-etanol/L
Glikoz doygunluk sabiti	Ks	^a 0.612 gr-glikoz/L
Max etanol tüketim/üretim oranı	q _{c,max}	^a 0.238 gr-etanol/gr-maya h
Max oksijen tüketim oranı	q _{o,max}	^a 0.255 gr-etanol/gr-maya h
Max glikoz tüketim oranı	q _{s,max}	^a 2.943 gr-glikoz/gr-maya h
	Y _{x/s} ^{ox}	^b 0.585 gr-maya/gr-glikoz
	Y _{x/s} ^{red}	^a 0.050 gr-maya/gr-glikoz
	Y _{o/s}	^a 0.3857 gr-oksijen/gr-glikoz
	Y _{o/e}	^a 0.8896 gr-oksijen/gr-etanol
Ürün katsayıları	Y _{e/o}	^a 1.1236 gr-etanol/gr-oksijen
	Y _{e/s}	^a 10.4859 gr-etanol/gr-glikoz
	Y _{x/e}	^a 0.7187 gr-maya/gr-etanol
	Y _{e/s} ^{ox}	^a 0.5744 gr-CO ₂ /gr-glikoz
	Y _{e/s} ^{red}	^a 0.462 gr-CO ₂ /gr-glikoz
	Y _{e/e}	^a 0.645 gr-CO ₂ /gr-etanol
Zaman gecikmesi	Td	^b 2 h
Melasdaki şeker derişimi	So	^b 325 gr-glikoz/L
Optimal oksijen derişimi	Co*	^b 6 mgr-oksijen/L
Oksijen kütle transfer katsayısı	k _{OLa}	^b 700 h ⁻¹

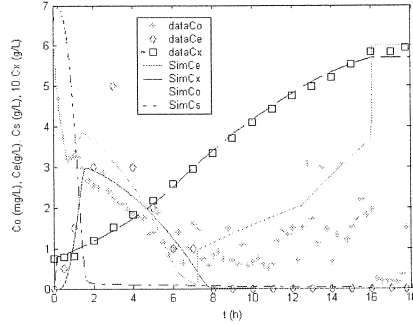
^a parametreler Sonnleitner B. & O. Kappeli, (1986)'den alınmıştır.

^b bu çalışma için bu değerler kullanılmıştır.

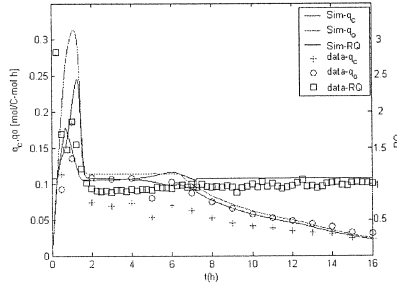
Aşağıda verilen sonuçlara bakıldığında, verilen modelin gerçek üretim ortamını temsil ettiği kabul edilebilir. Bu sebeple, aşağıda verilecek model tabanlı çalışmalarda bu model kullanılmıştır.



Şekil 2. Endüstriyel üretim için kullanılan büyük boyutlu bir reaktörden alınan verilerle karşılaştırmalı hammadde besleme hızı (F) ve hacmin (V) değişimi.



Şekil 3. Endüstriyel üretim için kullanılan büyük boyutlu bir reaktörden alınan verilerle karşılaştırmalı olarak biyokütle (Cx), şeker (Cs), etanol (Ce), çözülmüş oksijen (Co) konsantrasyonlarının değişimleri.



Şekil 4. Endüstriyel üretim için kullanılan büyük boyutlu bir reaktörden alınan verilerle karşılaştırmalı olarak özgül CO₂ üretim hızı (q_c), özgül O₂ tüketim hızı (q_o) ve solunum oranı (RQ)'nın değişimleri.

4. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KESTİRİM

Bu bölümde, yarı-kesikli ekmek mayası fermentasyonu prosesinin on-line kontrolünde geri besleme bilgisi için gerekli olan özgül üreme hızı ve biyokütle konsantrasyonunun, on-line ölçülebilen değişkenlerden YSA ile kestirimi ile ilgili yapılan çalışmalar verilecektir. Bu bağlamda konu iki ana çerçevede ele alınmıştır: Model tabanlı YSA ile kestirim ve gerçek üretim ortamından alınan ölçümlere dayalı olarak geliştirilen YSA kestirimcisi.

4.1 Model Tabanlı Kestirim

Yukarıda kısaca özetlendiği üzere; sistemde on-line ölçülemeyen durum değişkenleri glikoz (Cs) ve biyokütle (Cx) konsantrasyonlarıdır. Fermentasyon boyunca maya konsantrasyonunun değişimini belirleyen özgül üreme hızı (μ) kinetik değişkeni de maya konsantrasyonu on-line

ölçülemediği için sürekli gözlenemeyen diğer önemli bir değişkendir. Bölüm 3’de (14)-(18) eşitlikleri ile verilen reaktör modelinden de görüleceği üzere on-line ölçülemeyen C_x durum değişkeni için kütle denklemleri aşağıda verildiği gibidir.

$$\frac{dC_x}{dt} = \mu \cdot C_x - \frac{F}{V} C_x \quad (19)$$

Bu kütle denklemlerinden önce biyokütle için (19)’dan (20)’de verilen kestirim elde edilebilir.

$$\hat{C}_x(t) = \int_{\tau=0}^t \left(\mu - \frac{F}{V} \right) C_x(\tau) d\tau + C_x(0) \quad (20)$$

Eşitlikte $C_x(0)$ fermantasyon başlangıç anındaki biyokütle konsantrasyonudur. Melas besleme hızı (F) ve hacim (V) sistemde on-line ölçülebilen değişkenler olduklarına göre; özgül üreme hızının (μ) değeri on-line ölçülebilen değişkenler cinsinden kestiren bir YSA ile belirlenebilirse, (20) eşitliğinden biyokütle (maya) konsantrasyonunu kestirilebilir. Eşitlik (20), ayrık zamanda Euler yaklaşımına göre eşitlik (21) ile ifade edilebilir.

$$\hat{C}_x(k) = \hat{C}_x(k-1) + T_s \left[\mu(k) - \frac{F(k)}{V(k)} \right] \cdot \hat{C}_x(k-1) \quad (21)$$

Eşitlikte T_s örnekleme zamanını, $\hat{C}_x(k-1)$ C-mol cinsinden $(k-1)T_s$ anında maya konsantrasyonu kestirimini gösterir. Bu yaklaşım ile kestirim başarısının, μ değişkeninin ölçülebilen değişkenler cinsinden YSA ile yapılacak kestirim başarısına sıkı sıkıya bağlı olduğu açıktır.

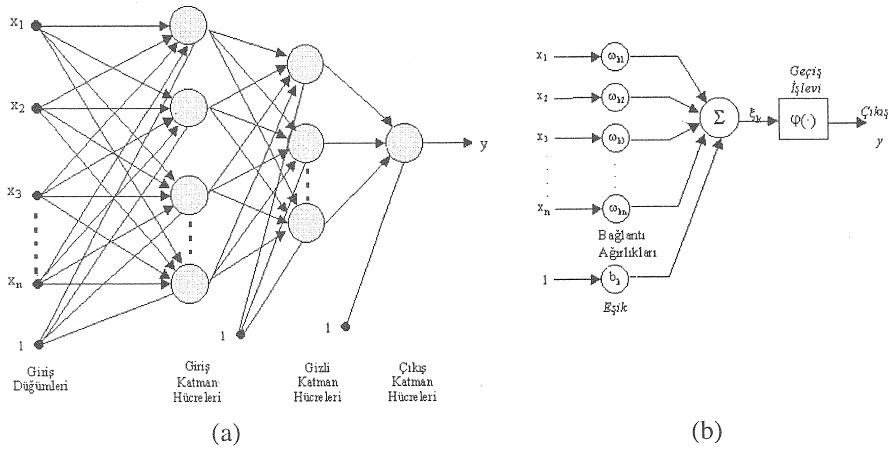
4.1.1 YSA ile Özgül Üreme Hızı Kestirimi

Bu bölümde, Bölüm 4.1’de açıklanan mantık gereği özgül üreme hızının bir YSA ile sistemde on-line ölçülebilen değişkenler cinsinden kestirimi anlatılmıştır. Bilindiği üzere YSA ile modellemede, model giriş ve çıkış uzayında mümkün olduğunca homojen bir şekilde yayılmış YSA eğitim giriş/çıkış örnekleri kullanılmalıdır. Aksi durumda eğitilen YSA, eğitimde hiç örnek alınmamış bölgeler için beklenmedik çıkışlar verebilir. Endüstriyel üretimde hammadde girişleri için önceden belirli besleme profilleri kullanıldığından, bu sistemden YSA giriş ve çıkış uzaylarının her alanını temsil eden eğitim giriş ve çıkış çiftleri almak mümkün olmamıştır. Bu

işlemi endüstriyel üretim ortamında gerçekleştirmek için, hammadde besleme hızları değiştirilerek olası tüm durumların oluşturulması gerekir. Fakat bu işlemin gerçekleşmesi $100m^3$ hacimli bir reaktör için hem çok masraf hem de çok uzun zaman gerektirir. Ayrıca işletmenin bunu kabul etmesi de gerekir. Tüm bu güçlükler düşünülerek, bu bölümdeki çalışmalar Bölüm 3’de verilen model üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 YSA ile μ_{top} ’ın t,RQ ve F Değişkenlerinden Kestirimi

Burada tasarlanan YSA, ölçüm kolaylığı ve güvenilirliği bakımından daha elverişli bulunan ve üretim ortamında on-line ölçülebilen sırasıyla fermantasyon zamanı (t), solunum oranı (RQ) ve melas besleme hızı (F) değişkenlerini giriş olarak; çıkışında toplam özgül üreme hızını (μ_{top}) verecek 3 giriş/1 çıkışlı bir sinir ağıdır. Bu çalışma çerçevesinde üç katmanlı ileri beslemeli YSA mimarisi kullanılmıştır. Bu mimarinin ve bir sinir hücresinin yapısı Şekil 5’de gösterilmiştir. Burada YSA ile ilgili ayrıntılara girilmeyecektir. Tüm YSA mimarileri ve eğitimleri ile ilgili ayrıntılı bilgi [7]’den edinilebilir. YSA eğitimi için ise Levenberg-Marquardt eğitim algoritması kullanılmıştır. Bu eğitim algoritması ile ilgili ayrıntılı bilgi [8] nolu kaynaktan edinilebilir.



Şekil 5. Üç katmanlı ileri beslemeli YSA mimarisi (a) ve bu YSA mimarisindeki her bir sinir hücresinin yapısı (b).

Yazılım ile oluşturulan prosesden 3dk örnekleme aralıkları ile; YSA eğitimi için 10 adet eğitim seti, eğitilen YSA’nın testi için de 10 adet test seti hazırlanmıştır. Her bir eğitim ve test seti, ilgili melas besleme profili ile proses modeli üzerinden işletilen fermantasyondan 360 adet giriş/çıkış verisi içermektedir. Eğitim ve test setleri oluşturulurken izlenen yöntem ve mantık;

olası farklı durumları içeren hem giriş hem de çıkış uzayında mümkün olduğunca homojen dağılımlı eğitim ve test verileri almak olarak özetlenebilir. Eğitim setleri, sabit ilk koşullarda ($C_x(0)=6.5$ g/L; $C_s(0)=6.5$ g/L; $C_o(0)=6.5$ mg/L; $C_e(0)=0$; $S_o=325$ g/L) muhtelif şekillerde melas beslemesi altında elde edilmiştir. Buna karşın test setleri ise, bazılarında ilk koşullar \pm %50 farklı seçilerek elde edilmişlerdir. Test setlerinde prosese uygulanan melas beslemeleri eğitim setlerinde uygulananlardan farklıdır. YSA giriş ve çıkışları $[0,1]$ değer aralığına normalize edilerek kullanılmışlardır.

3 giriş düğümü, birinci katmanında 3 adet, ikinci katmanında 6 adet ve çıkış katmanında da 1 adet hücreye sahip YSA'nın 1 ve 2. katman hücreleri için tanjant hiperbolik, çıkıştaki hücresi için ise lojistik sigmoidal geçiş işlevi kullanılmıştır. YSA Levenberg-Marquardt algoritmasına göre eğitilmiştir. Eğitim, (22) eşitliği ile tanımlanan ortalama karesel hata baz alınarak yapılmıştır.

$$OKH = \frac{1}{10} \sum_{i=EGT\#1}^{EGT\#10} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N=360} (\mu_{istenen}^{i,k} - \mu_{kestirilen}^{i,k})^2 \right) \quad (22)$$

Eğitim sırasında her eğitim adımında, eğitim setlerinin tümü birbiri ardına katılarak YSA'ya verilip o adımda geçerli ağ parametreleri (bağlantı ağırlıkları ve eşikler) ile çıkış hesaplanmış ve bu çıkıştan OKH bulunmuştur. OKH'nin bu değeri için ağ parametreleri güncellenerek aynı işlem tekrar edilmiştir. Bu işlem YSA çıkışı mümkün olan en düşük OKH değerine ulaşıncaya kadar devam eder.

Eğitilen YSA'nın, eğitim sonunda bulunan ağ parametreleri ile her bir EGT ve TEST seti için başarısı daha ayrıntılı incelenmiştir. Bu inceleme için başarımlı ölçütü (BÖ), eşitlik (23) ile verilen ortalama mutlak hata bağıntısı olarak alınmıştır.

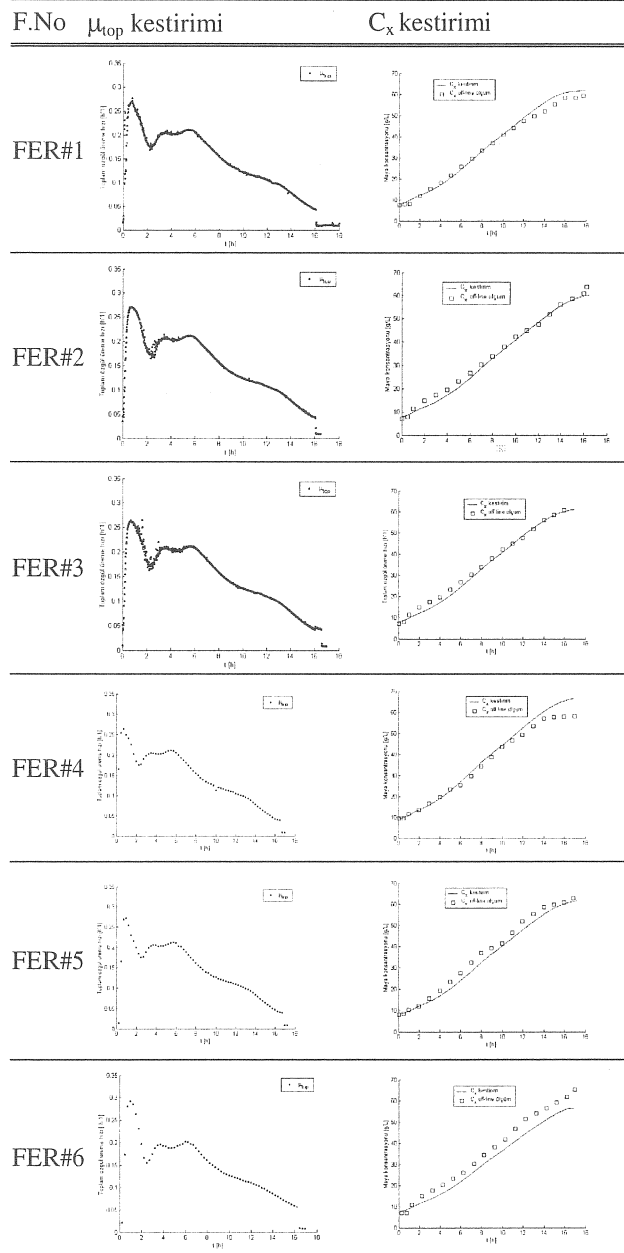
$$BÖ = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \mu_{istenen}^k - \mu_{kestirilen}^k \right| \quad (23)$$

(23) eşitliği ile verilen başarımlı ölçütüne göre hem eğitim hem de test setleri için eğitilen YSA'nın başarımlı ölçütleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere YSA'nın başarımlı ölçütü eğitim setleri için %0.8-%2.5, test setleri için ise %1-%3 aralığındadır. Bu sonuç oldukça iyidir.

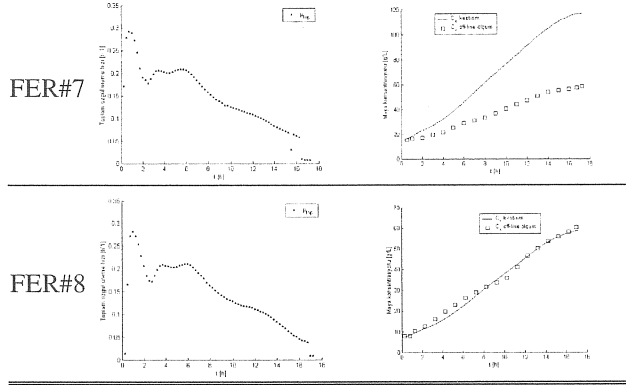
Tablo 3. Eğitilen YSA'nın eğitim ve test setleri için başarımlar ölçütleri.

Set No	BÖ _{EGT}	Set No	BÖ _{TEST}
EGT#1	0.00868	TEST#1	0.02253
EGT#2	0.01205	TEST#2	0.00954
EGT#3	0.01695	TEST#3	0.02839
EGT#4	0.02337	TEST#4	0.01680
EGT#5	0.02207	TEST#5	0.01794
EGT#6	0.01847	TEST#6	0.02430
EGT#7	0.02030	TEST#7	0.02321
EGT#8	0.02188	TEST#8	0.0292
EGT#9	0.01407	TEST#9	0.02321
EGT#10	0.02436	TEST#10	0.02842

Bu aşamaya kadar YSA'nın hem eğitimi hem de testi için kullanılan verilerin tümü Bölüm 3'de verilen matematiksel modeller kullanılarak oluşturulan yazılım ile elde edilmişlerdir. Matematiksel modele dayalı olarak eğitilen YSA, gerçek üretim ortamındaki başarısını görmek amacıyla, endüstriyel üretim boyutlu 8 ayrı fermantasyondan alınmış ölçümlere dayalı olarak da sınanmıştır. Sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Tabloda ikinci sütunda YSA'nın μ_{top} kestirimi, üçüncü sütunda da fermantasyon boyunca (21) eşitliği gereği YSA'nın μ_{top} kestiriminden bulunan maya konsantrasyonunun değişimi off-line ölçümlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. FER#7 imli fermantasyon hariç diğer fermantasyonlar boyunca YSA'nın kestirimi ve bu kestirime dayalı biyokütle kestirimi oldukça iyidir. FER#7 için biyokütle kestirimindeki hata dikkat çekicidir. Bu fermantasyon 15 g/L'lik aşı maya başlamış olup diğer fermantasyonlara göre bu aşı maya miktarı fazladır. FER#7'de kullanılan başlangıç melas besleme hızı (F_0) da bu aşya göre düşük kaldığı için maya maksimum 0.15 h⁻¹'lik özgül üreme hızı ile üremiştir. Halbuki YSA bu fermantasyon için maksimum 0.20 h⁻¹'lik özgül üreme hızı kestiriminde bulunmuştur. Biyokütle kestiriminde hatanın ana sebebi budur. Eğer YSA olası tüm başlangıç koşulları düşünülerek eğitilmiş olsa bu fermantasyon için de doğru biyokütle kestirimi olacaktı. Dolayısıyla bu bölümde tasarımı yapılan YSA, sabit ilk koşullar altında iyi sonuç vermektedir.

Tablo 4 Sekiz adet fermantasyondan alınan ölçümlere dayalı olarak toplam özgül üreme hızının YSA modeli ile kestirim sonuçları.

Tablo 4' ün Devamı



FER#1, FER#2, FER#3 fermantasyonları için ölçüm aralığı 1dk, diğerleri için 15dk'dır.

4.2 Endüstriyel Üretim Ortamından Alınan Ölçümlere Dayalı Olarak YSA ile On-Line Biyokütle Kestirimi

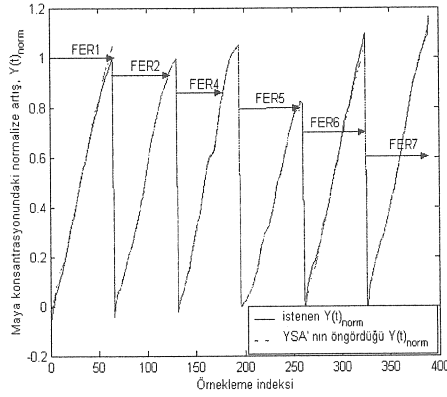
Bu bölümde, bir önceki bölümde FER#7'de karşılaşılan durum da düşünülerek, üretim ortamından alınan ölçüm verilerine dayalı olarak maya derişimini kestiren YSA tasarımı ve sonuçları verilmiştir. Bu çalışma için de yine Şekil 5'de verilen yapıda üç katmanlı ileri beslemeli ağ mimarisi seçilmiştir. Ağdaki giriş ve gizli katman hücrelerinin geçiş işlevi lojistik sigmoidal, çıkış katman hücresinin geçiş işlevi ise sınırlı doğrusal bir işlev olarak seçilmiştir.

Sistemde on-line ölçülebilen değişkenlerden YSA girişi olarak kullanılacak olanlar sırasıyla fermantasyon zamanı (t), melas besleme hızı (F), baca gazındaki karbondioksit (%CO₂) ve etanolun ortamdaki % olarak miktarı (%Ce) ve fermantasyon için kullanılan aşı maya konsantrasyonu (Cxo) olarak belirlenmiştir. Bu girişlerden t, F,%CO₂, Cxo; 0-1 değer aralığına normalize edilerek YSA'ya verilmiştir. Kurulacak YSA kestirimcisi için giriş kompozisyonu belirlendikten sonra; YSA çıkışında istenilenin, $Y(t)=C_x(t)-C_{x0}$ 'ın normalize değeri olacağına karar verilmiştir. $Y(t)$ fermantasyonun t anında, t=0 anındaki maya konsantrasyonunun üzerine artma miktarıdır. Şu halde kurulacak YSA, $Y(t)$ 'yi doğru bir şekilde kestirirse, $C_x(t)$ 'yi de doğru kestirir. Bu tasarlanacak YSA $Y(t)=f(t, F, \%CO_2, \%Ce, C_{x0})$ işlevini gerçekleyecektir.

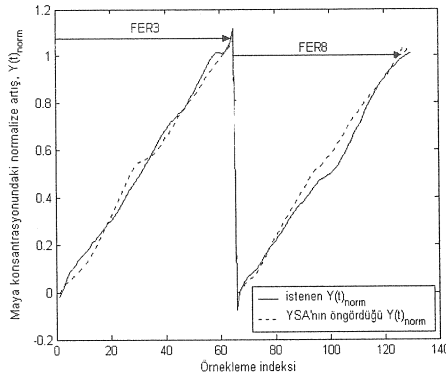
1, 2, 4, 5, 6 ve 7 nolu ölçüm setleri Cx kestirimcisi olarak yapılandırılacak YSA'nın eğitimi; 3 ve 8 nolu ölçüm setleri de bu YSA'nın testi için kullanılmak üzere belirlenmiştir. Bu çalışma çerçevesinde kullanılan fermantasyon verilerinin alındığı fermantasyonların tümünde melas besleme (F) hızı hemen hemen aynı profile sahip olmakla birlikte, aşı maya miktarları ise farklıdır. Örneğin FER4 için aşı maya konsantrasyonu 9.55 g/L iken FER7 için bu değer 15.363g/L'dir. Bu sebeple Cxo'ın YSA girişi olarak alınması anlamlıdır.

YSA eğitimi Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması kullanılarak yapılmıştır. Eğitilen ağ giriş katmanında 8, gizli katmanda 4 ve çıkış katmanında 1 hücreye sahiptir. Eğitim sonucu bulunan ağ parametreleri ile ağın başarısı hem eğitim hem de test setleri kullanılarak incelendi. Şekil 6'da eğitim için kullanılan 1, 2, 4, 5, 6 ve 7 nolu fermantasyon ölçümlerine dayalı YSA cevabı, şekil 7' de de test için kullanılan 3 ve 8 nolu fermantasyon ölçümlerine dayalı YSA cevabı görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere eğitilen YSA'nın cevabı oldukça iyidir. YSA'nın bu başarısı, bu yapının on-line olarak sistemde kullanılabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak; endüstriyel ekmek mayası fermantasyonunda on-line ölçülemeyen maya konsantrasyonunun, on-line ölçülebilen değişkenleri kullanarak kestirimini yapan bir YSA tasarlanmıştır. Tasarlanan YSA'nın başarımı hem eğitim hem de test için kullanılan fermantasyonlar için sınınanmıştır. YSA eğitiminde kullanılan FER1, FER2, FER4, FER5, FER6 ve FER7 fermantasyonları için YSA öngörüsünün verdiği çıkışın istenilen çıkışa göre ortalama mutlak hataları sırasıyla 0.0184, 0.0182, 0.0020, 0.0044, 0.0032 ve 0.0024'dır. YSA'nın testinde kullanılan FER3 ve FER8 için ortalama mutlak hata sırasıyla 0.0304 ve 0.0379'dır. Bu verilen hata değerleri normalize değerler içindir. Daha net olarak, tasarlanan YSA, eğitim seti için 0.1-0.91 g/L, test seti için ise 1.5-1.9 g/L mutlak ortalama hata ile cevap vermiştir. Görüleceği üzere eğitimde kullanılan fermantasyonlar için YSA başarımı diğerlerine nazaran daha iyidir. Test için kullanılan fermantasyonlar için başarım ise eğitim için kullanılan fermantasyonlara nazaran azımsanmayacak seviyededir. Bu başarı, YSA'nın on-line olarak oldukça iyi cevap verdiğini göstermektedir.



Şekil 6. Eğitimde kullanılan 1,2,4,5,6 ve 7 nolu fermantasyonlar için YSA başarısı.



Şekil 7. Test için kullanılan 3 ve 8 nolu fermantasyonlar için YSA başarısı.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Tasarlanan YSA'lar fermantasyon boyunca maya konsantrasyonunu on-line ölçülebilir kılmıştır. Böylece, endüstriyel ekme mayası fermantasyonu proseslerinin kontrolünde önemli bir anahtar durum değişkeninin ölçümü için uygun bir yazılım-sensor elde edilmiştir. Tasarlanan yazılım-sensörlerin başarıları, bu çalışma için kullanılan fermantasyonlar için oldukça iyidir. Fakat olası tüm farklı durumları içeren fermantasyonlar için bu YSA'ların başarısı test edilmelidir. Olası tüm farklı durumlarda global olarak kabul edilebilir bir başarıya sahip YSA yazılım-sensörü tasarlamak mümkündür. Bunun için mümkün olduğunca çok ve farklı özelliklere sahip fermantasyon verisi kullanmak gereklidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan ölçüm verilerinin temini konusundaki destekleri için Pakmaya (Köseköy) Üretim Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Karim M. N, Rivera S. L., Comparison of feedforward and recurrent neural networks for bioprocess state estimation, Computers and Chem Eng, 16 suppl, 369-377, (1992).
2. Dacosta P., Kordich C., Williams D., Gomm J. B., Estimation of inaccessible fermentation states with variable inoculum size, Artificial Intelligence in Engineering, 11, 383-392, (1997).
3. Adilson J. de A., Rubens M. F., Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation, Computers and Chemical Engineering, 24, 1099-1103, (2000).
4. Besli N., Türker M., Gul E., Design and simulation of a fuzzy controller for fed-batch yeast fermentation, Bioprocess Engineering, 13,141-148, (1995).
5. Sonnleitner B., and Kappeli O., Growth of *Saccharomyces cerevisiae* is controlled by its Limited Respiratory Capacity: Formulation and Verification of a Hypothesis, Biotechnology and Bioengineering, vol. 28, 79-84, (1986).
6. Pham H. T. B., Larsson G., Enfors S.-O, Growth and Energy Metabolism in Aerobic Fed-Batch Cultures of *Saccharomyces cerevisiae*: Simulation and model Verification, Biotechnology and Bioengineering, 60: (4), 474-482, (1998).
7. Haykin S., Neural Networks A Comprehensive Foundation (2th edition), Prentice Hall publishing, New Jersey 07458, USA, (1999).
8. Jang J.-S. R, Sun C.-T, Mizutani E., Neuro-Fuzzy and Soft Computing A computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice Hall publishing, Upper Saddle River, NJ 07458, USA, (1997).