ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇOK GİRDİLİ-ÇOK ÇIKTILI KONTROLUN EKMEK MAYASI ÜRETİMİNE UYGULANMASI

Havva BOYACIOĞLU

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2012

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ÇOK GİRDİLİ-ÇOK ÇIKTILI KONTROLUN
EKMEK MAYASI ÜRETİMİNE UYGULANMASI

Havva BOYACIOĞLU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hale HAPOĞLU

Ekmek mayası olarak bilinen *Saccharomyces cerevisiae* mikroorganizmasının çoğaltıldığı kesikli bir biyoreaktörde ürün verimliliği ve seçimliliği göz önünde bulundurularak biyotepkime ortamının sıcaklık ve çözünmüş oksijen (DO) derişiminin kontrolu gerçekleştirilmiştir. Biyoreaktör sıcaklığının kontrolunu gerçekleştirmek amacıyla soğutma suyu akış hızı, DO derişiminin kontrolu için hava akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında biyoreaktör dinamiği incelenmiş ve yinelemeli en küçük kareler algoritması kullanılarak sıcaklığın ve DO derişiminin deneysel ve teorik olarak üçüncü dereceden zaman tekrarlı ortalama (ARMAX) modelleri elde edilmiştir. Çalışmanın diğer aşamasında, biyoreaktör sıcaklığının ve DO derişiminin deneysel ve teorik olarak tek girdili-tek çıktılı (SISO) ve çok girdili-çok çıktılı (MIMO) kontrolleri sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Teorik kontrol çalışmalarında dinamik çalışmalar sonucunda elde edilen üçüncü dereceden ARMAX modelleri kullanılmıştır. Kontrol çalışmalarında geleneksel kontrol yöntemi olan PID kontrol ve ileri yöntemlerinden olan genelleştirilmiş öngörmeli kontrol (GPC) kullanılmıştır. GPC kontrol yönteminin kullanıldığı çalışmalarda model parametreleri her bir örnekleme zamanında algoritma tarafından tekrar hesaplanmıştır. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda ekmek mayası üretilen kesikli bir biyoreaktörde biyotepkime ortamının sıcaklığı ve DO kontrolu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Biyoreaktör sıcaklığının ve çözünmüş oksijen derişiminin eşzamanlı kontrolu sırasında etkileşim önleyici kullanımı gerekli bulunmuştur. Etkileşim önleyici ile birlikte kullanılan MIMO kontrol, ekmek mayası üretimini SISO kontrol tekniklerine göre en az %24 oranında artırmıştır.

Eylül 2012, 213 sayfa

Anahtar Kelimeler: Ekmek mayası üretimi, *Saccharomyces cerevisiae*, yinelemeli en küçük kareler yöntemi, Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GPC), çok girdili-çok çıktılı (MIMO) kontrol

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

APPLICATION OF MULTI INPUT – MULTI OUTPUT CONTROL TO BAKER'S YEAST PRODUCTION

Havva BOYACIOĞLU

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hale HAPOĞLU

In a batch bioreactor in which S*accharomyces cerevisiae* microorganism known as Baker's yeast growth, the medium temperature and dissolved oxygen (DO) concentration are controlled by considering product efficiency and selectivity. To control the bioreactor temperature and the DO concentration, cooling water flow rate and air flow rate were chosen as the manipulated variables respectively.

In the first stage of the study, the dynamics of the bioreactor was examined. A third-degree autoregressive moving average with external input (ARMAX) models were obtained experimentally and theoretically for temperature and DO concentration by using recursive least squares algorithm. Other stage of the study, the experimental and theoretical single input-single output (SISO) and multi input-multi output (MIMO) controls of the bioreactor temperature and DO concentration were achieved respectively. In theoretical control studies, the third-order ARMAX models obtained from dynamic studies were used. PID control as the traditional control method, and generalized predictive control (GPC) as advanced control method were used in control studies. The model parameters for GPC method were recomputed at each sampling time. As a result of experimental and theoretical studies, the temperature and DO concentration of bioreactor medium were controlled successfully in a batch bioreactor in which baker's yeast was produced.

Decoupling was found to be necessary in the case of simultaneous control of the bioreactor temperature and the dissolved oxygen concentration. Compared with SISO control techniques, at least 24% increase in the production of Baker's yeast was obtained by using MIMO control techniques with decoupling.

September 2012, 213 pages

Key Words: Baker's yeast production, *Saccharomyces cerevisiae*, Recursive least square method, Generalized predictive Control (GPC), Multi input– multi output control

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora çalışması, lisans ve yüksek lisansta edinmiş olduğumuz bilgi ve tecrübeler ile sizden daha bilgili, tecrübeli olan kişilerin birikimlerini sabır ile yoğurmak, karşılaşılan problemlere çözümler üreterek ulaşmak istediğiniz noktaya kadar karşılaşılan her türlü zorluğun sizi yıldırmasına izin vermeden amacımıza ulaşmanın ne kadar mükemmel bir duygu olduğunu tatmaktır. Ve son olarak –ki bence en önemlisi- tüm yorgunlukları, çekilen sıkıntıları alıp götüren, elde ettiğiniz sonuçların değerlendirilerek yayın haline gelmesidir.

Çalışmalarım süresince karşılaştığım zorluklarda ve başarılarda engin bilgi birikimini, deneyimlerini ve güvenini benden hiçbir zaman esirgemeyen, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Hale HAPOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) sonsuz teşekkür ederim. Tecrübesi ve görüşleriyle çalışmalarıma katkıda bulunan sayın hocam Prof. Dr. Mustafa ALPBAZ'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı), tez izleme komitelerinde desteklerini benden esirgemeyen sayın Prof. Dr. Sebahat ERDOĞAN'a (Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) ve bilgi paylaşımlarıyla verdiği destek için Prof. Dr. Bülent AKAY'a(Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) da teşekkür ederim. Tüm çalışmalarım boyunca gündüz-gece demeden beni bir an bile yalnız bırakmayan ve zor zamanlarımda bazen hocam bazen ablam bazen de dostum olan yardımlarını, fedakarlıklarını ve sevgisini hiçbir zaman unutamayacağım Yrd. Doç. Dr. Suna ERTUNÇ'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) teşekkürü bir borç bilirim. Güler yüzünü hiç unutmayacağım Uzman Nilüfer VURAL'a (Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı) destekleri için ve birlikte çalışmayı, paylaşımları zevkli hale getiren Proses Kontrol Grubu'ndaki herkese teşekkür ederim.

Sağlamış oldukları maddi destek nedeniyle TÜBİTAK Bilim Adamı Yetiştirme Grubun'a vermiş olduğu yurt içi doktora bursu için, projeler kapsamında sağladıkları malzeme ve ekipmanlar nedeniyle Ankara Üniversitesi Biyoteknoloji Enstitüsü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ve bu tezin gizli kahramanları; maddi ve manevi desteklerinin yanı sıra, bana olan güvenleri asla azalmayan, bir süre aramızdaki kilometrelerce mesafe yüzünden onlara duyduğum özlemim hiç bitmeyen, canım annem Füsun BOYACIOĞLU'na ve (tezin bitmiş halini maalesef dünya gözüyle göremeyen) canım babam Mustafa Kemal BOYACIOĞLU'na sonsuz teşekkürler ederim. En karamsar hallerim de bile bana tebessüm ettirebilen, bazen kardeş yerine abla olan biricik kardeşim Nilda BOYACIOĞLU'na ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Muharrem ÖK'e, Yrd. Doç. Dr. Mustafa TATÇI'ya, Neşe ÖK'e ve değerli büyüklerime de ayrıca teşekkür ederim.

Havva BOYACIOĞLU
Ankara, Eylül 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET		**i**
ABSTRACT		**ii**
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR		**iii**
SİMGELER DİZİNİ		**vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ		**x**
ÇİZELGELER DİZİNİ		**xviii**
1.	**GİRİŞ**	**1**
2.	**KAYNAK ARAŞTIRMASI**	**5**
3.	**KURAMSAL TEMELLER**	**9**
3.1	**Mikroorganizmaların Sınıflandırılması**	**9**
3.2	**Mayalar Hakkında Genel Bilgiler**	**10**
3.3	**Mikroorganizma Çoğalma Kinetiği**	**15**
3.4	**Mikroorganizma Çoğalmasına Etki Eden Faktörler**	**17**
4.	**PROSES KONTROL VE PROSES KONTROL SİSTEMLERİ**	**27**
4.1	**Kontrol Sistemlerinin Türleri**	**30**
4.2	**Bağıl Kazanç Analizi (Relative Gain Analysis)**	**36**
4.2.1	**Etkileşim önleyici (decoupler)kontrol sistemi**	**38**
4.3	**Fermantasyon Teknolojisinde Proses Kontrol**	**40**
5.	**SİSTEM TANIMLAMA**	**45**
5.1	**Sistem Tanımlamada Kullanılan Sinyaller**	**48**
5.2	**Sistem Modelleri**	**52**
5.3	**Model Parametrelerinin Hesaplanması**	**56**
5.3.1	**En Küçük Kareler Yöntemi (EKK)**	**56**
5.3.2	**Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi (YEKK)**	**59**
6.	**ORANSAL (P) INTEGRAL(I) DİFERANSİYEL (D) KONTROL**	**64**
6.1	**Orantı Elemanı**	**65**
6.2	**Integral Elemanı**	**66**
6.3	**Diferansiyel Eleman**	**67**
6.4	**Birinci Dereceden Gecikmeli Eleman**	**69**

6.5 Ölü Zaman Elemanı ……..……..…… 71
6.6 P, PI, PD ve PID Kontrol ……..……..…… 72
7. GENELLEŞTİRİLMİŞ ÖNGÖRMELİ KONTROL (GPC) 74
7.1 Kontrol Edici Tasarımı ……..……. 75
7.2 GPC Kontrol Tasarım Parametrelerinin Seçilmesi …..……..……..….. 86
8. MATERYAL VE YÖNTEM 87
8.1 Mikroorganizma Çoğaltılması 87
8.2 Besi Ortamları 87
8.2.1 Katı besi ortamı 88
8.2.1.1 Eğik agar katı besi ortamı ……..……..…… 88
8.2.1.2 Tek koloni katı besi ortamı …….……..…….…. 89
8.2.2 Sıvı besi ortamı 90
8.3 Deney Sistemi 91
8.4 VISIDAQ Veri Alma-İşleme-Veri Gönderme Paket Programı 93
8.5 Deney Sisteminde Kontrol Çevriminde Kullanılan Ekipmanlar 96
9. ARAŞTIRMA BULGULARI 97
9.1 Dinamik (Açık-Hat) Çalışmaları 97
9.1.1 Filtre ve kalibrasyon çalışmaları 97
9.1.2 Bağıl kazanç analiz (RGA) deneyleri 100
9.1.2.1 RGA sıcaklık deneyleri sonuçları 100
9.1.2.2 RGA çözünmüş oksijen derişimi deneyleri sonuçları 103
9.1.3 Sistem tanımlama deneyleri sonuçları 108
9.1.3.1 Çözünmüş oksijen derişiminin sistem tanımlama deneyleri sonuçları 109
9.1.3.2 Biyoreaktör sıcaklığının sistem tanımlama deneyleri sonuçları 113
9.2 Kontrol (Kapalı-Hat) Çalışmaları 118
9.2.1 PID kontrol deneyleri sonuçları 118
9.2.1.1 Tek girdili - tek çıktılı (SISO) PID kontrol sonuçları 119
9.2.1.2 Çok girdili - çok çıktılı (MIMO) PID kontrol sonuçları 124
9.2.2 GPC kontrol sonuçları 135
9.2.2.1 Teorik GPC kontrol sonuçları 135
9.2.2.1.1 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrol sonuçları ……..… 135

9.2.2.1.2 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrol sonuçları …..…… 147
9.2.2.2 Deneysel GPC kontrol sonuçları 173
9.2.2.2.1 Tek girdili - tek çıktılı (SISO) deneysel GPC kontrol sonuçları 173
9.2.2.2.2 Çok girdili - çok çıktılı (MIMO) deneysel GPC kontrol sonuçları …….. 178
10. TARTIŞMA VE YORUM 184
KAYNAKLAR 191
EKLER ……..……..….. 198
EK 1 DOMETRE KALİBRASYONU …….…….. 199
EK 2 TERMOÇİFT KALİBRASYONU ……..... 201
EK 3 TRANSDUCER KALİBRASYONU ……..… 202
EK 4 SOĞUTMA SUYU POMPASI KALİBRASYONU ……..… 203
EK 5 MİKROORGANİZMA KALİBRASYONU ……..… 204
EK 6 ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN PROSES REAKSİYON EĞRİSİ ……..….. 205
EK 7 BİYOTEPKİME SICAKLIĞI PROSES REAKSİYON EĞRİSİ …….. 207
EK 8 ETANOL ÖLÇER CİHAZI KALİBRASYONU 208
EK 9 SISO PID KONTROL İÇİN VISUAL BASIC PROGRAMI..... 209
ÖZGEÇMİŞ 212

SİMGELER DİZİNİ

A....R	Kesikli zaman girdi/çıktı modelde yer alan polinomlar
a	Genlik seviyesi
$A_{G/L}$	Gaz-sıvı arayüzey alanı (m^2)
C_o*	Gaz fazdaki oksijen derişimi ile dengede olan oksijen derişimi(mg/L)
C_{OL}	Sıvı fazdaki oksijen derişimi (mg/L)
C_s	Substrat derişimi (g substrat/L)
C_x	Mikroorganizma derişimi (g kuru hücre/L)
e(t)	Gürültü
E	Ardışık fark vektörü
E_a	Aktivasyon enerjisi (kmol/J)
G^P	İletim fonksiyonu
k_L	Sıvı film kütle aktarım katsayısı (ms^{-1})
K	Yatışkın hal kazancı
K_c	Oransal sabit
K_L	Sıvı tarafı toplam kütle aktarım katsayısı (ms^{-1})
K_La	Sıvı tarafı hacimsel kütle aktarım katsayısı (s^{-1})
K_S	Monod sabiti (g substrat/L)
N	PRBS girdi sinyali periyodu
N_O	Oksijen molar akısı
N_{O_G}	Gaz fazdan ara yüzeye oksijen molar akısı
N_{O_L}	Ara yüzeyden sıvı faza oksijen molar akısı
P(t)	Kovaryans matris
Q_e	Hata sinyali
Q_o	Kontrol çıkış sinyali
r	Set noktası
R	Evrensel gaz sabiti
S	Substrat derişimi (g/L)
s(t)	t anında sisteme etki eden sinyal
t	Zaman (s, dk veya st)
t_d	Kesikli zaman

T	Sıcaklık
T_{sw}	Kare dalga periyodu
T_p	PRBS girdi sinyali toplam periyodu
$u(t)$	Ayarlanabilen değişken (Hava akış hızı, L/dk soğutma suyu akış hızı, mL/dk)
$u_c(t)$	Sürekli zaman girdi sinyali
$u_d(t)$	Kesikli zaman girdi sinyali
V	Maliyet fonksiyonu
V_L	Sıvı hacmi (L)
$x(t)$	Ara değişken
$y(t)$	Çıkış değişkeni (Çözünmüş oksijen derişimi, mg/L sıcaklık, ^oC)
$\hat{y}(t)$	Modelden elde edilen çıkış değişkeni (kestirilen değer)
Y	Ardışık veri vektörü
$Y_{X/S}$	Substrat verim katsayısı
Y_{X/O_2}	Oksijen verim katsayısı
z_i	Çoğalma ortamındaki bir iyonun gücü

Yunan Alfabesi

Δ	Fark işleci ($\Delta=1-q^{-1}$)
$\varepsilon(t)$	Gerçek çıkış değişkeni ile model çıkış değişkeni arasındaki fark
θ	Parametre vektörü
λ	Ağırlık faktörü
μ	Mikroorganizma özgül çoğalma hızı (st^{-1})
μ_{max}	Mikroorganizma özgül çoğalma hızı (st^{-1})
τ	Zaman sabiti
τ_D	Türevsel zaman sabiti
τ_I	İntegral zaman sabiti
τ_r	Yükselme zamanı
φ	Veri vektörü

φ^T	Veri vektörünün transpozu
ϕ	Ardışık veri vektörü
ϕ^T	Ardışık veri vektörünün transpozu

Kısaltmalar

ARMAX	Auto Regressive Moving Average with Exogenous
CARMA	Controlled Auto Regressive Moving Average
DO	Çözünmüş oksijen derişimi
DO_k	Kestirilen çözünmüş oksijen derişimi
EKK	En Küçük Kareler Yöntemi
IAE	Hata mutlak değeri integrali
ISE	Hata karesi integrali
MIMO	Çok girdili-çok çıktılı sistem
OAH	Oksijen aktarım hızı
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol
YEKK	Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi
OUR	Oksijen Tüketim Hızı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1	Mikroorganizmaların sınıflandırılması	9
Şekil 3.2	Maya biyoteknolojisinin kullanım alanları ……..…….……..	13
Şekil 3.3	Kesikli kültürde mikroorganizma derişim profili …….....	15
Şekil 3.4	Çoğalma için sıcaklık aralıkları …….....	19
Şekil3.5	Biyoreaktörlerde soğutma sistemi ……..…….…	20
Şekil 3.6	Bir mikroorganizmanın, aktivatörlü, normal ve inhibitörlü besi ortamındaki Monod Modeli'ne göre üreme eğrileri …….……..	22
Şekil 3.7	Maya üretim prosesinde fonksiyonel durum ……..…….....…	23
Şekil 3.8	İki film teorisine göre bir gaz kabarcığından mikrobiyal hücreye oksijen aktarım mekanizması ……...…….…..…	25
Şekil 4.1	Dinamik (açık hat) bir sistem …….……....……	29
Şekil 4.2	Açık hat (çevrim) kontrol sistemi blok diyagramı …….……	31
Şekil 4.3	Kapalı hat (çevrim) kontrol sistemi blok diyagramı ……..…...	32
Şekil 4.4	SISO sistem blok diyagramıları ……...…….....	34
Şekil 4.5	MIMO sistem blok diyagramı ……..……...……...	34
Şekil 4.6	İki girdili-iki çıktılı kontrol sistemi için kontrol hat seçenekleri …….....	35
Şekil 4.7	2 girdili-2 çıktılı sistemin blok diyagramı ……...…..	37
Şekil 4.8	Etkileşim önleyici (decoupler) kontrol blok diyagramı ……...….	39
Şekil 4.9	Kontrol çevrimi …….....	40
Şekil 4.10	Biyoproses basamakları …….………	42
Şekil 4.11	Fermantasyon kontrol sistemi bileşenleri …….……..…...…….	44
Şekil 5.1	Kestirim model formları…….....…...…..	46
Şekil 5.2	Açık Hat kontrol sistemi …….……...…	47

Şekil 5.3 Doğrusal geri beslemeli kontrol için test sinyalleri 49
Şekil 5.4 Sistemin cevabına göre kare dalga periyodu ve genliğin seçimi 50
Şekil 5.5 Kademe sayısı 3 ve periyot sayısı 7 olan PRBS sinyalin değerleri 51
Şekil 5.6 Eşitlik 5.6'da genel olarak verilen bir SISO sisteminin model yapısının blok diyagramları 53
Şekil 5.7 Eşitlik 5.12'de verilen ARMAX model yapısının blok diyagramları..... 55
Şekil 5.8 Yinelemeli parametre hesaplama yönteminin şematik gösterimi 60
Şekil 6.1 Orantı elemanı blok diyagramı..... 65
Şekil 6.2 Orantı elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt 65
Şekil 6.3 Orantı elemanı blok diyagramı 66
Şekil 6.4 İntegral elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt 67
Şekil 6.5 Diferansiyel elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt 68
Şekil 6.7 Birinci mertebeden gecikmeli sistemin birim basamak etkiye yanıtı 70
Şekil 6.8 Ölü zaman elemanının birim basamak yanıtı 71
Şekil 6.9 Oransal kontrol blok diyagramı 72
Şekil 6.10 Oransal-integral kontrol blok diyagramı 72
Şekil 6.11 Oransal-Diferansiyel kontrol blok diyagramı 73
Şekil 6.12 Oransal-integral-Diferansiyel kontrol blok diyagramı 73
Şekil 7.1 Model öngörmeli kontrol metodu 76
Şekil 8.1 Tek koloni ekimi 90
Şekil 8.2 Deney sistemi 92
Şekil 8.3 VISIDAQ Task Designer ve Display Designer görünümü 95

Şekil 9.1 DO derişimine farklı filtre katsayıları kullanılarak birinci mertebeden filtre uygulanması 99
Şekil 9.2 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi 100
Şekil 9.3 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi 101
Şekil 9.4 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi …….....…..... 101
Şekil 9.5 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi …….....…..... 102
Şekil 9.6 Sabit varyak ve pompa akış hızı değerlerinde çeşitli değerlerde hava akış hızına basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi 102
Şekil 9.7 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi 103
Şekil 9.8 2L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi 104
Şekil 9.9 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi 104
Şekil 9.10 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi 105

Şekil 9.11 Sabit varyak ve soğutma suyu akış hızı değerlerinde çeşitli değerlerde pozitif basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi …….....…….……...……..... 105
Şekil 9.12 Sabit varyak ve soğutma suyu akış hızı değerlerinde çeşitli değerlerde negatif basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi …….....……...……..…….. 106
Şekil 9.13 Farklı genlik ve periyotlarda hava akış hızına verilen etkiler sonucunda sistemin çıkış değişkeni DOnun zamanla değişimi 110
Şekil 9.14 Farklı genlik ve periyotlarda hava akış hızına verilen etkiler sonucunda sistemin çıkış değişkeninin zamanla değişimi 112
Şekil 9.15 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 35'ten 25'e, 25'ten 35'e değiştirilerek kare dalga etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar ……....…….. 114
Şekil 9.16 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 35'ten 25'e, 25'ten 35'e değiştirilerek kare dalga etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar ……...….…….. 115
Şekil 9.17 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 25,35,45 değerlerine değiştirilerek ternary etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar 117
Şekil 9.18 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen sıcaklığın sabit set noktasında kontrol edildiği SISO PID kontrol sonuçları ……..... 120
Şekil 9.19 Sıvı besi ortamında set noktasına basamak etki verildiğinde sıcaklığın SISO PID kontrol sonuçları …….....…… 121
Şekil 9.20 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen çözünmüş oksijen derişiminin sabit set noktasında kontrol edildiği SISO PID kontrol sonuçları …..... 122
Şekil 9.21 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen set noktasına kare dalga etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol sonuçları ……...……...……...……....……..... 123
Şekil 9.22 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları …..……....……...……...……..……... 125
Şekil 9.23 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID Kontrol sonuçları ……...……...…...……...……...……..…… 126

Şekil 9.24 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince biyoreaktör sıcaklığının ve soğutma suyu akış hızının zamanla değişimi ……..... 128
Şekil 9.25 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları: b) Biyotepkime süresince çözünmüş oksijen derişiminin ve hava akış hızının zamanla değişimi ……..... 129
Şekil 9.26 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi ve dinamik deney ile karşılaştırması ….. 130
Şekil 9.27 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince biyoreaktör sıcaklığının ve soğutma suyu akış hızının zamanla değişimi ……..... 132
Şekil 9.28 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince çözünmüş oksijen derişiminin ve hava akış hızının zamanla değişimi ……..... 133
Şekil 9.29 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi ve dinamik deney ile karşılaştırması ….. 134
Şekil 9.30 MIMO PID kontrol deneylerinde biyotepkime süresince mikroorganizma (ekmek mayası) derişiminin zamanla değişiminin karşılaştırılması ……. 134
Şekil 9.31 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.001 e(t)=0.02) ……..……..... 136
Şekil 9.32 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.002 e(t)=0.02) ……..……..... 137
Şekil 9.33 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.0005 e(t)=0.02) ……..……..…..... 138
Şekil 9.34 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.002 e(t)=0.02) ……..……..... 139
Şekil 9.35 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.001 e(t)=0.02) ……..……..... 140

Şekil 9.36 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.001 e(t)=0.2) ……..……..……...…….…….... 141
Şekil 9.37 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.002 e(t)=0.2) ……..……..……...…….…….... 142
Şekil 9.38 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.0005 e(t)=0.2) ……..…..……..……...…….…... 143
Şekil 9.39 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.002 e(t)=0.2) ……..……..……..……..…….…... 144
Şekil 9.40 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.001 e(t)=0.2) ……..…..……..…….…….…... 145
Şekil 9.41 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.0005 e(t)=0.2) ……..…..……..…….…...…... 146
Şekil 9.42 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.05) ……..…….. 148
Şekil 9.43 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.5)……...……... 149
Şekil 9.44 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.1) …..... 150
Şekil 9.45 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=5) 151
Şekil 9.46 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.005) 152
Şekil 9.47 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.05) 153
Şekil 9.48 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.5) …..... 154
Şekil 9.49 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=5)…..... 155
Şekil 9.50 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.005) ……..……..……..……... 156
Şekil 9.51 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.05) ……..…..…..……..……... 157

Şekil 9.52 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.5) 158
Şekil 9.53 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=5) 159
Şekil 9.54 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.05) 160
Şekil 9.55 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.5) 161
Şekil 9.56 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.1) 162
Şekil 9.57 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=5) ……..…….. 163
Şekil 9.58 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.005) ……..……..…… 164
Şekil 9.59 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.05) ……..……. 165
Şekil 9.60 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.5) ……..... 166
Şekil 9.61 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=5) …….....……. 167
Şekil 9.62 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.005) ……...…….…….……... 168
Şekil 9.63 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.05) ……..……..…….. 169
Şekil 9.64 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.5) ……...……..…… 170
Şekil 9.65 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=5) ……..……...……... 171
Şekil 9.66 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen sıcaklığın sabit set noktasında kontrol edildiği SISO GPC kontrol sonuçları ..…….....……..…..…… 174
Şekil 9.67 Sıvı besi ortamında set noktasına basamak etki verildiğinde sıcaklığın SISO GPC kontrol sonuçları ……..….....…...….……. 175

Şekil 9.68 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen çözünmüş oksijen derişiminin sabit set noktasında kontrol edildiği SISO GPC kontrol sonuçları ……..…...…… 176
Şekil 9.69 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen set noktasına kare dalga etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrol sonuçları ……...……...….....……...……...……..... 177
Şekil 9.70 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen MIMO GPC kontrol sonuçları ……..……...……..... 179
Şekil 9.71 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO GPC kontrol sonuçları ……...……..……...……. 181
Şekil 9.72 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO GPC kontrol uygulandığında mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi …….....……..... 182
Şekil 9.73 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO PID ve MIMO GPC kontrol uygulandığında mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi …….....……...…… 183

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	Ekmek mayasının (*S. cerevisiae*) taksonomi sınıflandırılması ...…	10
Çizelge 3.2	Bazı mayaların görünüm renkleri ……..…...…...…	11
Çizelge 3.3	Maya ve ekmek mayasına ait ampirik denklemler …….……	12
Çizelge 3.4	Gıda endüstrisinde önemli olan mayalar ……...…..……	14
Çizelge 4.1	Ayarlanabilen değişken alternatifleri alternatifleri örnekleri ………	43
Çizelge 5.1	Sistem Modellerinin Sınıflandırılması ……..…..…..…	46
Çizelge 5.2	Periyot sayısı 7 olan sayaç pozisyon değerleri ve çıkış değerleri ...	51
Çizelge 5.3	Eşitlik 5.6'ya göre elde edilen değişik model yapıları ……...…	54
Çizelge 6.1	PID Kontrol alternatifleri ve transfer fonksiyonları ……...……	64
Çizelge 6.2	Birinci dereceden gecikmeli sistemin birim basamak etkiye yanıtı	70
Çizelge 8.1	Katı besi ortamı bileşimi …….……..……..	88
Çizelge 8.2	Sıvı besi ortamı bileşimi	91
Çizelge 9.1	Soğutma suyu akış hızına etki verilerek yapılan sıcaklık deneylerinin kazançları …….….....	107
Çizelge 9.2	Soğutma suyu akış hızına etki verilerek yapılan çözünmüş oksijen derişimi deneylerinin kazançları	107
Çizelge 9.3	Hava akış hızına basamak etkiler verilerek yapılan sıcaklık deneylerinin kazançları	108
Çizelge 9.4	Hava akış hızına basamak etkiler verilerek yapılan çözünmüş oksijen derişimi deneylerinin kazançları	108
Çizelge 9.5	Sıvı besi ortamında sıcaklığın sistem tanımlama deneylerinin işletim koşulları ……...……..	116
Çizelge 9.6	Sıvı besi ortamında sıcaklığın SISO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları ……..	119
Çizelge 9.7	Sıvı besi ortamında çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrolu deneylerinin işletim koşulları …….……..	122
Çizelge 9.8	Sıvı besi ortamında MIMO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları ……..……	124

Çizelge 9.9 Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği mikroorganizmalı ortamda MIMO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları …...… 127
Çizelge 9.10 Farklı kontrol tasarımı parametreleri ve gürültü altında çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu performans kriterleri ….. 147
Çizelge 9.11 Farklı kontrol tasarımı parametreleri değerlerinde biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu performans kriterleri …….. 172
Çizelge 9.12 Sıvı besi ortamında sıcaklığın SISO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları …….. 173
Çizelge 9.13 Sıvı besi ortamında çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları …….…… 176
Çizelge 9.14 Sıvı besi ortamında MIMO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları …….. 178
Çizelge 9.15 Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği mikroorganizmalı ortamda MIMO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları …….. 180

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, kontrol sistemlerini hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Günlük yaşantımızda evlerimiz ve iş yerlerimiz başta olmak üzere gerek endüstride gerek sağlık alanında kontrol sistemlerinin sayısız uygulamaları bulunmakta ve gün geçtikçe de kullanım alanları artmaktadır. Örneğin binalarda ısıtma/soğutma ve havalandırma sistemleri, endüstride üretim sürecindeki çoğu makine, tıpta analiz ve ameliyat cihazları başta olmak üzere kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kontrol sistemleri verimlilik (örnek: işletim parametrelerinin belli değerlerde tutulması), güvenlik (örnek: basınç yüksekliği), tasarruf (örnek: güneş ışığına duyarlı yanan lambalar, girdi akış hızı/derişimi) ve konfor (örnek akıllı ev sistemleri) gibi nedenlerden bir veya birkaçı nedeniyle vazgeçilmez duruma gelmiştir.

Ticari olan ve olmayan (AR-GE ve deneysel çalışmalar) üretimler göz önünde bulundurulduğunda elde edilen ürünün kalitesi, yan ürün miktarlarının az olması, verimin yüksek olması ve ekonomik olarak da bakılacak olursa girdi maliyetleri sabit kalmak üzere elde edilen ürünlerin fazla ve kaliteli olması istenilen bir durumdur. Bu nedenle bir prosesin/sistemin sadece çalıştırılması değil doğru ve kontrollü işletiminin önemi gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Üretimlerin gerçekleştirildiği biyokimyasal reaktörlerin (biyoreaktörlerin) işletilmesi kimyasal reaktörlere göre daha karmaşıktır. Biyoreaktörler optimum işletim koşullarında işletilmelerine rağmen ortamda bulunan mikroorganizmalar bu koşullardaki değişimlere karşı oldukça hassastırlar. Biyoteknolojik proseslerde, ürün verimliliğini arttırmak için biyokatalizör olarak kullanılan mikroorganizmaların en yüksek derişimde üretildiği ve içerdikleri enzimlerin aktivitelerinin en fazla olduğu sıcaklık, çözünmüş oksijen derişimi (DO), pH, hava akış hızı, karıştırma hızı vb. işletim parametrelerinde çoğaltılması gerekir. Bu amaçla işletim parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması, biyotepkime süresince de bu değerlerde tutulması ve kontrol edilmesi gerekir.

Mayalar, endüstride kullanımı çok yaygın mikroorganizmalardır. Gıda, içki, biyolojik arıtma, tek hücre proteini, ikincil metabolitlerin üretiminde, ilaç, genetik çalışmalarda kaynak (host) üretimleri gibi birçok alanda önemli kullanım alanları bulunmaktadır (Pencheva vd 2005, Vittal ve Bhat 2009). Bu doktora tezi kapsamında kullanılan ekmek mayası olarak bilinen *Saccharomyces cerevisiae* mikroorganizmasının etanol, gliserol ve ekmek mayası üretiminde oldukça yaygın kullanımını bulunmaktadır. Bunların yanı sıra içerdiği invertaz enzimiyle gıda sektöründe, yemlerde küf gelişimini azaltmak için katkı maddesi olarak hayvancılıkta (Denli ve Okan 2002), tıbbi bira mayası Faex Medicinalis (cerevisiae Fermentum) üretiminde (Tanker vd. 1998), 1,3 dihidropridin üretiminde ve hücre duvarında yeralan glikoz polimeri olan β-glukan nedeniyle de ilaç endüstrisinde, β-glukan cildi koruması ve nemlendirmesi amaçlı olarak krem yapımıyla da kozmetik sektöründe aranılan bir mikroorganizmadır (Leao ve Soares 2004, Lee 2005, Alkan ve Yılmaz 2010).

S. cerevisiae mikroorganizması için, biyotepkime ortamının sıcaklığı ürün verimliliği açısından, fakültatif bir mikroorganizma olması sebebiyle de DO derişimi hem ürün verimliliği hem de ürün seçimliliği açısından oldukça önemlidir. Havalı koşullarda çoğaltıldığında maya hücreleri, havasız koşullarda çoğaltıldığında ise etanol üreten ekmek mayasını istediğimiz ürüne göre çoğalma koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada amaç maya üretimi olduğu için ortamdaki DO' nun önemi büyüktür. Ortamdaki DO, 1 L/dk sabit akış hızında hava beslenmesi durumunda, kritik değerin altına düşebilmekte (Boyacıoğlu 2002) ve ürün olarak maya yerine etanol üretilmeye başlanmaktadır. Yani havalı koşullarda çoğaltma gerçekleştirilse bile mikroorganizma sanki havasız koşullarda çoğaltılıyormuşçasına ürün olarak etanol üretmeye başlar. Bu durum "Pasteur Etkisi" olarak adlandırılmaktadır (Furukawa vd. 1983). Amaç maya üretmek ise bu istenmeyen bir durumdur. Bu bilgiler ışığında DO' nun kontrolunun gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. İşletim parametrelerinden bir diğeri olan sıcaklığın optimum değerinden düşük veya yüksek olması durumunda enzimlerin aktivitesi düşük olmakta ve/veya enzimler bozulmakta bu durumda da mikroorganizmanın besi ortamındaki maddeleri kullanım hızı azalmaktadır. Optimum sıcaklıkta çalışılmadığı koşullarda mikroorganizma özgül çoğalma hızı ve elde edilen mikroorganizma derişimi diğer bir ifade ile verim düşük olmaktadır. Alpbaz vd. (1997)

yaptığı çalışmada NRLL-Y 567 *S. cerevisiae* mikroorganizması için optimum çoğalma sıcaklığı 32°C olarak bulunmuştur.

Verilen bu bilgiler ışığında, ekmek mayası üretiminin planlandı bu tez kapsamında ürün verimliliği ve seçimliliği açısından biyoreaktör sıcaklığının ile DO'nun kontrolunun gerekliliği görülmüş ve gerçekleştirilmiştir.

Sistemlerin işletilmesi sırasında, ürün verimliliği, güvenlik, maliyet vb gibi nedenlerden dolayı çoğunlukla birden fazla çıkış değişkeninin kontrol edilmesi zorunluluğu olabilmektedir. Böyle bir durumda birden fazla ayarlanabilen değişken ile birden fazla kontrol edilen değişkenden oluşan çok girdili - çok çıktılı sistem (MIMO) prosesler söz konusu olmaktadır. Kimyasal, biyokimyasal ve gıda endüstrisi gibi gerçek prosesler çoğu zaman doğrusal olmayan MIMO sistemlerdir. Biyoproseslerin modellenmesi, parametrelerinin kestirimi ve kontrolu, canlı ortam ve doğrusal olmayan yapıda olmaları ile birlikte karmaşık dinamikleri nedeniyle zor ve hassas bir iştir. Bu nedenle biyoproseslerde adaptif tekniklere dayanan gelişmiş bir kontrol algoritmasını kullanmak uygun olacaktır (Leao ve Soares 2004, Ashoori vd. 2009).

Bu doktora tezi kapsamında amaç, ürün seçimliliği ve verimliliği göz önünde bulundurularak, ekmek mayası (*S. cerevisiae* mikroorganizması) üretilen kesikli bir biyoreaktörde DO derişiminin hava akış hızı ile biyoreaktör sıcaklığının da soğutma suyu akış hızı ile eşanlı yani MIMO kontrolunu gerçekleştirmektir. Çalışmalar hem deneysel hem de teorik olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, bilgisayara on-line bağlı bir biyoreaktör kullanılmış ve VISIDAQ veri alma-işleme-veri gönderme paket programı, teorik çalışmalarda MATLAB paket programı kullanılmıştır.

Tez kapsamında ilk olarak giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlenmek amacıyla sistem tanımlama çalışmaları deneysel olarak yapılmış ve hava akış hızı-DO ile soğutma suyu akış hızı-sıcaklık arasında parametrik bir model olan ARMAX tipi üçüncü dereceden bir modele uyduğu bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen u-y

verileri kullanılarak teorik olarak sistem benzetimi yapılmıştır. İkinci aşamada, Oransal İntegral Türevsel (PID) Kontrol, ve Genelleştirilmiş Öngörmeli (GPC) Kontrol Yöntemleri kullanılarak SISO kontroller son aşamada ise MIMO kontroller gerçekleştirilmiş ve kontrol performansları karşılaştırılmıştır. PID MIMO çalışmalarında iki kontrol mekanizmasının eşzamanlı olarak uygulanması sonucunda oluşan bozucu etkileşimleri önlemek amacıyla decoupling (etkileşim önleyici) uygulaması yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, hem sıcaklık hem DO kontrollerinin eşanlı yapıldığı MIMO kontroller sonunda elde edilen mikroorganizma derişiminin, SISO kontrolde ve kontrolsüz (dinamik) durumda elde edilen mikroorganizma derişimlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. GPC kontrol yönteminin performansının PID kontrol yöntemi ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Doktora Tezi kapsamında yapılan literatür araştırmaları sonucunda kullanılan kaynakların bazıları özet halinde bu bölümde, bazıları ise diğer bölümlerde atıflar yapılarak sunulmuştur.

Zhang vd. (2011), model öngörmeli kontrol (MPC) yöntemini minimum olmayan hal uzay modellerine göre genişleterek (ENMSSPC) kullanmışlardır. Öngörme ufku 20, kontrol ufku 3 olarak seçilmiştir ve model yapısına gürültü terimi eklenmiştir. Daha önce yapılmış bir çalışmadaki minimum olmayan hal uzay MPC kontrol (NMSSPC) performansı ile yaptıkları yeni yaklaşımın performansını karşılaştırmışlardır. Benzetim çalışmalarını ağırlık faktörünü kullanarak ve kullanmadan gerçekleştirmişlerdir. Ağırlık faktörünün kullanılmadığı durumda ENMSSPC ve NMSSPC sonuçlarının yakın olduğu ancak ağırlık faktörü kullanılması durumunda ENMSSPC performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Deng vd. (2006), iç içe geçmiş ikili tank ve ayrı bir üçüncü tanktan oluşan sistemde deneysel olarak su sıcaklığı ile su seviyesi, ısıtıcı ve su akış hızı ile kontrol edilmiştir. Sürekli-zaman GPC kontrolun gerçekleştirildiği sistemde ayar değişkenleri olarak seçilen iki giriş değişkenin de en yüksek değerlerinin kısıtlı olması sistemde anti-windup olarak adlandırılan problemin olmasına neden olmaktadır. Buna rağmen uygun bir modelleme ile sistemin etkinliği deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. MIMO kontrolun yapıldığı sistemde Kalman filtresi kullanılmıştır.

Chen vd. (2005), yapılan çalışmada çok girdili – çok çıktılı (MIMO) proseslerin sistem tanımlanması ve kontrolu amacıyla kısmi en küçük kareler yöntemi uygulanmıştır. Sistem tanımlamada ARX tipi bir model kullanılmıştır. Teorik olarak gerçekleştirilen çalışmada ilk olarak MIMO prosesin girdi-çıktı değerlerini kullanarak kestirimler yapılmıştır. Daha sonra model parametreleri yinelenen PID yöntemi ile sistemin kontrolu sağlanmıştır.

Coelho vd. (2005), modele dayalı öngörmeli kontrol yöntemi, Particle swarm optimizasyon (PSO) algoritması kullanılarak bir seranın sıcaklığının kontrolunun benzetimi için kullanılmıştır. Yapılan çalışmada sistemin modeli genetik algoritma ve sequential quadratik program metotları kullanılarak da oluşturulmuştur. Elde edilen teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve PSO algoritması ile oluşturulan model ile yapılan MPC daha iyi sonuç verdiği söylenmiştir.

Pencheva vd. (2004), tarafından fonksiyonel hal yaklaşımı kullanılarak kesikli ve yarı-kesikli biyoreaktörlerde ekmek mayası üretiminin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım ile genel proses modelleme yöntemlerinde karşılaşılan karmaşık ve yüksek mertebeden denklemlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmayı planlamışlar ve yöntemin geçerliliğini test etmek amacıyla deneysel sonuçlar ile fonksiyonel hal yaklaşımı kullanılan teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Gunnarsson vd. (2003), geri beslemeli kontrol, 2x2 lik çok değişkenli sistemin decoupling kontrol edicisinin ayarlanması için kullanılmıştır. Ayarlama iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk basamakta oransal decoupling kontrol edici, ikinci basamakta ise PD kontrol edici kullanılarak kontrol gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımla iki hatlı kontrol edicilerin doğrusal olmayan benzetimi değerlendirilmiştir. Kapalı devre sistem sonuçlarının uygun davranışlar gösterdiği belirtilmiştir.

Yu ve Gomm (2003), 15 L'lik karıştırmalı kimyasal reaktörde sıcaklık, pH ve DO kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayarlanabilen değişken olarak ısıtma sistemine verilen elektrik enerjisi, derişimi sabit amonyum hidroksit akış hızı ve hava akış hızı seçilmiştir. Yapılan çalışmada, çıkış değişkenlerinin ölü zamanı (sıcaklık için 45 dk, pH için 25 dk, DO için 5 dk (30^oC) ve 2 dk (50^oC)) belirlendikten sonra sistem için en uygun örnekleme zamanı olarak 10 s seçilmiştir. Sistemin modeli yapay sinir ağı ile ARX tipi model seçilmiş, sistemin model parametrelerinin yinelendiği on-line MPC ile kontrolu ve geleneksel PID kontrolu yapılmıştır. Yayında üç kontrol edilen değişkene ait MPC kontrol sonuçları ile sadece DO ait PID kontrol sonucu verilmiştir.

Costa vd. (2002), etanol üretiminin yapıldığı bir fermentasyon prosesinde benzetim ve doğrusal olmayan öngörmeli kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistemin modeli, fonksiyonel link network (FLN) kullanılarak yapay sinir ağı ile oluşturulmuştur. Elde edilen modelin yapısı, uygun doğrusal olmayan yaklaşım yeteneğine sahip ve ağ ağırlık tahmini doğrusal olduğu belirtilmiştir. Modelin parametreleri deneysel çalışmalar sonucu bulunmuştur. Yatışkın halde ve sistemin giriş değişkenlerinden biri olan substrat akış hızına verilen etkiler sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırılarak birbirine uyumlu oldukları gösterilmiştir. Çalışmada substrat giriş akış hızı ayarlanabilen değişken, fermentördeki substrat derişimi de kontrol edilen değişken olarak seçilerek iyi bir GPC kontrol gerçekleştirilmiştir.

Alexander vd. (2001), distilasyon kolonuna ve 2 ardışık sürekli reaktöre PID kontrol yönteminin teorik olarak uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada PID parametreleri için Abbas ve Smith yöntemlerini kullanmışlardır. İki yöntemin performansını karşılaştırmak için yük etkisi altında ve set noktası değişimi etkilerini denemişlerdir. Bu etkileri zaman gecikimsiz ve değişken zaman gecikimli olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda Smith metodunun Abbas metoduna göre daha iyi olduğunu ama Abbas metodunun da kötü olmadığını, bütün prosesler için sadece bir tane benzersiz kontrol yönteminin olmadığını belirtmişlerdir.

Bouhenchir vd. (2001), karıştırmalı kesikli veya yarı kesikli bir kimyasal reaktörde ısıtma/soğutma sisteminin benzetimini ve GPC kontrolunu gerçekleştirmişlerdir. Isıtıcı/soğutucu akışkan olarak 170°C'de buhar, 15°C'de soğuk su ve -10°C etilen glikol-su karışımı kullanılmıştır. Kontrol edilen değişken olan reaktörün sıcaklığı, ısı akısı ayar değişkeni olmak üzere 4 aşamalı bir sıcaklık profili izlenerek benzetimi ve kontrolu sağlanmıştır.

Wang vd. (2000), birinci dereceden ve ikinci dereceden ölü zamanlı model kullanarak, teorik olarak tek girdili – tek çıktılı SISO ve MIMO kontrol gerçekleştirmişlerdir. PI ve PID kontrol yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda benzetimi yapılan endüstriyel prosesin ikinci dereceden ölü zamanlı modele uyduğunu belirtmişlerdir.

MIMO kontroller sırasında decoupler olarak birinci dereceden ölü zamanlı decoupler kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

Fikar (1999), öngörmeli kontrol yöntemlerinden olan Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GPC) yöntemini farklı prosesler için teorik ve deneysel olarak uygulamıştır. Çalışmada GPC nin kontrol parametrelerinden olan minimum tahmin ufku ve kontrol ağırlık faktörlerinin çıkış değişkeni üzerindeki etkisini incelenmiştir. Son olarak bir pH kontrol sisteminde PI kontrolun ve GPC kontrolun performansları karşılaştırılmıştır.

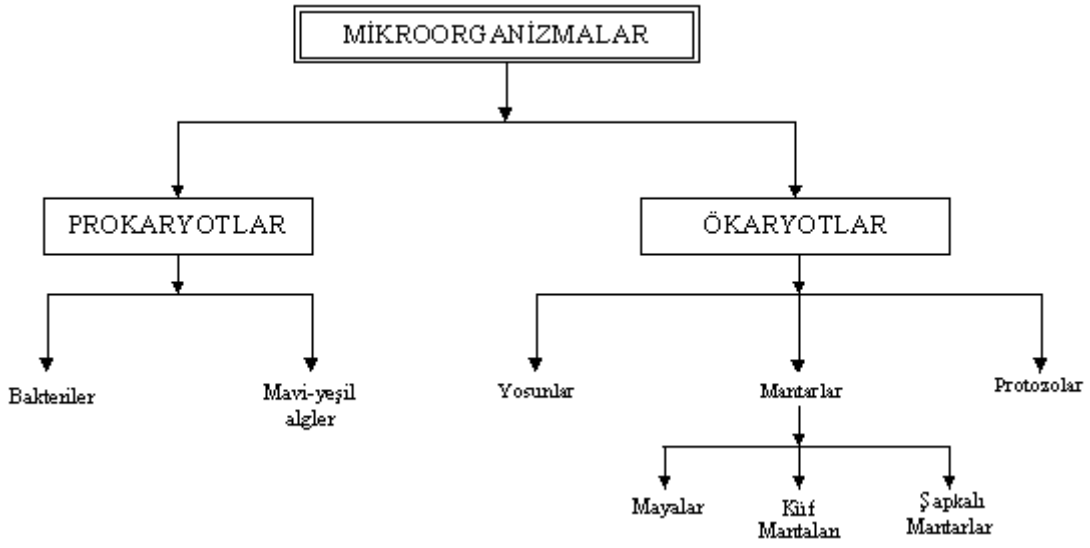
Boubaker vd. (1999), içme suyunun, içerisindeki nitrat ve nitritten biyofilitre kullanılarak arındırılmasının yanı sıra karbon kaynağı ilave ederek kalitesini arttırmak amacıyla SISO ve MIMO kontrol çalışmaları yapmışlardır. Yavaş ve doğrusal olmayan özellik gösteren prosesin SISO ve MIMO kontrol edici ile istenilen sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

Ekmek mayası üretiminin verimini arttırmak amacıyla yapılan bu doktora tezi çalışmasında yararlanılan bilgiler ve yöntemler, yapılan çalışmaların yer aldığı sonuçlar bölümünden önce bölümlere ayrılarak verilmiştir. Bu bölümde, mikroorganizmalar, çalışmada kullanılan ekmek mayası olarak da bilinen Saccaharomyces cerevisiae mayasının özellikleri, çoğalma kinetiği ve çoğalmayı etkileyen parametreler gibi yerli ve yabancı kaynaklardan elde edilen bilgilere verilmiştir.

3.1. Mikroorganizmaların Sınıflandırılması

Canlıları sınıflandırmak (ve/veya gruplandırmak) için hücre yapıları, çoğalma sıcaklıkları, substrat ihtiyaçları, fenotipik, genotipik, taksonomik (tür) gibi daha birçok ortak özellik kullanılmaktadır. Dünyada milyonlarca mikroorganizma türü bulunmaktadır. Mikroorganizmalar, uygun sıcaklık, pH, substrat, oksijen koşullarında yaşamlarına devam eden mikroskopik canlılardır. Mikroorganizmalar hücre yapılarına göre prokaryotlar ve ökaryotlar olarak ayrılır (Şekil 3.1). Bu ayrımın en önemli farkı,



Şekil 3.1 Mikroorganizmaların sınıflandırılması (Pekin 1979, Bailey ve Ollis 1986)

hücre çekirdeğinin (genetik bilgi) olması veya olmamasıdır. Bunun yanı sıra bazı hücre organellerinin olması/olmaması gibi başka farklar da bu sınıflandırmada önemli rol oynar. Bütün mikroorganizmaların çoğalma, yaşamsal faaliyetlerini sürdürme ve ürün elde edilmesi vb. durumların gerçekleşebilmesi için optimum koşullar vardır. Mikroorganizmalar çoğalma ortamı sıcaklığına göre psikofil, mezofil, termofil olarak üç ana gruba ayrılır. Oksijen ihtiyacına göre de havalı (aerobik), havasız (anaerobik) ve hem havalı hem havasız koşullarda çoğalan fakültatif havasız (anaerobik) mikroorganizma olarak üçe ayrılır. Çalışmada kullanılan ekmek mayası olarak da bilinen *S. cerevisiae* ilk olarak 1883 yılında Meyen ex E.C. Hansen tarafından keşfedilmiştir. *S. cerevisiae* mantarların bir alt grubunda yer alan mayalar sınıfına dahil olan ökaryotik, mezofilik, fakültatif anaerob bir mikroorganizmadır (Pekin 1979, Tanker vd. 1998, Walker 1999, Johnson-Green 2002, Shuler ve Kargi 2002, Vittal ve Bhat 2009). Ekmek mayası olarak da bilinen *S. cerevisiae* mikroorganizmasını başka bir sınıflandırma olan taksonomi olarak kategorize edilmesi çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ekmek mayasının (*S. cerevisiae*) taksonomi sınıflandırılması (Walker 1999)

Taksonomik Kategori	
Alt Bölüm (Subdivisions)	*Ascomycotina*
Aile (Families)	*Saccharomycetacea*
Alt Aile (Subfamilies)	*Saccharomycetoideae*
Cins (Genera)	*Saccharomyces*
Tür (Species)	*cerevisiae*

3.2 Mayalar Hakkında Genel Bilgiler

İnsanoğlu fermentasyon yapabilen mikroorganizmaları binlerce yıl önceden beri kullanmaktadır. M.Ö. 6000 yıllarında Sümerler M.Ö. 4000 yıllarında Mısırlıların bira üretimi amacıyla kullanımı kadar eskiye dayanmaktadır. Mayaların ekmek yapımında kullanımları M.Ö. 4000 yıllarında Mısırlılara kadar dayanmaktadır. Ticari olarak biyokütle üretimi 1900 lü yıllarda ekmek mayası üretimi ile başlamaktadır (Scragg 1991).

Mayalar genellikle çapları 4-10 μ arasında değişen yuvarlak, silindirik ve oval şekillerde bulunurlar. Eşeyli veya eşeysiz olarak ürerler. S. cerevisiae hem haploid hem de diploid olarak çoğalabilirler (Dickinson ve Scheweizer 2004). Birçok maya pigmentlere sahiptir ve farklı renklerde görünebilirler (Pekin 1979, Tanker vd. 1998, Walker 1999, Türker 2005, Özata vd. 2009). çizelge 3.2'de bazı mayalar ve görünen renkleri verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ekmek mayası oval şekilli, tomurcuklanarak eşeysiz olarak çoğalan, krem renkli bir mayadır.

Çizelge 3.2 Bazı mayaların görünüm renkleri

RENK	**MAYA**
Beyaz	*Geotrichum spp.* *Phaecoccomyces spp.* (albino mutantları)
Siyah	*Aureobasidium pullulans* *Phaecoccomyces spp.*
Krem	***Saccaharomyces cerevisiae***
Kırmızı	*Rhodotorula spp.* *Saccaharomyces cerevisiae* (Adenin mutantları)
Turuncu	*Rhodosporidium spp.*
Pembe	*Phaffia spp.* *Oosporidium spp.*
Sarı	*Cryptococcus laurentii* *Bullera spp.*

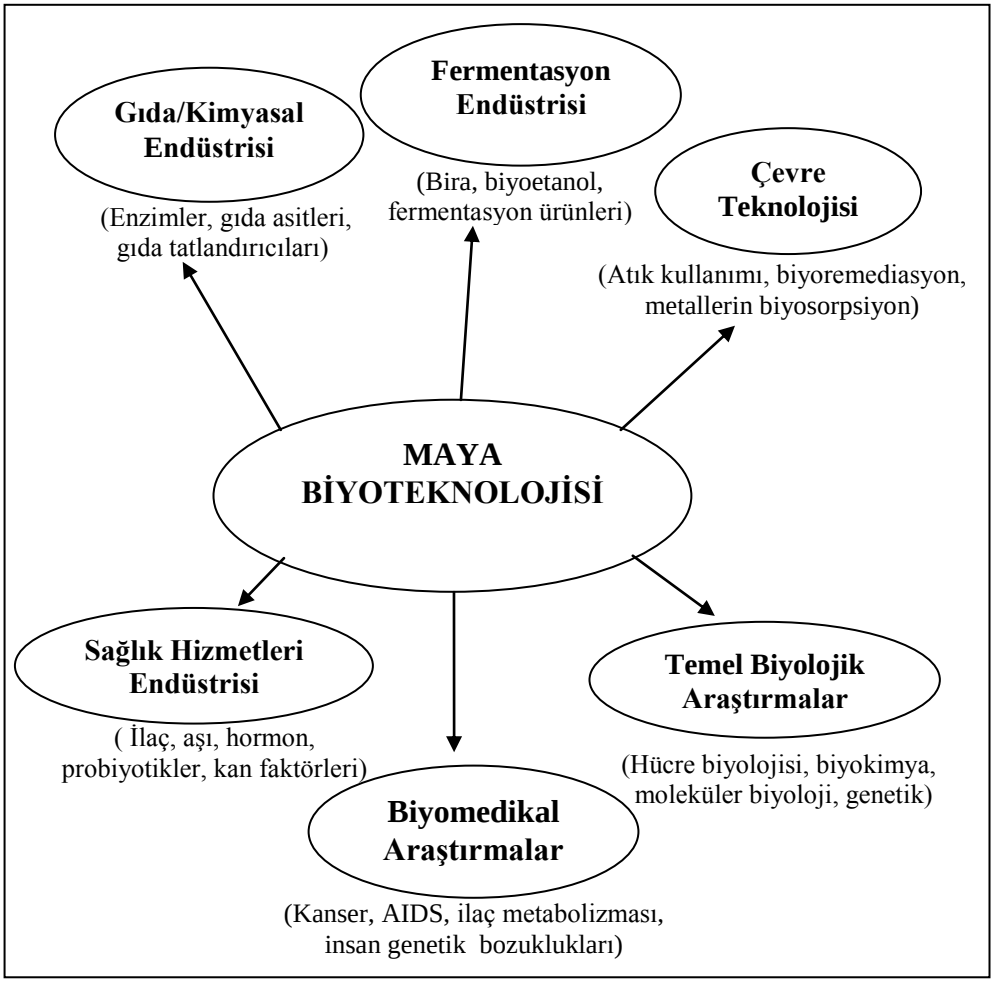
Mikroorganizmalar da dahil olmak üzere bütün hücreler çoğalma ve gelişmeleri için besinlere gereksinimleri vardır. Bu besinleri kullanan hücrelerin yapısında başta su (toplam kuru ağırlığın % 80-90) olmak üzere karbon, hidrojen, oksijen, azot, sülfür, fosfor ve tuzlar bulunmaktadır (Pekin 1979, Scragg 1988, Walker 1999). Walker (1999) tarafından bildirildiğine göre; 100 g ekmek mayasının ampirik formülü Berry (1988),

yine ekmek mayasının ampirik formülü Doran (1995) ile Shuler ve Kargi (2002) tarafından bildirildiğine göre; Atkinson ve Mavituna (1983) tarafından bulunan mayaların ampirik formülleri çizelge 3.3'de verilmiştir. Mikroorganizmalar bu besinleri sadece çoğalma ve biyotepkimeler için değil aynı zamanda enerji kaynağı olarak da kullanırlar. Mayalar organik maddeleri hem elektron kaynağı hem de enerji kaynağı olarak kullanan kemoorganotrof mikroorganizmalardır. Mayalar, enerji ihtiyaçları için şekerleri kullanırlar. *S. cerevisiae* şeker olarak glukoz, sukroz ve rafinozda çoğalabilir, galaktoz ve maltozda değişken olarak çoğalırken laktoz ve trehalozda çoğalmaz (Kurtzman ve Fell 2000). Mayalar organik maddeleri hem elektron kaynağı hem de enerji kaynağı olarak kullanan kemoorganotrof mikroorganizmalardır. Mayaların gelişmesi ve üremesi için bu maddelerin varlığına ihtiyaç duyulmasına rağmen gelişmeyi engelleyici maddelerin (inhibitörlerin) ortamda bulunmaması ve ortamın pH ile sıcaklığının uygun olması gerekmektedir (Pekin 1979, Shuler ve Kargi 2002, Serter vd. 2006). Bu konular Bölüm 3.4'te daha ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3 Maya ve ekmek mayasına ait ampirik denklemler

Mikroorganizma	Formül	Kaynak
Maya	$CH_{1.64}N_{0.16}O_{0.52}P_{0.01}S_{0.005}$	Atkinson ve Mavituna (1983)
Ekmek mayası	$CH_{1.83}O_{0.55}N_{0.17}$	Doran (1995)
Ekmek mayası	$C_{47}H_{6.3}O_{33}N_8P_{1.2}Tuz_{4.5}$	Berry (1988)
Candida utilis	$CH_{1.84}N_{0.2}O_{0.56}$	Mavituna ve Atkinson (1983)

S. cerevisiae'nın, bira, şarap, ekmek mayası, etanol, β-glukan,1,4-dihidropiridin, amilaz vs gibi daha birçok ürün elde edilmesinin yanı sıra biyolojik arıtımlar, genetik çalışmalar gibi biyoteknolojideki kullanım alanları gün geçtikçe daha çok artmaktadır (Jhonson-Green 2002, Leao ve Soares 2004, Lee 2005). Şekil 3.2'de maya biyoteknolojisinin kullanım alanları verilmiştir.



Şekil 3.2 Maya biyoteknolojisinin kullanım alanları (Walker 1998)

Mayalar maalesef sadece yararlı değildir. Bazı mayalar toksik etkilere neden olabilmektedir. Zararlı (patojen) mayalara örnek olarak insanlarda ölüme bile sebep olan *Candida albicans* verilebilir.

Bu tezde ekmek mayası üretimi çalışıldığı için çizelge 3.4'de gıda endüstrisinde önemli olan bazı mayalar ve kullanım alanları verilmiştir. Gıda endüstrisinde kullanılan mikroorganizmalar, bir maddeden gıda veya gıda katkı maddesi elde etme, gıda ve gıda katkı maddelerinden enzim üretimi, bir gıdayı başka bir gıdaya dönüştürme, gıda endüstrisinin atıklarını daha az zararlı ürünlere dönüşme gibi dört amaç için kullanılır (Jhonson-Green 2002).

Çizelge 3.4 Gıda endüstrisinde önemli olan mayalar (Jhonson-Green 2002)

MAYALAR	ÜRETİM	ÜRÜN/ETKİ
Pozitif Etki		
Mucor miehei	Aspartik proteazlar	Peynir Üretimi
Kluyveromyces lactis	Laktaz Üretimi	Laktoz İntoleransının Azaltılması
Saccaharomyces cerevisiae	Etanol Üretimi	Fermente İçkiler (Bira, şarap,votka)
Saccaharomyces cerevisiae	Biyokütle üretimi	Gıda(Ekmek ve unlu mamul) Üretimi
Aspergillus niger	Sitrik Asit Üretimi	Gıda Katkı Maddesi
Aspergillus niger	Enzim Üretimi	Nişansta ve Meyva Suyu Prosesinde
Negatif Etki		
Aspergillus flavus	Mikotoksin Üretimi	Çeşitli Gıdalarda Kontaminasyon
Penicillium digitatum	Bitki Dokusu İnvazyonu	Meyva, Sebze ve Tahıl Bozulması

Ekmek mayası, daha önce de belirtildiği gibi bileşiminde çeşitli azotlu maddeler, karbonhidratlar, yağlar, enzimler, vitaminler ve inorganik tuzlar bulundurduğu için önemli bir besin kaynağıdır. Ayrıca pek çok enzim içerdiğinden enzim teknolojisi açısından da önemlidir. Havalı koşullarda çoğaltılan ekmek mayası solunum yaparak yani oksidatif metabolizma sırasında kendi yapı maddelerini oluşturarak gelişir ve ürer. Bu sırada metabolizma ürünlerinden daha çok hücreler meydana gelir. Buna "Pasteur Etkisi" denir (Pekin 1979). Çünkü solunum sırasında maya oluşması için daha az besin harcanır. Buna örnek verilecek olursa; havalı koşullarda 4-10 g glukozdan 1 g maya meydana gelirken, havasız koşullarda aynı miktar maya elde etmek için 60-80 g glukoz gerekir (Kesim 1995). Bailey ve Ollis (1986) bildirdiğine göre, Cooney vd. 1977 ile Wang vd. 1977 yaptıkları çalışmada glukozlu ve havalı koşullarda hiç alkol oluşturmadan, ekmek mayasının fermentasyonu Eşitlik 3.1'de havasız koşullardaki etanol üretimi de Eşitlik 3.2'de verildiği gibidir.

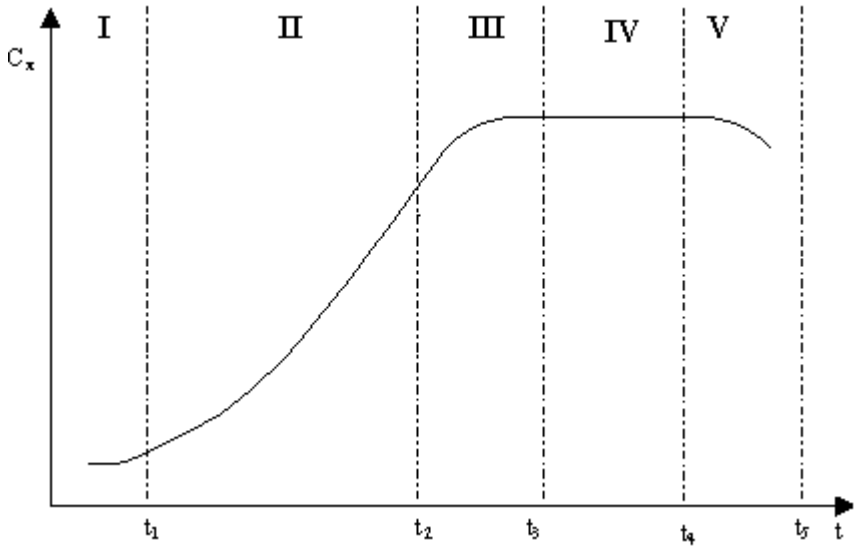
$$aC_6H_{12}O_6 + bO_2 + cNH_3 \rightarrow C_6H_{10.9}N_{1.03}O_{3.06} + eH_2O + fCO_2 \quad (3.1)$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1'de sunulan reaksiyonun entalpisi 674 kcal, Eşitlik 3.2 ile ifade edilen reaksiyonun entalpisi 28.2 kcal'dir. Buna göre havalı koşullardaki çoğalma sırasında daha çok ısı enerjisi ortaya çıkacak ve havasız koşullardaki çoğalmaya göre daha fazla sıcaklık artışı olacaktır. Mayaların diğer mikroorganizmalarda da olduğu gibi optimum çalışma sıcaklığında çoğaltılması gerektiği için ortaya çıkan ısının sıcaklık artışına sebep olmasından dolayı çoğalma ortamının sıcaklık kontrolunun gerekli olduğu aşikardır.

3.3 Mikroorganizma Çoğalma Kinetiği

Biyoreaktöre, yeni (taze) besi ortamı eklenmediği durumda yani kesikli kültürde mikroorganizmaların çoğaltılması sırasında biyotepkime süresince mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi şekil 3.3'de verildiği gibidir. Biyotepkime süresince besi ortamındaki maddeler mikroorganizma tarafından tüketilmekte ve ürün oluşumu ile yaşamsal faaliyetler için kullanılmaktadır. Bu çoğalma ve yaşamsal faaliyetlerin devam ettiği süreçte mikroorganizma derişiminin profili, mikrobiyolojik proseslerde çok önemli olan gecikme fazı, logaritmik faz (yükselme fazı), yavaşlama fazı, duraklama fazı ve ölüm fazı olarak beş ana bölüme ayrılır (Bailey ve Ollis 1986, Scragg 1988, Shuler ve Kargi 2002).



Şekil 3.3 Kesikli kültürde mikroorganizma derişim profili(Bailey ve Ollis 1986, Scragg 1988, Biotol 1992, Shuler ve Kargi 2002)

I. Gecikme Fazı: Bu faz yeni bir ortama alışma ve büyümeye/çoğalmaya alışma süresini temsil eder. Biyotepkime ortamına aşılanan mikroorganizmanın besi ortamına alışması için geçen süredir. Bu sürenin uzunluğu hücrelerin önceki çoğalma ortamına ve mikroorganizmaya göre değişiklik gösterebilir. Mikrobiyolojik proseslerde bu fazın en kısa sürede olması istenir. Bu süre boyunca, çoğalma için gerekli enzimlerin sentezi gerçekleşir. Hücre sayısında değil de hücre yoğunluğunda (kütlesinde) artış olabilir. Birden fazla karbon kaynağının besi ortamında bulunması durumunda da çoklu gecikme (multiple lag) fazı gerçekleşebilir. Bu durum diauxic faz (büyüme) olarak adlandırılır.

II. Üstel (Logaritmik) Faz: Bu fazda hücreler yeni çevrelerine alışmışlardır. Adaptasyon sonrasında hücreler sürekli, katlanarak hücre kütlesi ve hücre sayısı olarak zamanla üstel olarak çoğalırlar. Bu fazda hücre ölümleri olsa da çok azdır. Genç hücre yoğunluğunun fazla olduğu bir fazdır. Tüm hücre bileşenlerinin arttığı ve hücre sayısının düzenli aralıklarla katlanarak çoğaldığı bu durum "dengeli büyüme (çoğalma)" (balanced growth) olarak adlandırılır. Bu fazda besinlerin sürekli tüketildiği, hücrelerin çoğaldığı, ürünlerin ortaya çıktığı dinamik bir durum söz konusundur. Sonuç olarak bu zaman süresince ortamda sürekli bir değişim mevcuttur. Dinamik koşullarda mikroorganizma çoğalma hızı

$$r_x = \frac{dC_x}{dt} = \mu C_x \qquad (3.3)$$

Eşitlik 3.3 ile ifade edilebilir. Bu eşitliği düzenlersek, C_{X_1} başlangıçtaki (t_1 zamanındaki) mikroorganizma derişimi, C_{x_2} üstel fazın sonundaki mikroorganizma derişimi olmak üzere;

$$\ln \frac{C_{X_2}}{C_{X_1}} = \mu (t_2 - t_1) \qquad (3.4)$$

elde edilir. Eşitlik 3.4 eşitliğinden üstel çoğalma fazındaki özgül çoğalma hızı hesaplanabilir.

Mikroorganizma özgül çoğalma hızının, substratın başlangıç derişimi ile değişimini gösteren yarı-amprik bağıntı Eşitlik 3.5'te verilen Monod Modeli'dir (Bailey ve Ollis 1986). Bu doktora tezi kapsamında kullanılan *S. cerevisiae* mikroorganizmasının çoğalması Monod Modeli'ne uymaktadır.

$$\mu = \mu_{max} \frac{C_S}{K_S + C_S} \tag{3.5}$$

III. Yavaşlama Fazı: Besi ortamındaki maddelerin azalması, hücrelerin yaşlanması ve toksik yan ürünlerin ortaya çıkması sebebiyle hücre çoğalmasında azalmanın başladığı fazdır. Bu fazda hücre ölümünün artmaya çoğalma hızının azalmaya başladığı "dengesiz büyüme (çoğalma)" (unbalanced growth) olarak adlandırılan durum ortaya çıkar.

IV. Duraklama Fazı: Hücrelerin bazılarının çoğaldığı bazılarının ise sadece yaşamsal faaliyetlerini devam ettirdiği, hücre çoğalması ile ölümünün neredeyse eşit olduğu fazdır. Hücrelerin net çoğalma hızları sıfır olsa da ikincil metabolitlerin üretildiği fazdır.

V. Ölüm Fazı: Duraklama fazında başlayan hücre ölümü bu fazda zamanla artar. Ölüm fazı ile duraklama fazı arasında kesin bir sınır bulunmamaktadır. Bu faz süresince hücre sayısı üstel olarak azalır.

3.4 Mikroorganizma Çoğalmasına Etki Eden Faktörler

Her canlının olduğu gibi mikroorganizmaların da yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmeleri, üremeleri, ürün oluşumu için bulundukları besi ortamının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin uygun olması gerekmektedir. Bu bölümde mikroorganizmaların ve çalışmada kullanılan ekmek mayasının çoğalma koşulları ile bilgiler bulunmaktadır.

i) pH: Besi ortamının pH'sı mikroorganizmaların yapısında bulunan enzimlerin aktivitesini etkileyeceği için önemli bir işletim parametresidir. Mayalar, bazik ortamlara karşı çok hassas olmalarıyla birlikte, asidik ortamlara karşı dayanıklı olsalar da

yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmeleri ve çoğalmaları için besi ortamı pH 3-6 arasında olması uygundur (Scragg 1988, Walker 1999, Johnson-Green 2002). Mikroorganizmaya uygun pH'larda çalışılmadığında, düşük pH'larda katyonların, yüksek pH'larda ise anyonların hücre içine geçişi zorlaşır, hücre geçirgenliğinin bozulması enzim aktivitesini etkilediği gibi protein sentezinin durmasına neden olur. Ayrıca hücreler toksik maddelere karşı daha duyarlı hale gelirler (Akbulut ve Kesenkaş 2011). Bu sebeplerden dolayı besi ortamının pH'ı mikroorganizmaların besinlerden yararlanma verimleri ile çoğalma ve ürün derişimi üzerine de etkisi olduğundan biyotepkime süresince pH'ın sürekli olarak kontrol edilmesi ve optimum değerinde tutulması gerekir. Çalışmada kullanılan *S. cerevisiae* mikroorganizması için optimum pH 5'tir (Alpbaz 1997).

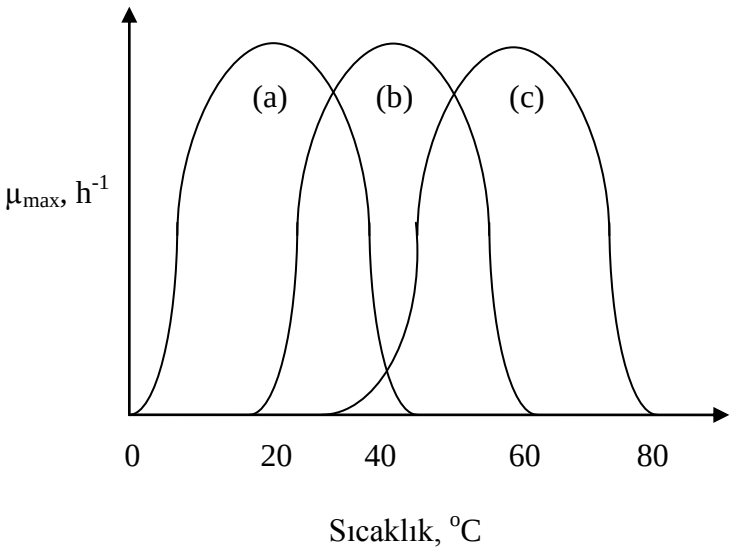
ii) Substrat derişimi: Mikroorganizmaların çoğaltılabilmesi için gerekli olan organik ve inorganik maddelerden oluşan ortamlar "besiyeri" olarak adlandırılır. Besi ortamının yapısı ve derişiminin mikroorganizmanın çoğalması üzerinde etkisi oldukça fazladır. Hücreler için gerekli olan besinler "Makrobesinler" ve "Mikrobesinler iki gruba ayrılır. Makrobesinler, derişimi 10^{-4}M' den daha fazla ihtiyaç duyulan karbon, oksijen, nitrojen, hidrojen, sülfür, fosfor, magnezyum ve potasyum, Mikrobesinler, derişimi 10^{-4}M' den daha az ihtiyaç duyulan eser miktarda denilebilecek Ca, Na, Mo, Zn, Cu, Mn, vitaminler, büyüme hormonları sayılabilir (Scragg 1988, Walker 1999, Shuler ve Kargi 2002)

Karbon kaynağı olarak endüstride genellikle melas, nişasta mısır şurubu, peyniraltı suyu, laboratuvarda glukoz, sukroz ve fruktoz kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra metanol, etanol, metan da ucuz karbon kaynakları olarak tercih edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında karbon kaynağı olarak glukoz kullanılmıştır.

Kuru hücre ağırlığının yaklaşık %10-14'ünü azot oluşturmaktadır. Azot kaynağı olarak amonyak veya amonyak tuzları kullanılır (Shuler ve Kargi 2002). Bunların yanı sıra daha pahalı olan maya özütü, pepton da azot kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu doktora çalışması kapsamında azot kaynağı olarak maya özütü ve $(NH_4)_2SO_4$

kullanılmıştır. Karbon ve azot kaynaklarının yanı sıra besi ortamındaki maddelerde bulunan H derişimi de hücre içi ve hücre dışı pH'ı etkilediği için önemlidir (Walker 1999).

iii) Sıcaklık: Tüm mikroorganizmalar gibi mayaların da minimum, maksimum ve optimum çoğalma sıcaklıkları vardır. Bölüm 3.1'de mikroorganizmaların ortam sıcaklıklarına göre psikofil, mezofil, termofil olarak adlandırıldıkları verilmişti. Şekil 3.4' te özgül çoğalma hızı ile sıcaklık arasındaki ilişki grafiksel olarak verilmiştir.

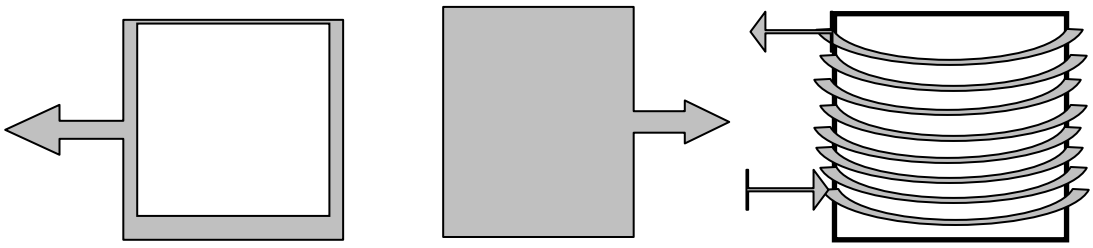


Şekil 3.4 Çoğalma için sıcaklık aralıkları (Scragg 1988, Scragg 1991)
a. psikofil, b.mezofil, c.termofil

Mayalar, mezofilik mikroorganizmalardır ve minimum 5-25°C'de, maksimum 40-50°C'de en önemlisi optimum 30-40°C'de çoğalırlar (Walker 1999, Akbulut ve Kesenkaş 2011). Mikroorganizmaların yapılarında yer alan enzimlerin aktivitesi sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir. Genel olarak çoğalma ortamının sıcaklığı, mikroorganizmaların çoğalması, solunumu ve ürün oluşumu üzerine çok fazla etki etmektedir. Kimyasal kinetik kurallarına göre sıcaklık artışı reaksiyon hızını arttırır. Ancak enzimatik reaksiyonlar belli bir sıcaklığa kadar bu kurala uyar. Enzimatik reaksiyonların sıcaklığa bağlılığı Arhenius Kanuna uyar (Sinclair ve Kristiansen 1987).

$$\mu = Ae^{-Ea/RT} \qquad (3.7)$$

Ekmek mayasının havalı koşullarda çoğaltıldığında ortaya çıkan ısının neden olduğu sıcaklık artışı ürün verimliliği açısından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle biyoreaktörde sıcaklık kontrolu bu tezin amaçlarından biri olarak seçilmiştir. Biyotepkime boyunca sıcaklık kontrolunun yapılabilmesi için ayarlanabilen değişken olarak soğutma suyu akış hızı seçilmiştir. Isıtma/soğutma yapılan sistemlerde doğru akışkan seçimi ve istenen sıcaklığı/sıcaklık profilini sağlayacak akış hızının seçimi önemlidir. Akışkan seçiminde bir tek akışkan seçilebileceği gibi birden fazla akışkan kullanımı seçilebilir. Ancak son zamanlarda çok akışkanlı sistemler yerine tek akışkanlı sistemlerin kullanımı eğilimi vardır. Ceketten ısıtma/soğutma sistemlerinde, akışkanın sıcaklığının sabit kalması/ayarlanması için çoğu zaman ısı değiştirici, ısıtıcı kaynağı gibi bir ara termal döngüye de ihtiyaç vardır (Bouhenchir 2001). Biyoreaktörlerde soğutma işlemi genellikle şekil 3.5'de görülebileceği gibi üç şekilde yapılmaktadır (Johnson-Green 2002). Büyük ölçekli fermentasyon proseslerinde sıcaklık kontrolu için ceketten akışkan geçirilerek veya serpantin ile soğutma ve nadir olarak ısıtma yapılır (Montague 1997).



(a) (b) (c)

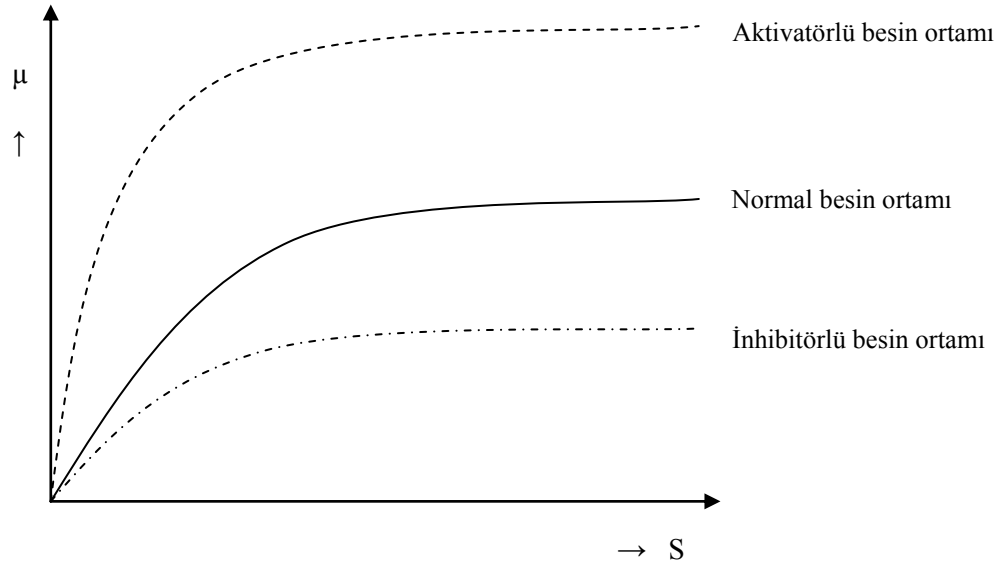
Şekil 3.5 Biyoreaktörlerde soğutma sistemi

a. Su/soğutucu maddenin biyoreaktörün ceketinden sirkülasyonuyla soğutma sistemi
c.besi ortamının bir ısı değiştiriciden geçirilmesiyle soğutma sistemi
b. biyoreaktör içinden veya dışından serpantin ile soğutma sistemi

Bu çalışmada kullanılan ekmek mayası (*S.cerevisiae*) daha önceden belirlenmiş olan optimum sıcaklık olan 32°C'de çoğaltılmış ve sıcaklık kontrolu biyoreaktör ceketinden geçirilen su ile gerçekleştirilmiştir (Alpbaz 1997).

iv) İnhibitörlerin ve aktivatörlerin bulunması: Enzimlerin aktivitelerini azaltan maddelere "inhibitör" denir. Bu maddelerin çoğalma ortamında bulunmaları mikroorganizmaların enzimatik reaksiyonlarını yavaşlatır ve bu sebeple gelişmelerine engel olur. Böyle bir durumda yarışmalı "rekabet edici" inhibisyon meydana gelebilir. Yarışmasız inhibisyonlarda ise inhibitör, mikroorganizmanın substrat alımına etki etmez. Bazı durumlarda her iki etki birden görülebilir. Substrat derişiminin fazla olması mikroorganizmaların inhibe olmasına neden olabilmektedir. Bu duruma "substarat inhibisyonu" denir. Çalışmada kullanılan *S. cerevisiae* mikroorganizması için bu durum daha da önem kazanmaktadır. Çünkü bu mikroorganizmanın çoğaltıldığı ortamlarda substrat derişiminin fazla olması -havalı ortamda da olsa- havasız koşullarda çoğalma oluyormuşçasına etanol üretmesine neden olur. Bu duruma "Crabtree Etkisi" denir (Scragg 1988, Furukawa vd. 1983, Shuler ve Kargi 2002). Amaç mikroorganizma üretmek ise bu durum istenmez. Substratların çoğalmayı engelleyici seviyeleri hücrelerin ve substratın tipine çok bağlıdır. Maya üretiminde glukozun 200 g/L üzerindeki derişimi, sudaki indirgeme aktivitesi nedeniyle, inhibe edicidir (Shuler ve Kargi 2002). Biyotepkimelerde elde edilen ürünler de inhibe edici olabilir. Bu duruma "ürün inhibisyonu" denir. Bu doktora tezinde, kullanılan ekmek mayası olarak da bilinen *S. cerevisiae* mikroorganizması için etanol ürün inhibisyonuna ve verim düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle etanol istenmeyen bir yan üründür.

Gelişme için gerekli olmayan fakat maksimum gelişme hızını arttıran maddelere "aktivatör" denir. Şekil 3.6'den de anlaşılacağı gibi, genel bir inhibitör, çoğalma ortamındaki mikroorganizmanın μ_{max} değerini azaltır ve K_S değerini arttırır. Aktivatörler ise inhibitörlerin mikroorganizma çoğalmasına yaptıkları etkilerinin tam tersi hareket ederler. Yani μ_{max} değeri artarken K_S değerini azaltırlar (Pekin 1979).



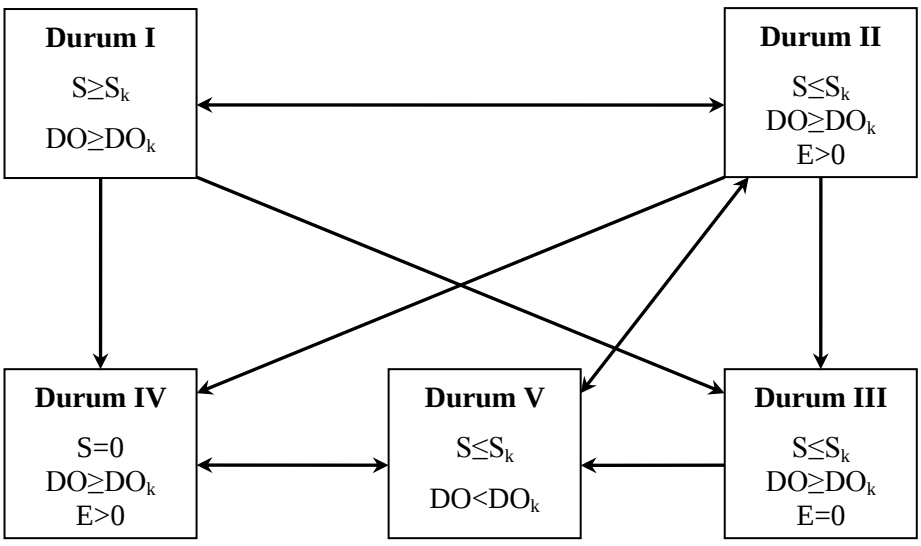
Şekil 3.6 Bir mikroorganizmanın, aktivatörlü, normal ve inhibitörlü besi ortamındaki Monod Modeli'ne göre üreme eğrileri (Pekin 1979)

v) Çözünmüş oksijen derişimi: Havalı koşullarda gerçekleştirilen fermentasyonlarda önemli bir substrattır ve oksijen kuru hücre ağırlığının yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır (Shuler ve Kargi 2002). Karbon kaynağı olarak kullanılan büyük moleküllü maddelerin daha küçük moleküllere dönüştüğü yol izinin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Buna en güzel örneklerden biri çalışmada kullanılan ekmek mayasıdır. *S. cerevisiae* daha önce de anlatıldığı gibi fakültatif bir mikroorganizmadır. Daha açık bir ifade ile havalı ve havasız ortamlarda çoğalabilir fakat havasız koşullarda çoğaltıldığında ürün olarak etanol, havalı koşullarda çoğaltıldığında ise ana ürün olarak maya hücreleri elde edilir. Burada ürün seçimliliği söz konusu olmaktadır. Amaç ekmek mayası üretmek ise çözünmüş oksijen derişiminin kontrol edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Oksijenin bir başka önemli özelliği de havalı koşullarda çoğaltılmalarda oksijenin önemli bir terminal elektron alıcı olması söz konusudur (Johnson-Green 2002). Oksijenin sudaki çözünürlüğünün az olması nedeniyle kısıtlayıcı substrat olabilmektedir. Oksijenin sudaki çözünürlüğü 30°C'de 8 mg/L'dir (Johnson-Green 2002). Çalışmada kullanılan sıvı besi ortamında ve optimum işletim sıcaklığı olan 32°C'de oksijenin çözünürlüğü 7,5 mg/L'dir. Çalışmada kullanılan *S. cerevisiae*

mikroorganizması için kritik oksijen derişimi, doygunluk derişim değerinin %5-10'udur (Shuler ve Kargi 2002).

Çözünmüş oksijen derişiminin düşük olmasının substrat tüketimini ve karbondioksit oluşum hızını azalttığı ve bu durumun "Pasteur Etkisi" olarak adlandırıldığı bilinmektedir (Furukawa vd. 1983). Yani çözünmüş oksijen derişiminin düşük olması havasız koşullarda çoğalma oluyormuş gibi etanol üretimine neden olmaktadır. Amaç mikroorganizma üretmekse bu durum istenmez.

Havalı (aerobik) koşullarda çoğaltılan ekmek mayası için daha önce de anlatıldığı gibi hem substrat derişimi hem de çözünmüş oksijen derişimi ürün verimliliği ve seçimliliği için önemlidir. Pencheva vd. 2004'teki yaptıkları yayında bildirdiğine göre Zhang vd. 1994 yılında yaptıkları çalışmada, havalı koşullarda kesikli ve yarı kesikli maya üretim prosesinin en az beş fonksiyonel duruma ayrıldığını belirtmektedirler. Bu durumlar, şeker derişiminin ve çözünmüş oksijen derişiminin kritik değerin üzerinde ve/veya altında olmasına ile yan ürün olan etanolun karbon kaynağı olarak kullanılmasına göre ayrılmıştır. Şekil 3.7'de bu aşamalar görülmektedir.



Şekil 3.7 Maya üretim prosesinde fonksiyonel durum (Pencheva vd. 2004)

Mikroorganizma çoğalmasını daha iyi tanımlamak için substrat ve oksijen verim katsayıları sırasıyla Eşitlik 3.8 ve 3.9 ile verilmiştir. Verim katsayılarının değerleri mikroorganizmaya ve substrata göre farklılık gösterir.

$$Y_{X/S} = -\frac{\Delta C_X}{\Delta C_S} \tag{3.8}$$

$$Y_{X/O_2} = -\frac{\Delta Cx}{\Delta C_{O_2}} \tag{3.9}$$

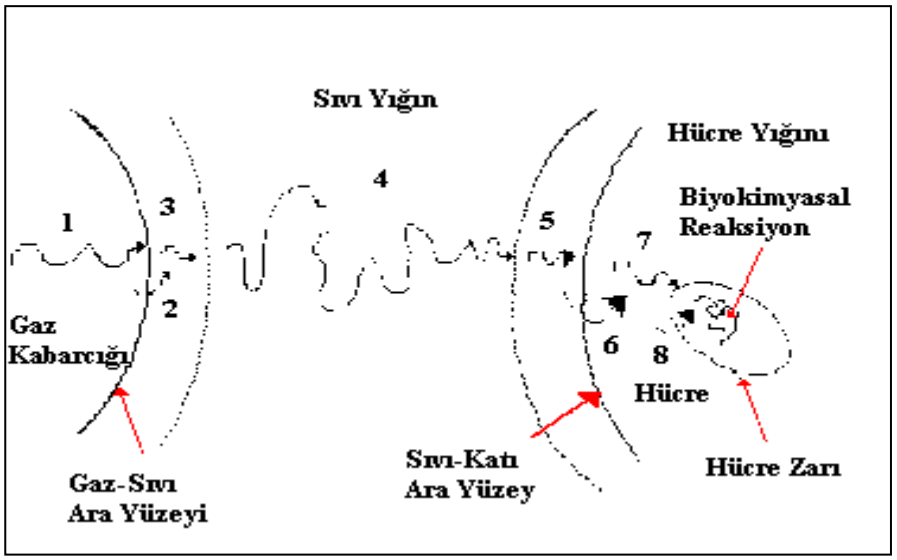
Substrat olarak glukozun kullanıldığı havalı koşullarda maya ve bakteri çoğaltılması durumunda substrat verim katsayısı genellikle 0.4-0.6 g/g arasında iken oksijen verim katsayısı 0.9-1.4 g/g arasındadır. Diğer taraftan havasız koşullarda mikroorganizma çoğaltılması durumunda daha düşük verim katsayısı elde edilir (Shuler ve Kargi 2002). Yani havasız koşullarda çoğalma yapıldığında daha çok glukoz harcanır. Bu duruma tezde kullanılan mikroorganizma açısından bakılacak olursa; havalı koşullarda 1 g kuru maya elde etmek için 4-10 g glukoz harcanırken havasız koşullarda aynı miktarda maya elde etmek için 60-80 g glukoz harcanır (Kesim 2006). Bu mikroorganizma çoğaltılan bir sistem için verim katsayısının yaklaşık olarak sabit olduğu düşünülürse, substrat derişiminin ve oksijen tüketim hızının belirlenmesi için sırasıyla Eşitlik 3.10 ve 3.11 no'lu eşitlikler kullanılabilir.

$$\frac{dC_S}{dt} = -\frac{\mu C_X}{Y_{X/S}} \tag{3.10}$$

$$OUR = \frac{\mu C_X}{Y_{X/O_2}} \tag{3.11}$$

Havalı koşullarda çalışılırken sisteme sadece oksijen kaynağının beslenmesi yeterli değildir. Oksijenin sıvı besi ortamında homojen olarak dağılmasının sağlanması da önemli bir parametredir (Johnson-Green 2002). Gaz fazdan sağlanan oksijenin besi ortamından mikroorganizmalara aktarımı biyoreaktör tasarımı ve işletme koşullarının belirlenmesinde büyük önem taşır. Besi ortamı içerisindeki gaz aktarımı iki film teorisi

ile analiz edilmektedir (Bailey ve Ollis 1986). Bu teoriye göre besi ortamındaki bir hava kabarcığından oksijenin mikroorganizmaya aktarımı şekil 3.8'de görüldüğü gibidir. Şekilde 1.Gaz yığınından gaz-sıvı ara yüzeyine difüzyon, 2.Ara yüzeyde gazın çözünmesi, 3.Gaz-sıvı ara yüzeyinden geçiş, 4.Sıvı yığınında difüzyon, 5.Hücre yığını film tabakasında difüzyon, 6.Hücre yığını içine difüzyon, 7.Hücre yığınından hücreye taşınım, 8.Hücre içi yayınma olarak verilmiştir.



Şekil 3.8 İki film teorisine göre bir gaz kabarcığından mikrobiyal hücreye oksijen aktarım mekanizması (Bailey ve Ollis 1986)

Genelde gaz-sıvı ara yüzey alanı bilinemez. Bu durumda biyoreaktörde oksijen aktarımı birim hacim başına tanımlanır (Bailey ve Ollis 1986).

$$\text{Oksijen Aktarım Hızı} = \frac{\text{Akı} * \text{Gaz - Sıvı Ara Yüzey Alanı}}{\text{Biyoreaktör Sıvı Hacmi}}$$

$$N_{O_a} = OAH = K_L(C_O * - C_{OL}) \frac{A_{G/L}}{V_L}$$

$$= K_La(C_O* - C_{OL}) \qquad (3.23)$$

K_La, besi ortamının özelliklerine (viskozite, yoğunluk, sıcaklık, vb.) biyoreaktör ve karıştırıcı boyutlarına, karıştırma ve havalandırma hızlarına bağlıdır. Çözünmüş oksijenin metabolizmaya yeterli aktarılıp aktarılmadığı oksijen aktarım katsayılarının belirlenmesi ile olur.

Biyoproseslerde sıvı tarafı oksijen aktarım katsayısı K_La'nın belirlenmesi için Dinamik yöntem, Gaz dengesi metodu, Sürekli-kültür yöntemi olmak üzere üç yöntem geliştirilmiştir (Rainer 1990). Çalışmada kullanılan ekmek mayası üretimi sisteminde farklı hava akış hızları ve karıştırma hızları için sıvı tarafı hacimsel kütle aktarım katsayısı hesaplanmış ve en uygun karıştırma hızının 600 rpm olduğu belirlenmiştir (Boyacioglu 2004). Bu doktora tezi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda 600 rpm karıştırma hızında deneyler gerçekleştirilmiştir.

vi) Işık: Mikroorganizmalar genellikle ışıktan etkilenmezler. Ancak bazı bakteriler gelişmek ve ürün açığa çıkarmak için ışığa ihtiyaç duydukları (örneğin sularda yaşayan kükürtü/kükürtsüz mor bakteriler) gibi bazı bakteriler de çoğalma ortamındaki ışığın olmasından ve/veya olmamasından etkilenmezler (örneğin karanlık fermentasyon ile hidrojen üretiminde kullanılan bakteriler) (Akbulut ve Kesenkaş 2011).

4. PROSES KONTROL VE PROSES KONTROL SİSTEMLERİ

Hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelen kontrol sistemlerinin ilk uygulamalarına M.Ö. 0 ile 300 yılları arasında rastlanmaya başlamıştır. Günlük yaşantıyı daha rahat hale getirebilmek adına zamanı ölçmek (Ktesibios), yağ lambasının yağ seviyesini sabit tutmak (Philon), tapınak kapılarının kendiliğinden açılmasını sağlamak (Heron) gibi çeşitli amaçlarla kontrol sistemleri kullanılmıştır (Akçalı 2001, Yüksel 2011). O zamanlardan günümüze kadar gelişen teknoloji ile birlikte kontrolun kullanım alanları yağ lambasını yağ seviyesinden kablosuz (wireless) kontrol sistemlerine, insan benzeri robotlara kadar gün geçtikçe artmış ve artmaktadır. Elektrik, elektronik ve kimyasal gelişmeler doğrultusunda kullanılan makine ve teçhizatlardaki gelişmeler kontrolu hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline getirmektedir. Her bilimsel ve teknolojik alanlarda olduğu gibi proses kontrolde de neyin ne olduğunun anlaşılabilir olması için problemlerin ortaya koyulması açısından bazı tanımlar, adlandırmalar yapılmaktadır. Bu doktora tezinin de önemli bir parçası olan proses kontrol ile ilgili bu tanımlar ile bazı temel kavramlar ve kontrol sistemlerinin türleri hakkında kısaca bilgiler bu bölümde verilmiştir. Bu bilgilerin yanı sıra çok girdili çok çıktılı kontrollerin uygulanması sırasında ortaya çıkan etkileşimlerin engellenmesi amacıyla kullanılan RGA analizinden bahsedilmiş ve bölümün sonunda bu doktora tezinin de yer aldığı fermentasyon proseslerinde kontrol hakkında bilgilere kısaca yer verilmiştir.

Bu bölümde verilen temel bilgiler, yerli ve yabancı birçok kaynak araştırılarak ve bilgi birikimleri kullanılarak oluşturulmuştur. Verilen tanımların ve bilgilerin Türkçe karşılıkları açısından kesin bir tanımlama veya isimlendirme bütünlüğü maalesef ki yoktur. Bu nedenle karşılaşılan farklı isimlendirmelere de yer verilmeye çalışılmıştır. Verilen bilgilerin "Çok Girdili-Çok Çıktılı Kontrolun Ekmek Mayası Üretimine Uygulanması" başlıklı bu doktora tezinin en önemli parçaları olan sistem tanımlama, PID Kontrol ve GPC Kontrol Yöntemlerinin ve deney sisteminin anlatıldığı bölümlerin daha anlaşılır olmasını sağlayacağına inanılmaktadır.

Sistem (Dizge): Bir bütünü oluşturan, birbiri ile bağlı ya da belli bir işlev için bir araya getirilmiş olan elemanların düzenine, topluluğuna ya da kümesine denir (Sarıoğlu 1991, Sivanagaraju ve Devi 2008, Yüksel 2011). Masaüstü bir bilgisayar, kasa, monitör, klavye, mouse ve varsa diğer ekipmanlar (yazıcı, tarayıcı vb.) ile bir sistemi tanımlayabileceği gibi, pamuğun çeşitli aşamalardan geçip kumaşa dönüştüğü çeşitli makineler bütününü de bir sistem olarak kabul edilebilir. Bu doktora tezinde, Bölüm 8'de ayrıntılı olarak anlatılan, ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği bir kesikli bir biyoreaktör sistemi kullanılmıştır.

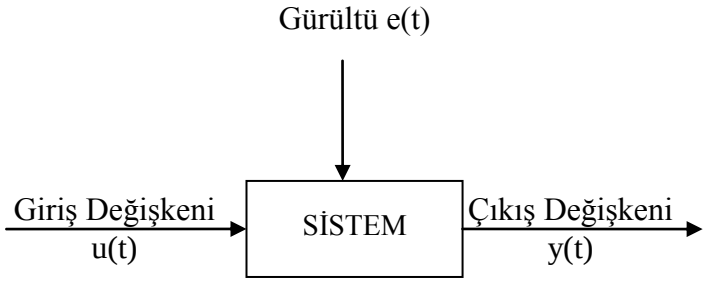
Kontrol (Denetim): Bir sistemin davranışını istenilen amaç doğrultusunda ayar eden, düzenleyen, yöneten ya da kumanda eden anlamına gelir (Sarıoğlu 1991, Akçalı 2001, http://www.plcprogramlama.com 2004, Yüksel 2011). Sistemlerin kontrol edilmesinin amacı bir veya birden fazla parametrenin ölçülerek, ölçülen parametre ya da parametrelerin belli değerde ve/veya değerlerde tutulmasıdır. Böylece biyoreaktör, makine, tesis gibi genel anlamda sistemlerin tehlikeden uzak, güvenli çalışmaları sağlandığı gibi işletme koşullarının da iyileştirilmesi, ürün kalitesinin arttırılması, maliyetlerin düşürülmesi mümkün olacaktır.

Kontrol Sistemi (Denetim Sistemi/Dizgesi): Kendisini ya da başka bir sistemi, düzenlemek, kumanda etmek, ayarlamak ya da yönetmek üzere uygun bir biçimde bağlanmış fiziksel bileşenler topluluğudur. Başka bir deyişle enerji, malzeme veya diğer kaynakların akışını düzenleyen aygıtlar olarak tanımlanır. Kontrol sistemleri kontrol edilen niceliklerin değerlerini sabit tutar veya bu değerlerin önceden belirlenmiş şekilde değişimini sağlar (Sarıoğlu 1991, Bateson 1996, Akçalı 2001, Sivanagaraju ve Devi 2008, Alpbaz vd. 2011, Yüksel 2011).

Kontrol Edici: Kontrol sisteminin beynidir. Sistemi kontrol etmek için kullanılan algoritmanın, giriş değişkenlerinin, çıkış değişkenlerinin, set noktasının tanımlandığı yerdir.

Giriş değişkeni (giriş)(u(t)): Sistemi, organı ya da kontrol edilecek düzeni, cevap alma veya kontrol etme amacı ile uygulanan uyarı (sinyal, işaret) ya da uyarılardır (Sarıoğlu 1991, Sivanagaraju ve Devi 2008, Yüksel 2011)

Çıkış değişkeni (çıkış)(y(t)): Belli girişe ya da girişlere ilişkin olan sistemin cevabı (sinyal, çıkış işareti) ya da cevaplardır (Sarıoğlu 1991, Yüksel 2011).



Şekil 4.1 Dinamik (açık hat) bir sistem (Söderström ve Stoica 1989)

Gürültü (bozucu etki)(e(t)): Sistemin giriş değişkenlerinden biridir. Büyüklüğü ve sistemi ne zaman etki edeceği ne kadar süre etki edeceği belli değildir. Sistemde olması istenmeyen bir giriştir.

Ayarlanabilen değişken (u(t)): Sistemin giriş değişkenlerinden bir veya birkaçı olabilir. Sistem kapalı hatta çalıştırıldığında, kontrol edilen değişken ve/veya değişkenlerin istenilen set noktasında tutulabilmesi için kontrol ediciden gelen sinyal ile değeri değişen giriş değişkenidir.

Kontrol edilen değişken (y(t)): Sistemin çıkış değişkenlerinden bir veya birkaçıdır. Sistem kapalı hatta çalıştırılırken ayarlanabilen değişkenin değişimi ile set noktasında tutulmak istenen değişkendir. Bir sistemin kontrol edilmesinin nedeni olarak da ifade edilebilir.

Set noktası (ayar değeri(r(t)): Kontrol edilen sistemin olmasının istenildiği değer, konum veya durumdur. Sabit bir değer olabileceği gibi değişken de olabilir (Kuo 2009, Alpbaz vd. 2011, Yüksel 2011)

Hata (d(t)): Kontrol altındaki bir sistemde, istenen değer olan set noktası ile kontrol edilen çıkış değişkeni arasındaki farktır ve kontrol hatası olarak da isimlendirilir. Sistem tanımlama yapılması durumunda ise sistemin çıkış değişkeni ile modelden hesaplanan çıkış değişkeni değeri arasındaki farktır ve kestirim hatası olarak da ifade edilir.

Kestirim(□$_k$): Bir sistemin modelinden elde edilen, modelin çıktısı olarak da ifade edilebilir.

Kestirim Hatası: Sistemin gerçek çıktısı ile modelden elde edilen çıktısı arasındaki farktır.

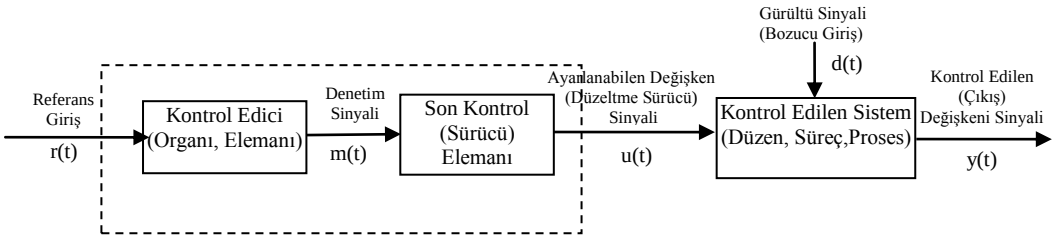
Sinyal (işaret):Sistemdeki ölçüm elemanlarının çıkışından alınan veya kontrol edici tarafından sistemin giriş değişkenine gönderilen genellikle elektrik akımıdır.

4.1 Kontrol Sistemlerinin Türleri

Kontrol sistemlerini giriş çıkış sayısına, giriş çıkış türüne, sinyal türüne, verilen set noktası değişimine gibi çok farklı şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Bu bölüm kapsamında, kısaca en sık karşılaşılan ve kullanılan sınıflandırmalardan bahsedilmiştir (Anand 1984, Sarıoğlu 1991, Bateson 1996, Kuo 2004, Sivanagaraju ve Devi 2008, Alpbaz vd. 2011).

I. Giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiye göre

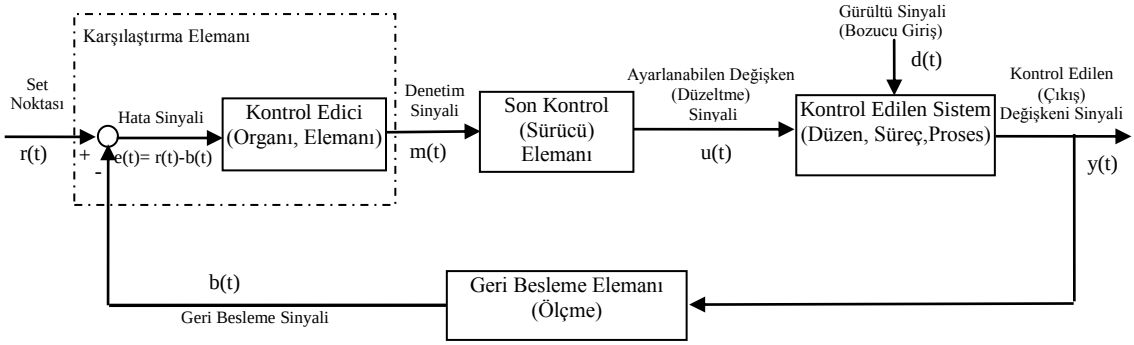
a. Açık Hat (Çevrim): Giriş değişkeninin çıkış değişkeninden bağımsız olduğu bir kontrol sistemidir. Yani sistemin çıkış değişkeninin hangi değerde olduğu, ne durumda olduğu konusunda kontrol edicinin bilgisi yoktur. Kontrolun hareketi giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki kalibrasyon ilişkisine dayanır. Basit, ucuz ve genellikle kararsızlık problemi olmaması bir avantajken, güvenlik eksiklikleri, hatanın büyük olması ve kontrol edilen değişkenin otomatik olarak değiştirilememesi bir dezavantajdır. Bu tür kontrol ediciye örnek olarak bulaşık ve klasik tam otomatik çamaşır makineleri örnek olarak verilebilir. Çünkü makinenin, yıkama işlemini gerçekleştirme şartları ve durumu kullanıcıya aittir ve çamaşırın temizlenmesi/temizlenmemesi durumu hakkında geri dönüş bilgisi yoktur (Sarıoğlu 1991, Kuo 2004, Sivanagaraju ve Devi 2008, Yüksel 2011). Şekil 4.2'de açık hat kontrol sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistemin çıktısı olan y(t)'nin büyüklüğü konusunda kontrol ediciye herhangi bir geri dönüş bulunmamaktadır.



Şekil 4.2 Açık hat (çevrim) kontrol sistemi blok diyagramı (Sarıoğlu 1991,Kuo 2004 ten esinlenerek hazırlanmıştır.)[1]

[1] Kesikli çizgilerle belirtilen bölüm bazı kaynaklarda bütün halinde alınıp kontrol edici olarak adlandırılmaktadır.

b. Kapalı Hat (Çevrim): Giriş değişkeninin çıkış değişkenine ya da çıkış değişkeni ile set noktası olarak da ifade edilen referans giriş değeri arasındaki farka ya da bunların toplamına bağlı olan bir kontrol sistemidir. Bu sistemlere geri beslemeli kontrol sistemleri de denir. Geri beslemeli kontrol sistemlerinde kararsızlık görülebileceği için önceden sistemin kararlılık analizinin yapılmış olması ve kararlı koşullarda çalışma bölge/bölgelerinin belirlenmiş olması gerekir. Bir sistemin kontrolunu gerçekleştirmeden önce sisteme ait önemli birimlerin bulunduğu blok diyagramın oluşturulması yol gösterici olacaktır. (Anand 1984, Sarıoğlu 1991, Alpbaz vd. 2011, Yüksel 2011).



Şekil 4.3 Kapalı hat (çevrim) kontrol sistemi blok diyagramı (Sarıoğlu 1991, Biotol 1992, Kuo 2004, Sivanagaraju ve Devi 2008, Yüksel 2011'ten esinlenerek hazırlanmıştır)

II. Kontrol sisteminde kullanılan elemanların yapı ve niteliğine göre

Kontrol sisteminde kullanılan elemanlara göre mesela bilgisayar kullanımı olduğunda bilgisayar kontrol sistemi, hava veya başka bir gaz kullanımı ön planda olduğunda pnömatik kontrol sistemi gibi sınıflandırma yapılabilir.

III. Sistemin kullanıldığı amaç veya yaptığı işe göre

Sıcaklık kontrolu, çözünmüş oksijen derişimi kontrolu, hız kontrolu, seviye kontrolu gibi çok farklı isimlerle sınıflandırılabilir.

IV. Zamana bağımlı olması veya olmamasına göre

Kontrol sistemleri elemanlarının ya da parametrelerinin zamanla değişmesi durumunda zamanla değişen kontrol sistemleri veya zamandan bağımsız olmasına göre zamanla değişmeyen kontrol sistemleri olarak adlandırılır.

V. Analiz ve tasarım yöntemlerine göre

Bir sistemin giriş değişkeni ile çıkış değişkeni arasındaki ilişki doğrusal bir davranış gösteriyorsa ya da belirli sınır koşullar içinde tutulabiliyorsa (süperpozisyon kuralı geçerli ise) bu sistem doğrusaldır. Böyle bir sistemin kontrol edilmesi olayına da bir doğrusal sistemin kontrolu olarak isimlendirilir. Aksi durumda doğusal olmayan sistemin kontrolu söz konusundur. Bazı yaklaşımlarla ya da varsayımlarla da doğrusal olmayan bir sistemi doğrusal kontrol yöntemleri ile de kontrol etmek mümkündür.

VI. Matematik model derecesine göre

Sistemler, derecesine göre birinci dereceden model kullanan kontrol sistemleri, ikinci dereceden model kullanan kontrol sistemleri gibi adlandırılır.

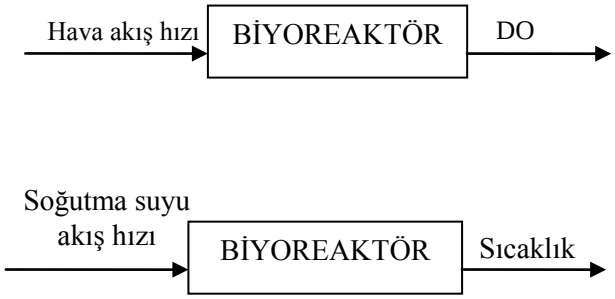
VII. Sinyal (işaret) türüne göre

Kontrol sisteminde sinyaller sürekli (analog/continuous) sinyal ve kesikli (dijital/discrete) sinyal olarak iki gruba ayrılmıştır. Normalde prosesler giriş ve çıkış değişkenlerine göre zamanın sürekli fonksiyonudur. Kontrol sinyalleri sürekli olan sistemlere sürekli-zaman kontrol sistemi denir. Çıkış değişenin değeri sistemden belirli aralıklar (örnekleme zamanı) ile alınması durumunda sistem, kesikli zaman kontrol sistemi olarak adlandırılır (Sivanagaraju ve Devi 2008).

VIII. Kontrol edilen değişken sayısına göre

Bir sistemde, tek ayar değişkeni ile tek kontrol edilen değişken (bir tane kontrol döngüsü) olması durumuna tek girdili-tek çıktılı kontrol (SISO) sistemi, birden fazla ayar değişkeni ile birden fazla kontrol edilen değişkenin (birden fazla kontrol döngüsü) olması durumuna çok girdili-çok çıktılı kontrol (MIMO) sistemi olarak adlandırılır (Sivanagaraju ve Devi 2008). Bu çalışmaya ait SISO sistem blok

diyagramları şekil 4.4'de ve MIMO sistem blok diyagramları şekil 4.5'de verilmiştir. Bunların yanı sıra tek ayar değişkeni ile çok kontrol edilen değişken olması durumunda tek girdili-çok çıktılı kontrol sistemi (SIMO) ve çok ayar değişkeni ile tek kontrol edilen değişken olması durumunda çok girdili-tek çıktılı kontrol sistemi (MISO) gibi adlandırılan sistemler de bulunmaktadır.

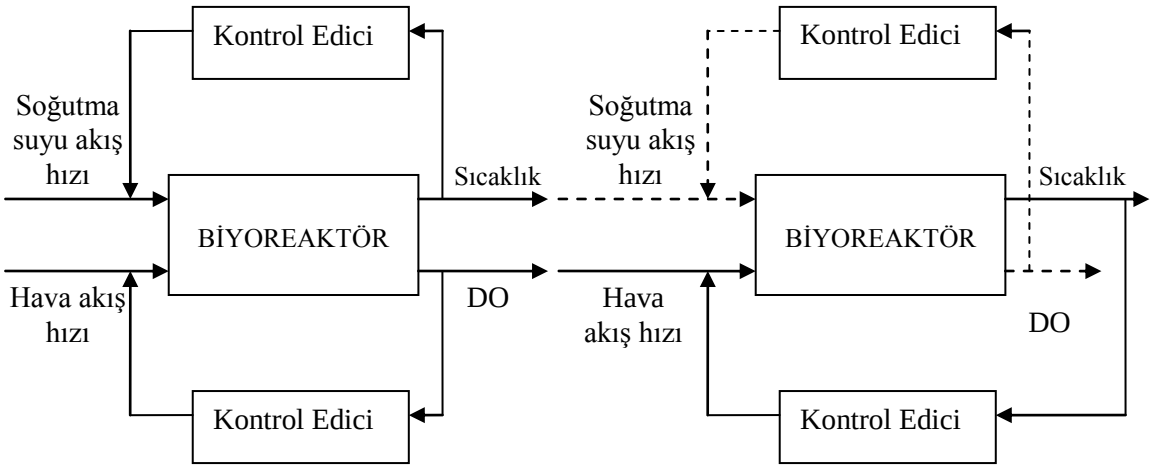


Şekil 4.4 SISO sistem blok diyagramları



Şekil 4.5 MIMO sistem blok diyagramı

MIMO sistemlerde bir kontrol hat seçimi söz konusudur. Daha ayrıntılı anlatılacak olursa, sıcaklık kontrolu için soğutma suyu akış hızı yerine hava akış hızı, DO kontrolu için hava akış hızı yerine soğutma suyu akış hızı seçilebilirdi. Ancak bu seçim de ayarlanabilen değişkenlerin kontrol edilen değişkenler üzerindeki etkileri az olacağı için kontrol etkinliği de düşük olacaktır. Bu nedenle çalışmada kullanılan hava akış hızı-DO, sıcaklık-soğutma suyu akış hızı hattı seçilmiştir. Şekil 4.6'de kontrol hat seçenekleri görülmektedir.



Şekil 4.6 İki girdili-iki çıktılı kontrol sistemi için kontrol hat seçenekleri (Stephananopoulos 1984)

IX. Set Noktasına göre

Kapalı döngü kontrol sırasında sisteme verilen set noktası değişimine göre, set noktasına nadiren değişim verilmesi durumunda regulator sistem, set noktası sık sık değişim verilmesi durumunda da takip (follow-up) sistemi olarak ikiye ayrılır.

X. Prosesin işletimine göre

Bilindiği gibi prosesler üretilecek ürüne, kapasiteye göre işletim şekilleri değişmektedir. Kesikli işletim, yarı kesikli işletim ve sürekli işletim olarak ayrılmaktadır. Proses kontrolde de işletim türüne göre sınıflandırma yapılır. Örneğin kesikli işletilen bir sistem içim için kesikli sistemde proses kontrol olarak adlandırılır.

Ayrıca bu bölümde, proses robotik kontrol veya sayısal kontrol olarak da makine kontrolu açısından da değerlendirilebilir.

XI. Kontrol edicinin konumuna göre

Sistem ile kontrol edicinin bulundukları mekana göre adlandırma yapılır. Sistem bir laboratuvarda ya da herhangi bir binada olup kontrol edicinin de yanında oldu sistemlere distributed kontrol, sistem ile kontrol edicinin ayrı yerlerde (özellikle büyük entegre işletmelerde) olduğu merkezi kontrol olarak iki ayrılır.

4.2 Bağıl Kazanç Analizi (Relative Gain Analysis)

Bu bölüme kadar anlatılanlar ışığında çoğu prosesin özellikle biyoproseslerin birçok işletim parametresinin önemli olduğu ve kontrol edilmesinin gerekli olduğu görülmektedir. Bir sistemde tek kontrol döngüsü ile kontrol etmenin yetersiz kalabileceği açıktır. Bu durumda birden fazla ayar değişkenin ve kontrol edilen değişkenin oldu MIMO kontrol uygulamasının yapılması gerekir. Birden çok kontrol döngüsünün kullanıldığı MIMO kontrol sistemlerinde ayarlanabilen değişkenler ve kontrol edilen değişkenler arasında etkileşimler meydana gelebilir (Stephananopoulos 1984, Shinskey 1988). Bu etkileşimler çıkış değişkenlerinin bazıları veya tümü üzerinde olumsuz etki yapmakta ve etkin kontrol yapılmasını engellemektedir. Bu durumda kontrol edilen değişkenlerin, giriş değişenlerinden ne kadar etkilendiğinin tespit edilmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden bir tanesi de Bağıl Kazanç Analizi (RGA) Yöntemi'dir.

Bu doktora tezi kapsamında kesikli bir biyoreaktörde hem DO hem sıcaklık kontrol edilmiştir. DO'nun kontrolu amacıyla ayarlanabilen değişken olarak seçilen hava akış hızı değişimlerinden sıcaklık, sıcaklığı kontrol etmek amacıyla ayarlanabilen değişken olarak seçilen soğutma suyu akış hızından ise dolaylı olarak DO etkilenmektedir. Etkin bir kontrol sağlanması amacıyla bu etkileşimlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu amaçla RGA yönteminin ileri beslemeli (feedfoward) coupling türü kullanılarak giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleri üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlar bölümünde verilmiştir. Bu yöntemin blok diyagramı şekil 4.4'de verilmiştir. Burada çıkış değişkenleri (Tham 1999, Willis 1999);

$$y_1 = G^P_{11}u_1 + G^P_{12}u_2 \tag{4.1}$$

$$y_2 = G^P_{21}u_1 + G^P_{22}u_2 \tag{4.2}$$

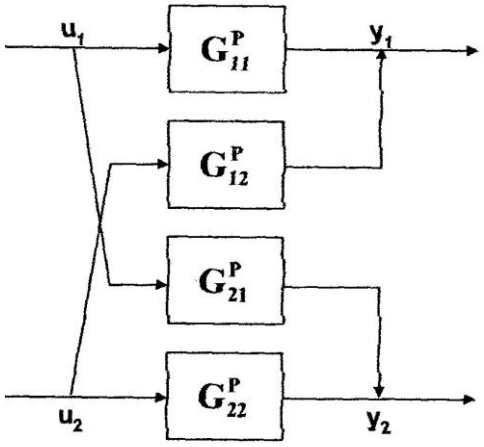
olarak ifade edilebilir. Eşitlik (4.1) ve Eşitlik (4.2) kapalı olarak aşağıdaki gibi de gösterilebilir:

$$y = G^P u \tag{4.3}$$

G^P iletim fonksiyonlarının bulunmasına örnek olarak Eşitlik (4.4) verilebilir. Buna göre;

$$G^P{}_{11}\Big|_{u_2} = \frac{\Delta y_1}{\Delta u_1}\Big|_{u_2} \tag{4.4}$$

Bu tez kapsamında seçilen giriş değişkenleri, çıkış değişkenleri ve iletim fonksiyonları açısından, incelenecek olursa; u_1 hava akış hızı, u_2 soğutma suyu akış hızı, y_1 DO ve y_2 sıcaklık olmak üzere, hava akış hızı $G^P{}_{11}$ iletim fonksiyonu ile DO' yu etkilerken ayrıca $G^P{}_{21}$ iletim fonksiyonu ile de sıcaklığı etkilemektedir. Aynı şekilde soğutma suyu akış hızı $G^P{}_{22}$ iletim fonksiyonu ile sıcaklığı etkilerken aynı anda $G^P{}_{12}$ fonksiyonu ile de DO' yu etkilemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi etkin bir kontrol yapılabilmesi için bu etkileşimin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu nedenle, ayarlanabilen değişkenlerin, ilgili olmayan kontrol edilecek değişkenler üzerine olan etkisini ortadan kaldırmak için etkileşim önleyici (decoupler) katsayısının hesaplanması ve kullanılması gerekmektedir. Bu tez kapsamında etkileşim önleyici için yapılan RGA çalışmalarına ait deneyler Bölüm 9'da verilmiştir. Decoupling (etkileşim önleyici) kontrol sistemi Bölüm 4.2.1'de anlatılmıştır.



Şekil 4.7 2 girdili-2 çıktılı sistemin blok diyagramı (Tham 1999, Willis 1999)

4.2.1 Etkileşim önleyici (decoupler) kontrol sistemi

Etkileşim önleyici (decoupler) uygulamalı kontrol blok diyagramı şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi proses iki girdili iki çıktılı bir özelliğe sahiptir. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi biyoreaktör sıcaklığı hem soğutma suyu akış hızından hem de hava akış hızından etkilenmektedir. Benzer şekilde DO da hava akış hızından direkt ve soğutma suyu akış hızından da dolaylı olarak etkilenmektedir. Hem sıcaklığı hem de DO'yu eşanlı kontrol etmek istediğimizde ayarlanabilen değişkenler olan soğutma suyu akış hızını ve hava akış hızını aynı zamanda sisteme uygulamak gerekir. Bu durumda yukarıda bahsettiğimiz etkileşme olmaktadır. Bu etkileri yok etmek için etkileşim önleyici uygulamalı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemle, ayarlanabilen değişken olarak seçilen iki giriş değişkeninin kontrol edilen değişkenler olan çıkış değişkenleri üzerine olan etkileri istenen şekilde azaltılmaktadır. etkileşim önleyici uygulamalı kontrol D_1 ve D_2 katsayıları ile gerçekleştirilir. Bu katsayılar, RGA analizi ile bulunan G iletim fonksiyonları kullanılarak

$$D_1 = -\frac{G^P{}_{12}}{G^P{}_{11}} \tag{4.5}$$

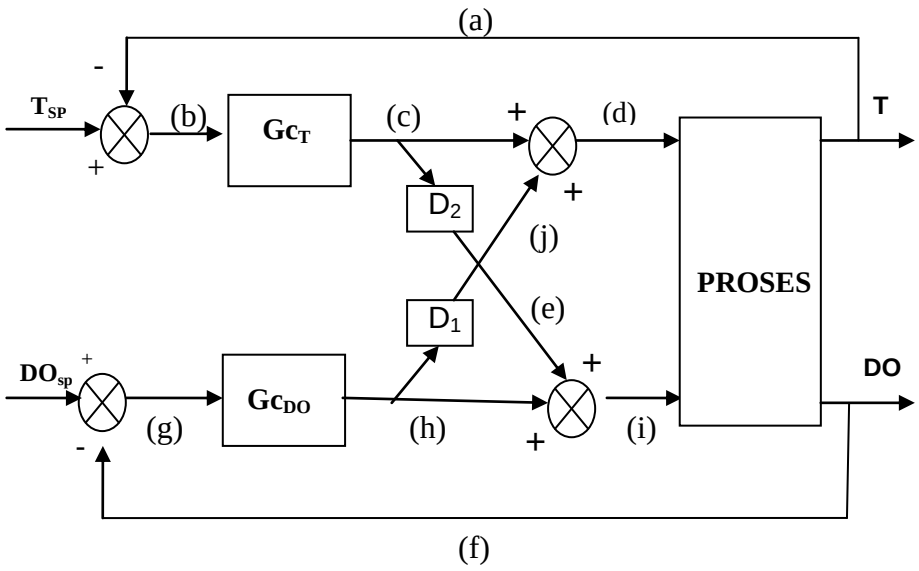
$$D_2 = -\frac{G^P{}_{21}}{G^P{}_{22}} \tag{4.6}$$

olarak hesaplanabilir.

Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi etkileşim önleyici (decoupler) uygulamalı kontrolde, sıcaklık ölçerden (termoçift) alınan sinyaller (a), Tset noktası ile karşılaştırılır ve hata sinyali (b) oluşturulur. Bu hata sinyali Gc_T ile gösterilen sıcaklık için oluşturulan kontrol ediciye gönderilir. Kontrol ediciden hesaplanan ayarlanabilen değişken sinyali (c) hem DO'yu ayarlayan hava akış hızı sinyaline hem de soğutma suyu akış hızını ayarlayan son kontrol elemanına gider (e). Ancak sisteme gönderilecek soğutma suyu akış hızı sinyali arada hava akış hızının etkisini yok eden D_1 etkileşim önleyici katsayısı ile

çarpılan hava akış hızı sinyali (j) ile toplanır ve son kontrol elemanına gönderilerek prosese uygulanır.

Benzer şekilde; DO ölçerden alınan sinyaller (f), DOset noktası ile karşılaştırılır ve hata sinyali (g) oluşturulur. Bu hata sinyali Gc_{DO} ile gösterilen DO için oluşturulan kontrol ediciye gönderilir. Kontrol edicinin hesapladığı sinyal (h) hem T'yi ayarlayan soğutma suyu akış hızı sinyaline hem de hava akış hızını ayarlayan son kontrol elemanına gider. Ancak sisteme gönderilecek hava akış hızı sinyali arada soğutma suyu akış hızının etkisini yok eden D_2 etkileşim önleyici ile çarpılan soğutma suyu akış hızı sinyali (e) ile toplanır ve son kontrol elemanına gönderilerek prosese uygulanır.

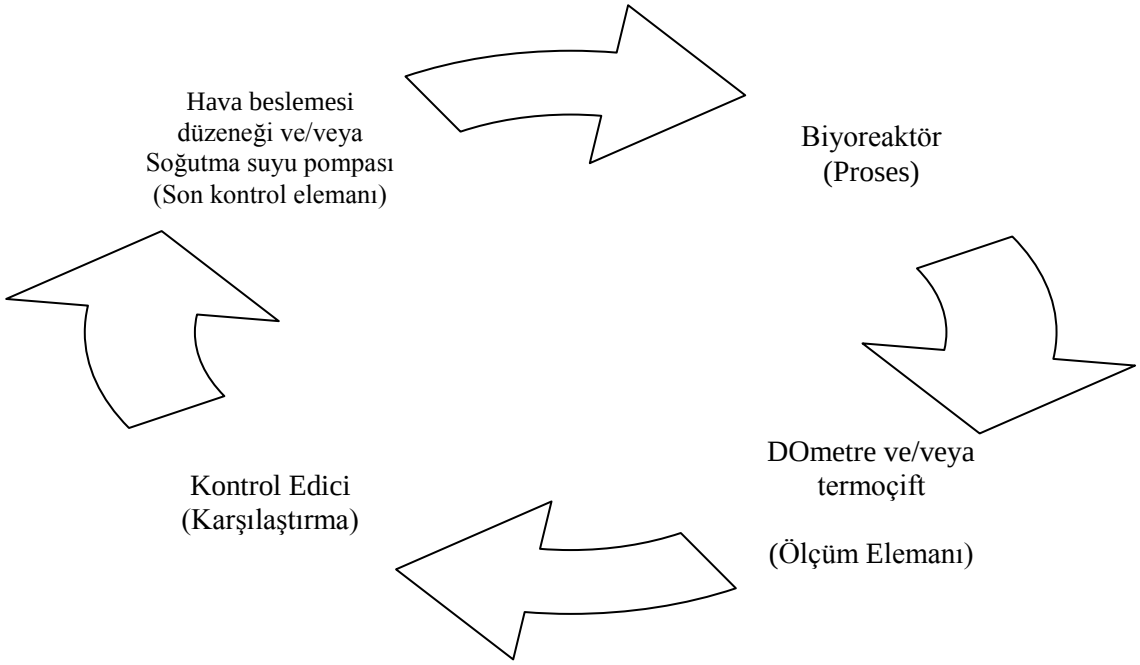


Şekil 4.8 Etkileşim önleyici (decoupler) kontrol blok diyagramı[2] (Stephananopoulos 1984, Dong vd. 2011'den esinlenerek hazırlanmıştır.)

[2]Proses ve son kontrol elemanı birlikte proses olarak gösterilmiştir.

4.3 Fermantasyon Teknolojisinde Proses Kontrol

Bu doktora tezinin amacının, ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği bir biyoreaktörde ürün veriminin arttırılması amacıyla çok girdili çok çıktılı kontrolun uygulanması olduğu için bu bölümde kısaca fermentasyon proseslerindeki kontrol ile ilgili bilgiler verilecektir. Bu kısıma kadar Bölüm 4'te anlatılanları bilgiler ışığında, bir kontrol çevrimi proses, ölçme, karşılaştırma ve son kontrol elemanı olmak üzere dört öğeden oluşmaktadır. Bu öğeler, bu doktora tezi çalışması için şekil 4.9'da uyarlanmış olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Kontrol çevrimi (Akçalı 2011'den esinlenerek hazırlanmıştır)

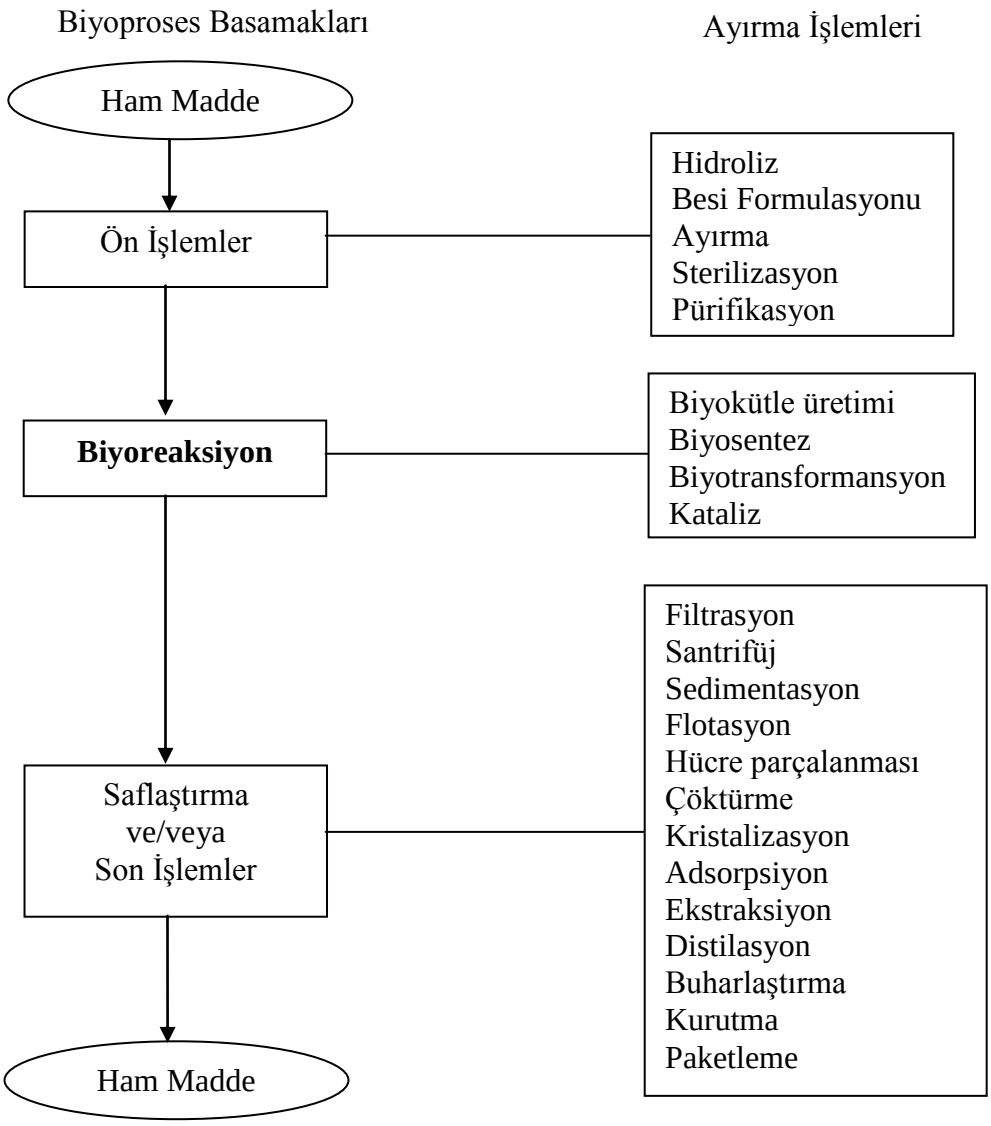
Biyoteknolojik proseslerde, üretim sistemi insan vücudu gibi düşünülürse; kalbini biyoreaktöre, beynini de kontrol ediciye benzetebiliriz. Kalp olmadan hayat devam edemeyeceği gibi biyoreaktör olmadan üretim olmayacaktır. Beyin olmadan (ve/veya sağlıklı olmadan) vücudun düzgün hareket edemeyeceği açıktır. Beyine benzetilen kontrol edicinin olmaması ve/veya doğru çalışmaması durumunda da üretim prosesinin doğru, güvenli, verimli vb şekilde işletilmesi mümkün olmayacaktır. Sonuç olarak

verimli, güvenli, istenilen özelliklerde ürün üretmek isteniyorsa kontrolun gerekliliği açıktır.

Proses akışını göz önünde bulundurduğumuzda ürünün elde edilmesi için gerçekleşen reaksiyonların genellikle tamamının gerçekleştiği birim olan reaktörleri, reaksiyon türüne göre kimyasal reaktör ve biyokimyasal reaktör olarak iki gruba, işletim türüne göre de kesikli, yarı kesikli, sürekli olarak üçe ayırabiliriz. Biyokimyasal reaktörler için biyoreaktör, biyolojik reaktör, mikrobiyal reaktör ve fermentör olarak da adlandırılmaktadır. Bu doktora kapsamında deneysel çalışmalarda soğutma ceketli kesikli bir biyoreaktör kullanılmıştır.

Biyoprosesler, mikroorganizmaların ve/veya canlı organizmaların önemli rol oynadığı, besi ortamını yararlı ürünlere çevirirler (Jana 2008). Bu süreç oldukça uzun ve dikkat edilmesi gereken basamaklar içermektedir. Jana (2008) tarafından bildirildiğine göre, Moo-Young ve Blanch (1981) bir biyoprosesi şekil 4.10'den de görülebileceği gibi üç basamağa ayırmışlardır. Bahsedilen her bir basamak ürünün kalitesi, seçimliliği ve sağlık başta olmak üzere birçok neden dolayı çok önemlidir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, şekil 4.10'deki işlemlerden, besi formulasyonu, sterilizasyon, biyokütle üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler Bölüm 8'de ve 9'da anlatılmıştır.

Biyoreaktörlerde sıcaklık, çözünmüş oksijen derişimi, pH ve substrat derişimi gibi pek çok işletim parametresinin kontrolu gerçekleştirilmektedir. Fermentasyon prosesinin etkin kontrolü için reaksiyon mühendisliği, akışkanlar mekaniği, ısı aktarımı, kütle aktarımı bilgileri kullanılarak uygun biyoreaktör sisteminin oluşturulması ve enstrümantal analiz, ölçüm ile kontrol teknikleri bilgileri ile ölçüm ve analiz cihazlarının temin edilmesi önemlidir. On-line olarak proses kontrolde, ölçme ve kontrolün yapılabilmesi pH, sıcaklık, DO gibi sistemin parametrelerinin on-line ölçümünün gerçekleştirilebilmesine uygun ölçerlerin ve gerekirse elektrik ve/veya elektronik ekipmanların seçilmesi gerekir.



Şekil 4.10 Biyoproses basamakları (Jana 2008)

Proses kontrolde olduğu gibi fermentasyon proseslerinde de kontrol edilen değişken ve ayarlanabilen değişken seçimi önemlidir. Sistemde bir çıkış değişkenini etkileyen birden fazla giriş değişkeni, bir giriş değişkeni birden fazla çıkış değişkenini etkiliyor olabilir. Etkin olarak kontrolun sağlanabilmesi ayarlanabilen değişken ve/veya değişkenlerin seçimi önemlidir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi bir kontrol edilen değişkeni kontrol etmek için birden fazla ayarlanabilen değişken seçilebilir ve/veya seçim alternatifi olabilir. Bu seçim sisteme, kontrol etkinliğine, maliyetlere, mikroorganizma derişimine ve olanaklara göre değişiklik gösterebilir.

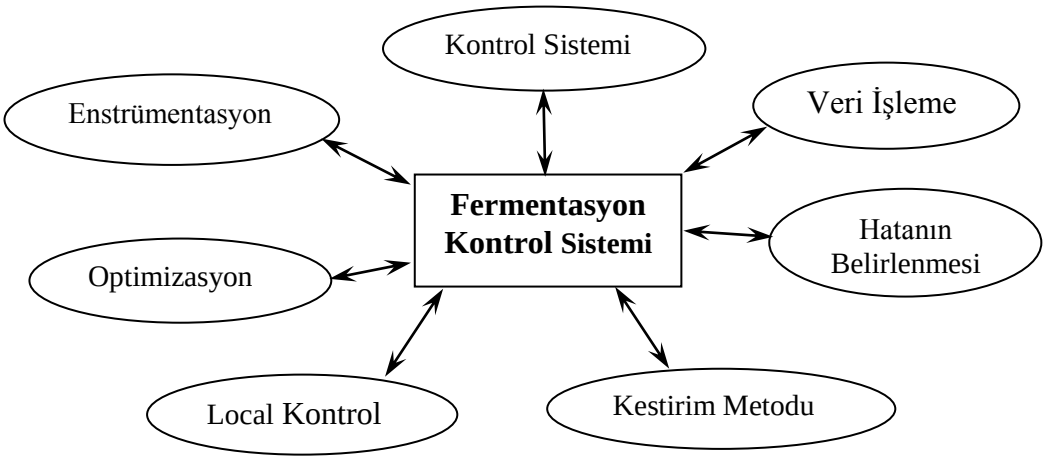
Çizelge 4.1 Ayarlanabilen değişken alternatifleri örnekleri

Kontrol Edilen Değişken (Çıkış Değişkeni)	**Ayarlanabilen Değişken (Giriş Değişkeni)**
Biyoreaktör Sıcaklığı	Soğutma Suyu Akış Hızı Soğutma Suyu Sıcaklığı Dalgıç Isıtıcı Gücü
Çözünmüş Oksijen Derişimi	Hava Akış Hızı Karıştırma Hızı Beslenen Oksijen (Hava) mol kesri
pH	Asit Akış Hızı Baz Akış Hızı Tampon Akış Hızı
Substrat Derişimi	Substrat Akış hızı
Karbondioksit Derişimi	Hava Akış Hızı Beslenen Oksijen (Hava) mol kesri
Etanol Derişimi	Hava Akış Hızı Beslenen Oksijen (Hava) mol kesri Substrat Akış hızı

Bu doktora tezi kapsamında kontrol edilen değişkenler için seçilen ayarlanabilen değişkenlerin seçimine bakılacak olursa, biyoreaktör sıcaklığının kontrolu için çizelge 4.1'den de görülebileceği gibi üç farklı ayarlanabilen değişken seçilebilir. Ancak bunları mikroorganizma derişimi, etkinlik ve maliyetleri göz önünde bulundurulursa; soğutma suyu sıcaklığı değişimi ile kontrol edilecek olursa, ceketten geçirilecek akışkanın ısınması/soğuması için geçecek zaman kontrol etkinliğini düşürecek aynı zamanda ekstra enerji harcanmasına neden olacaktır. Dalgıç ısıtıcıdan verilen ısı ayarlanabilen değişken olarak seçilecek olursa da yüksek ısı verildiği durumlarda mikroorganizmalar bundan direk etkileneceği için verim düşüklüğüne neden olacaktır. Sonuçta, kontrol edilen değişken olan biyoreaktör sıcaklığını için en uygun ayarlanabilen değişkenin bu üç alternatif arasından soğutma suyu akış hızı olduğu görülmektedir.

Benzer seçimi, DO kontrolu içinde yaparsak; karıştırma hızının DO üzerindeki etkisi daha fazla olmasına (Boyacıoğlu 2004) karşın yüksek karıştırma hızlarında mikroorganizmanın hücre çeperi zarar göreceği için uygun bir seçim olmayacaktır. Ayarlanabilen değişken olarak, beslenen hava veya oksijen mol kesri seçiminde ekstra enerji ve ekipmanlara ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumlar göz önünde bulundurularak kontrol edilen değişken olan DO için en uygun ayarlanabilen değişkenin bu üç alternatif arasından hava akış hızı olduğu görülmektedir. Bölüm 4.1'de MIMO çalışmalar için bu ayarlanabilen değişken hat seçimleri de ayrıca değerlendirilmiştir.

Fermentasyon sisteminde etkin bir kontrolün gerçekleştirilebilmesi için gereken bileşenler şekil 4.11'de verilmiştir (Montague 1997). Bu bileşenler incelendiğinde, iyi bir kontrol perfomansı için her bir bileşenin oluşturulması sırasında özen gösterilmesi gerekmektedir. Bu bileşenlerden birinin yanlış veya eksik seçilmesi kontrol performansını düşürecektir. Ürün verimliliği, seçimliliği, güvenlik ve ekonomi gibi nedenlerden dolayı başta prosesin konusundaki bilgilerin ve kontrol bilgilerinin bütünleştirilmesi gerekir. Bu tez kapsamında bu bileşenler ayrı bölümlerde anlatılmış, deneysel ile teorik çalışmalarda kullanılmış ve uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Fermantasyon kontrol sistemi bileşenleri (Montague 1997)

5. SİSTEM TANIMLAMA

Bölüm 4'te bir bütünü oluşturan, birbiri ile bağlı ya da belli bir işlev için bir araya getirilmiş olan elemanların düzenine, topluluğu ya da kümesi sistem olarak tanımlanmıştı. Bu bölümde de bir sistemin nasıl ifade edebileceğinden, hangi yöntemlerle belirlenebileceğinden kısaca bahsedildikten sonra bu doktora tezi kapsamında kullanılan yöntem anlatılacaktır.

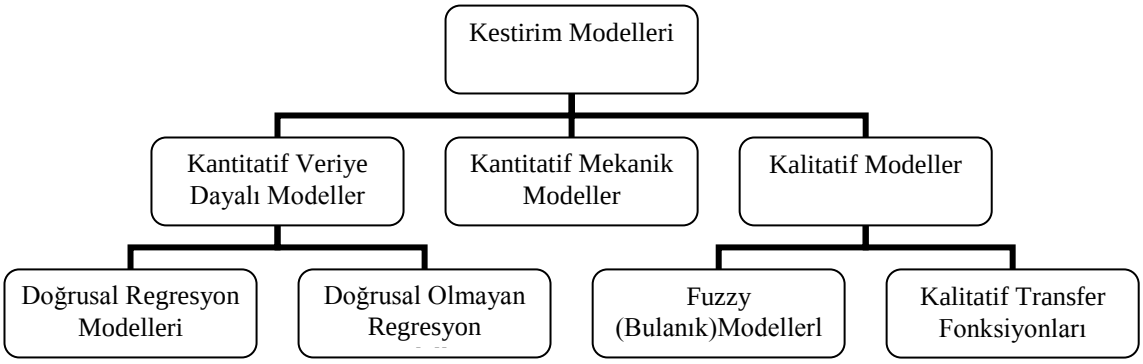
Bir sistemde çalışılmadan önce sistemin alt ve üst limitlerinin bilinmesi, hangi durumda ne yapılabileceği konusunda bilgi sahibi olunması gibi nedenlerle o sistemin çok iyi bilinmesi gerekir. Amaç bu sistemi kontrol etmek ise yapılması gerekenlerin başında, sistemin giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki bağıntıların elde edilerek kontrol sırasında önemli bir yeri olan, sistemin modelinin belirlenmesi gelir. Sistemin modelinin belirlenmesinde hem online benzetimler hem de offline benzetimler kullanılabilir.

Bir sistemin kontrol edilebilmesi için önce o sistemi çok iyi ifade etmek gerekir. Bunun için sistemi tanımlayan kütle-enerji denklemleri kullanılabileceği gibi deneysel çalışmalar sonucu elde edilecek modellerin kullanılması da mümkündür. Kontrol sistemini ve/veya onu oluşturan bileşenler arasındaki ilişkiyi ifade eden denklemler bütününe o sistemin ya da bileşenlerin matematik modeli denir. Genellikle her kontrol sistemini ve bileşenlerini fizik, kimya, matematik gibi pozitif bilimlere ait yasa ve bağıntılar kullanarak kuramsal bakımdan ifade etmek mümkündür. Çizelge 5.1'de matematiksel modellerin dört farklı (süperpozisyon, zamanla değişen/değişmeyen, boyut, süreklilik) kriter göz önünde bulundurarak oluşturulan sınıflandırması yer almaktadır.

Çizelge 5.1 Sistem Modellerinin Sınıflandırılması (Shearer vd 1997)

Model Türü	Kriter Sınıflandırması	Model Denklemi Türü
Doğrusal olmayan	Süperpozisyon kuralı uygulanamaz	Doğrusal olmayan diferansiyel denklemler
Doğrusal	Süperpozisyon kuralı uygulanabilir	Doğrusal diferansiyel denklemler
Dağıtılmış	Bağımlı değişkenlerin üç boyutlu koordinatlarının ve zamanın fonksiyonudur	Kısmi diferansiyel denklemler
Lumped	Bağımlı değişkenlerin üç boyutlu koordinatlarının fonksiyonudur	Adi diferansiyel denklemler
Zamanla değişen	Model parametrelerinin zamanla değişir	Zamanla değişen parametreli diferansiyel denklemler
Zamanla değişmeyen	Model parametrelerinin zamanla değişmez	Sabit parametreli diferansiyel denklemler
Sürekli	Bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerin aralığında sürekli tanımlı	Diferansiyel denklemler
Kesikli	Bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerin sadece farklı değerlerinde tanımlanmış	Fark-zaman denklemleri

Kontrol sistemi dinamik yani zamana bağlı değişkenler içerdiklerinden, söz konusu ifadeler bir dizi diferansiyel eşitlikler şeklinde olabilir. Sistemin modelini oluşturmak için birçok model yapısı alternatifi bulunmaktadır (Şekil 5.1).

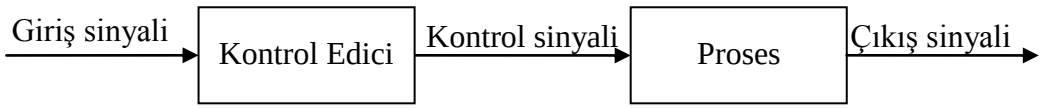


Şekil 5.1 Kestirim Model Formları

Bir sistemi, tam anlamıyla tanımlamak için kütle-enerji denklemleri bazen yetersiz kalabilmektedir. Özellikle zamanla özellikleri değişen sistemler, canlı ortamların bulunduğu biyoprosesler söz konusu olduğunda analitik denklemler daha da yetersiz kalmaktadır. Bu durumda da denklemlerin, deneyler yapılarak katsayılar ile tekrar düzenlenmesi gerekmektedir. Biyoprosesleri kütle-enerji denklemleri ile tam anlamıyla ifade etmek ya çok daha zor ya da biyotepkimenin belirli bir kısmında geçerli olabilmektedir. Bu nedenle, canlı bir ortamın bulunması ve zamanla birçok işletim parametresinin değişmesi nedeniyle biyoproseslerin sistem tanımlama metotları kullanılarak modelinin oluşturulması çoğu zaman daha kullanışlı olmaktadır. Sistem tanımlama, günümüzde ölçüm elemanlarının artmasıyla, biyokimyasal, kimyasal bir sistemin tanımlanmasının yanı sıra insan vücudunun modellenmesi (Mahfouf 2002) amacıyla da kullanılmaktadır.

Sistem tanımlamayı, sistemin giriş değişkenine verilen basamak, kare, rastgele vb. etkiler sonucunda çıkış değişkenin değişimi kullanılarak model belirlenme olarak ifade edebiliriz. Varsayılan modelin deneysel veriler ile karşılaştırılarak uygunluğu test edilir. Sistem tanımlamada parametrik ve parametrik olmayan modeller kullanılabilir

Sistem tanımlamanın yapılacağı sistemin şekil 5.2'de verildiği gibi açık hatta olması gerekir. Böyle bir sistemde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, sistemi en iyi şekilde tanımlayan model belirlenmeye çalışılır. Model belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılabilir.



Şekil 5.2 Açık Hat kontrol sistemi (Shearer vd 1997)

Bu tez kapsamında, sistemin modeli oluşturulurken sistem tanımlama metodu kullanılması tercih edilmiş ve modelin parametrelerinin hesaplanmasında parametrik yöntemlerden biri olan Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi kullanılmıştır.

5.1 Sistem Tanımlamada Kullanılan Sinyaller

Sistemin giriş değişkenine verilecek olan sinyalin seçimi sistem tanımlamanın önemli basamaklarından biridir. Çünkü sistemi iyi tanımlayabilmek için sinyalin büyüklüğü, genliği ve periyodu önemlidir. Sistem tanımlamada kullanılan sinyallerden bazıları aşağıda anlatılmıştır.

Basamak etki: Sisteme basamak etki aşağıdaki gibi verilebilir.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ A & t\geq 0 \end{cases}$$

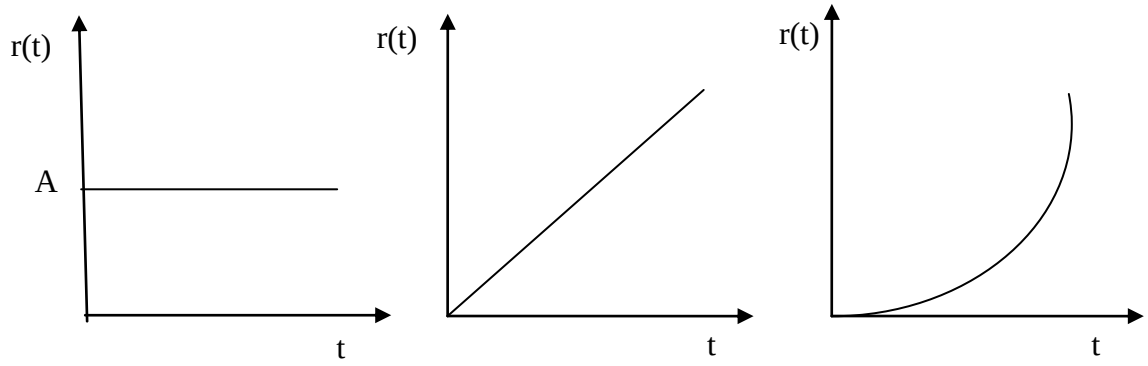
Basamak etkinin laplace formu A/s'dir. Bu sinyalin verileceği sistemde gürültünün sistem dinamiğini etkilemeyecek büyüklükte olması şarttır. Uygulanacak olan u_o değeri sisteme uygun olarak seçilmelidir (Anand 1984, Söderström ve Stoica 1989). Şekil 5.3.a'de sisteme verilen basamak etki görülmektedir.

Ramp etki: Sisteme verilen ramp etki aşağıdaki gibi verilebilir. Ramp etkinin laplace formu A/s^2'dir. Şekil 5.3.b'de sisteme verilen ramp etki görülmektedir. Çok kullanılan bir sinyal türü değildir.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ At & t\geq 0 \end{cases}$$

Parabolik etki: Sisteme verilen parabolik etki aşağıdaki gibi verilebilir. Parabolik etkinin laplace formu $2A/s^3$'dir. Şekil 5.3.c'de sisteme verilen ramp etki görülmektedir. Çok kullanılan bir sinyal türü değildir.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ At^2 & t\geq 0 \end{cases}$$



a) Basamak Etki b) Ramp Etki c) Parabolik Etki

Şekil 5.3 Doğrusal geri beslemeli kontrol için test sinyalleri (Anand 1984)

Kare dalga sinyali: Sistem tanımlamada çok yaygın olarak kullanılan, periyodu ve genliği sabit olan bir sinyal türüdür. Sistem dinamiği göz önünde bulundurularak periyot ve genlik seçimi yapılmalıdır. Periyot sistemin zaman sabitinin yaklaşık altı katı olabilir. Kare dalganın uygulandığı bir sistemin çıkış sinyallerinin oluşturduğu görüntüye göre kabul edilebilirliği şekil 5.4'de gösterilmiştir (Welstead ve Zarrop 1991).

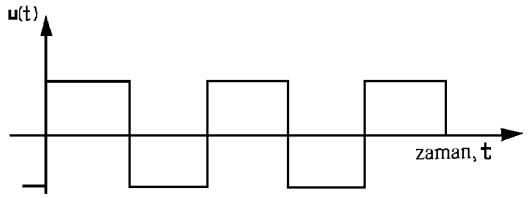
Sahte rastgele ikili ardışık sinyal (PRBS): Bir sistemin tanımlanmasında PRBS sinyal oldukça yaygın kullanılır. Kare dalgaya göre daha kapsamlı bir değişime sahiptir. Bir PRBS sinyal;

a) Belli bir zaman aralığında ($t=0,\ \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, ...$) $\pm$ a gibi iki genlik seviyesine ulaşır. Başka genlik değerlerini almaz.

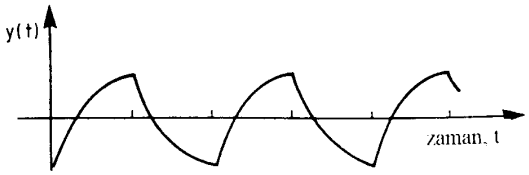
b) Gürültü içermediği varsayılan ve gelecekte alacağı değerlerin bilindiği belirli periyotlarla tekrarlanabilen bir sinyaldir.

c) PRBS sinyal $T_p = N\Delta t$ periyodu ile tekrarlanır. Bir periyotta bir seviyede $\frac{N+1}{2}$ aralık varsa, diğer seviyede $\frac{N-1}{2}$ aralık vardır ve N tek tamsayıdır.

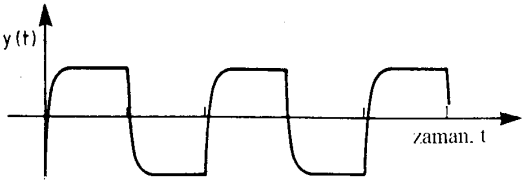
PRBS sinyal uygulanacağı zaman ± a genlik seviyesi, Δt ve N araştırmacı tarafından seçilir ve işletim koşulları arasında olmasına dikkat edilir. Çizelge 5.2'de ve şekil 5.5'de Kademe sayısı 3 ve periyot sayısı 7 olan PRBS sinyali örnek olarak verilmiştir.



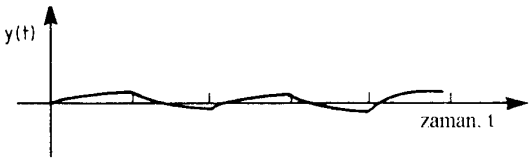
a) Kare dalga sinyal



b) Uygun bir sistem yanıtımı



c) Peryod açısından oldukça büyük değerde kare dalga seçiminde sistem yanıtımı

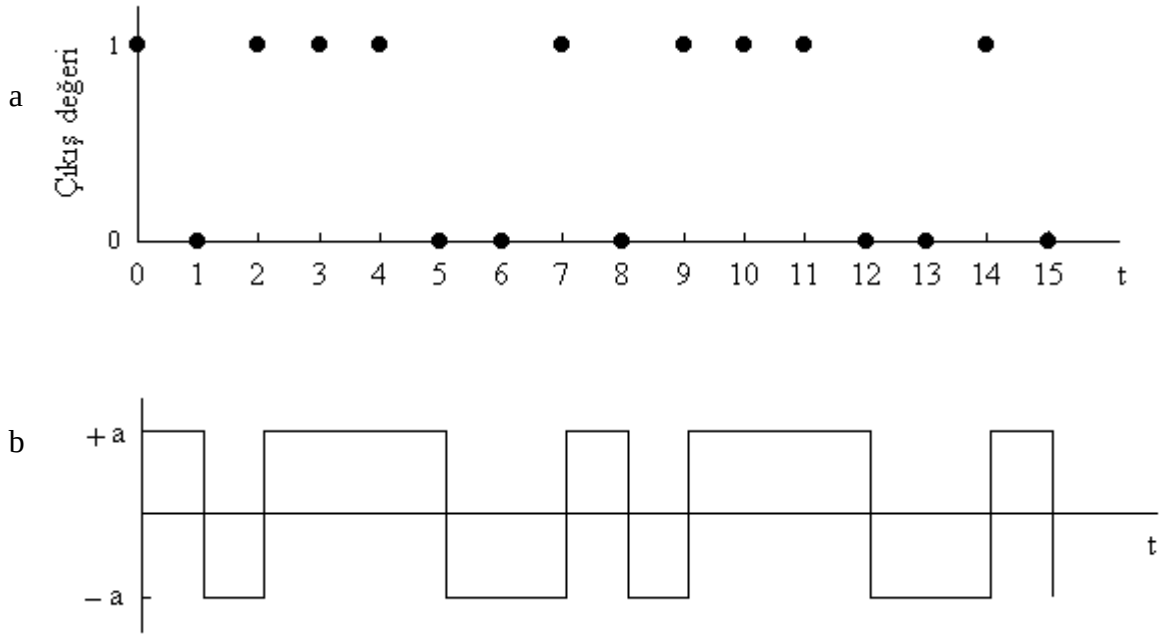


d) Genlik aşısından oldukça küçük değerde kare dalga seçiminde sistem yanıtımı

Şekil 5.4 Sistemin cevabına göre kare dalga periyodu ve genliğin seçimi

Çizelge 5.2 Periyot sayısı 7 olan sayaç pozisyon değerleri ve çıkış değerleri

Sayaç Pozisyonu	Çıkış Değerleri
1 0 1	1
1 1 0	0
1 1 1	1
0 1 1	1
0 0 1	1
1 0 0	0
0 1 0	0
1 0 1	1
1 1 0	0
. . .	.



Şekil 5.5 Kademe sayısı 3 ve periyot sayısı 7 olan PRBS sinyalin değerleri

a.Çıkış değerleri cinsinden PRBS sinyal b.Genlik cinsinden PRBS sinyal

5.2 Sistem Modelleri

Şekil 5.2'deki gibi bir açık hat sistem ele alındığında, kesikli zaman yapısında olmak üzere, u(t) giriş değişkeni, y(t) çıkış değişkeni ve e(t) gürültü, (t) zamanı gösteren bir tamsayı olmak üzere sistemin modeli Eşitlik 5.1'deki gibi kapalı olarak ifade edilebilir. Bu modeldeki sistem doğrusal kesikli sokastik olarak tanımlanmıştır (Spriet ve Vansteenkiste 1982, Raol vd. 2004).

$$y(t+1)=Ay(t)+Bu(t)+e(t) \tag{5.1}$$

Şekil 5.2'deki sistem gürültüsüz doğrusal fark eşitliği halinde aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$y(t)+a_1 y(t-1)+...+a_{na} y(t-na)=b_0 u(t)+b_1 u(t-1)+...+b_{nb} u(t-nb) \tag{5.2}$$

Eşitlik 5.2'de verilen fark eşitliğindeki a ve b katsayıları polinom olarak

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + ... + a_{na} q^{-na} \tag{5.3}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + ... + b_{nb} q^{-nb} \tag{5.4}$$

yazılırsa kesikli zaman iletim fonksiyonu şeklinde Eşitlik 5.5'teki gibi olur.

$$x(t) = \frac{B}{A} u(t) \tag{5.5}$$

Sistem tanımlamada bir başka önemli adım ise sistemin modelinin seçimidir. Tek girdili tek çıktılı bir sistemin doğrusal model yapısı en genel hali ile Eşitlik 5.6'da verilmiştir.

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} e(t) \tag{5.6}$$

Eşitlik 5.6'daki denklemin blok diyagramı şekil 5.6'deki gibidir. Burada A,B,C,D ve F birer polinom olmak üzere, polinomların açılımları Eşitlik 5.7-5.11'de gösterildiği gibidir.

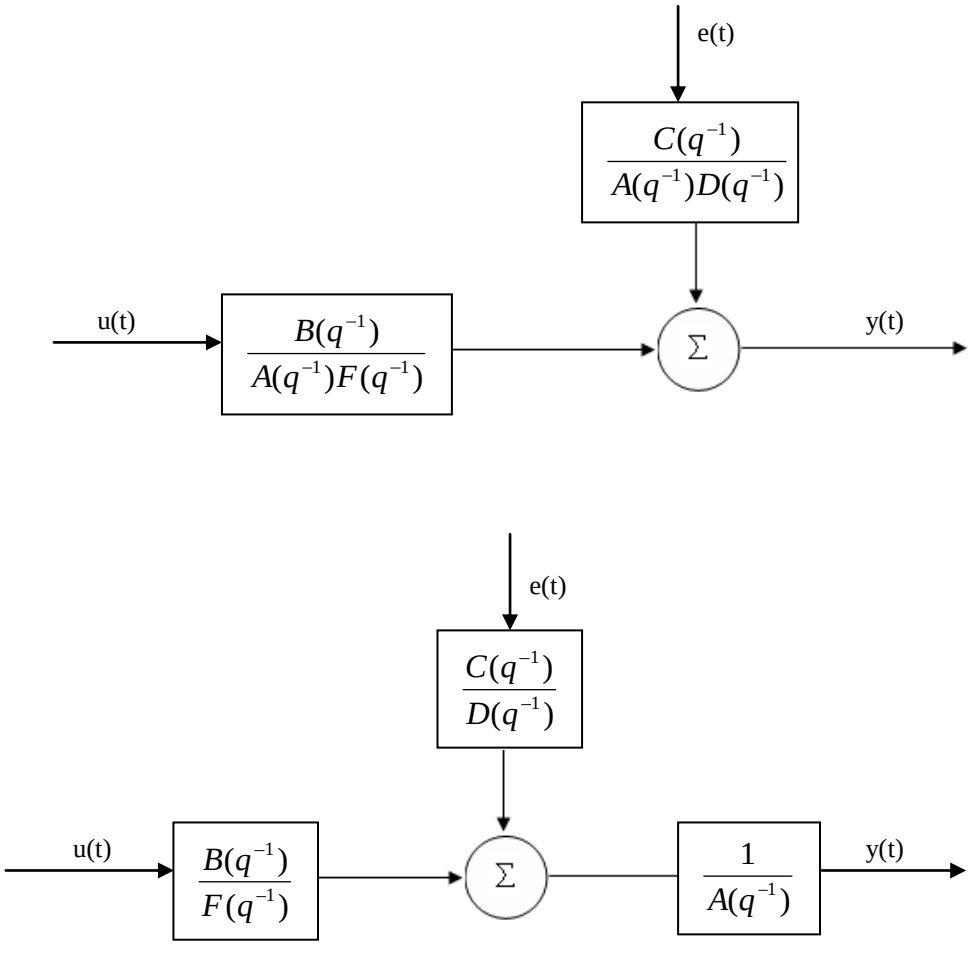
$$A = 1 + a_1 q^{-1} + ... + a_{na} q^{-na} \tag{5.7}$$

$$B = b_0 + b_1 q^{-1} + ... + b_{nb} q^{-nb} \tag{5.8}$$

$$C = 1 + c_1 q^{-1} + ... + c_{nc} q^{-nc} \tag{5.9}$$

$$D = d_0 + d_1 q^{-1} + ... + d_{nd} q^{-nd} \tag{5.10}$$

$$F = 1 + f_1 q^{-1} + ... + f_{nf} q^{-nf} \tag{5.11}$$



Şekil 5.6 Eşitlik 5.6'da genel olarak verilen bir SISO sisteminin model yapısının blok diyagramları (Söderström ve Stoica 1989)

Buna göre, Eşitlik 5.6'da verilen genel model yapısında bazı düzenlemeler yapılarak çizelge 5.3'de verilen değişik model yapıları oluşturulabilir (Ljung 1987).

Çizelge 5.3 Eşitlik 5.6'ya göre elde edilen değişik model yapıları

Kullanılan polinomlar	**Oluşan model yapısı**
AB	ARX
AC	ARMA
ABC	ARMAX
ABD	ARARX
ABCD	ARARMAX

Çizelge 5.3'de yer alan model yapılarından birini oluşturmak istersek; Örneğin A, B ve C polinomlarını içeren ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXogenous) (CARMA) model Eşitlik 5.12'deki gibi olur.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \qquad (5.12)$$

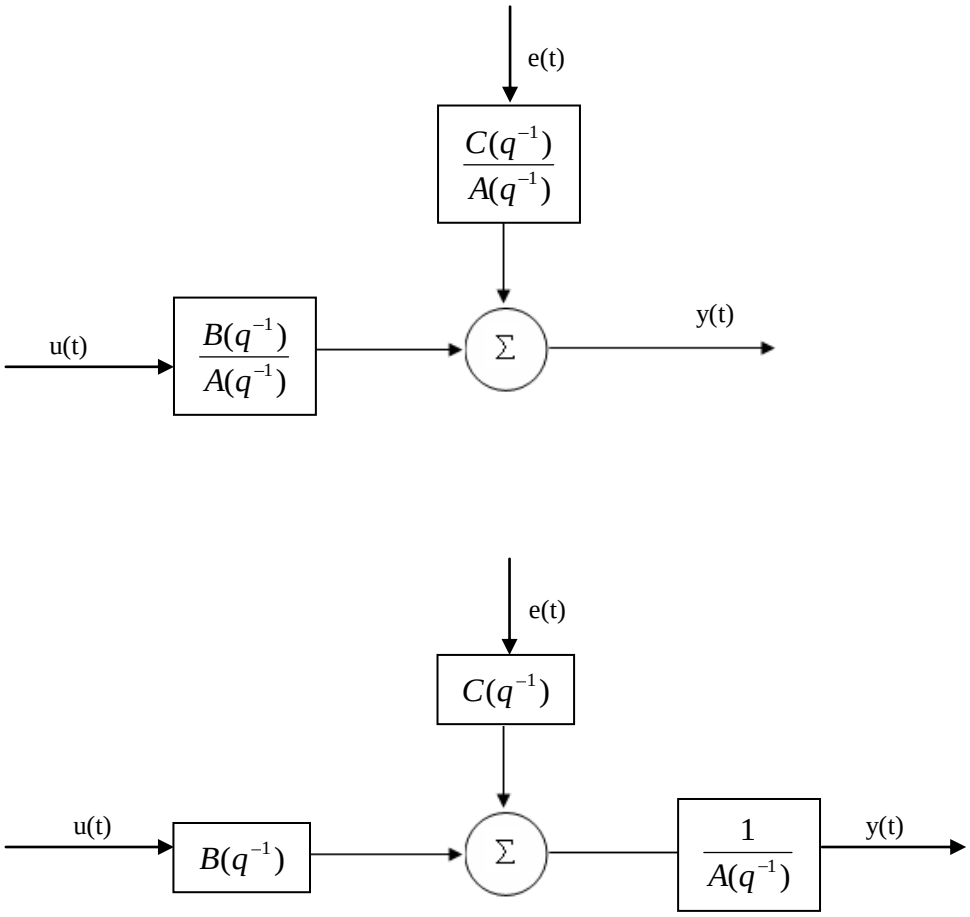
Bu model eşitliği fark eşitliği olarak yazılırsa,

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \ldots + a_{na} y(t-na) = b_o u(t-1) + \ldots + b_{nb} u(t-nb) + e(t) + c_1 e(t-1) + \ldots + c_{nc}(t-nc) \qquad (5.13)$$

Eşitlik 5.12 çıkış değişkenini verecek şekilde düzenlenirse aşağıdaki model elde edilir.

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} e(t) \qquad (5.13)$$

ARMAX model olarak adlandırılan Eşitlik 5.13'teki denklemin blok diyagramı şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7 Eşitlik 5.12'de verilen ARMAX model yapısının blok diyagramları (Söderström ve Stoica 1989)

Eşitlik 5.13 daha iyi gürültü tanımlaması yapılmak istenildiğinde integre edilmiş gürültü ile birlikte verilirse, $\Delta = 1 - q^{-1}$ fark işlemcisi ile ifade edilerek düzenlenirse;

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta A(q^{-1})}e(t) \tag{5.14}$$

olarak yazılabilir. Burada, Δ fark işlemcisi gürültü modeli içerisine bir integral ifadesi olarak konulmuştur. Bu durumda **ARIMAX** (**A**uto **R**egressive **I**ntegrated **M**oving **A**verage) elde edilir. C polinomu 1 olarak alındığında e(t) beyaz gürültü (white noise),

1'den farklı bir değer alındığında ise renkli gürültü (colored noise) olarak adlandırılır (Welstead ve Zarrop 1991).

Eşitlik 5.12 matris şeklinde ifade edilmek üzere yazılırsa;

$$\varphi^T = [-y(t-1) \ldots - y(t-na)\ u(t-1) \ldots u(t-nb)\ e(t-1) \ldots e(t-nc)] \quad (5.15)$$

$$\theta^T = [a_1 \ldots a_{na}\ b_0 \ldots b_{nb}\ c_1 \ldots c_{nc}] \quad (5.16)$$

Böylece çıkış değişkenini veri vektörü (φ) ve parametre vektörüne (θ) bağlayan Eşitlik 5.17 elde edilir.

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \quad (5.17)$$

Burada $\varphi^T(t)$ ile θ arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu nedenle parametre bakımından doğrusal denir ve parametre hesaplama algoritmalarının başlangıç noktasıdır. ARMAX model, integrasyon ile ARIMAX modele dönüşür. ARIMAX model yavaş düzensizliği olan sistemleri tanımlamada faydalı bir model türüdür. Bu durumda y(t) ve u(t) yerine Eşitlik 5.18 kullanılır.

$$\Delta y(t) = y(t) - y(t-1) \qquad \Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (5.18)$$

5.3 Model Parametrelerinin Hesaplanması

5.3.1 En Küçük Kareler Yöntemi (EKK)

EKK Yöntemi, doğrusal regresyonu temel alan bir yöntemdir. 1809 yılında Gauss tarafından gezegenleri izlemek için kullanmıştır (Söderström ve Stoica 1989). Eşitlik 5.17 ile tanımlanan parametreler bakımından doğrusal model göz önüne alınırsa, çıkış

değişkeni olan y(1), y(2), ..., y(N) ve φ(1), φ(2), ..., φ(N) kadar N tane ölçüm değeri olduğundan aşağıdaki eşitlikler her bir zaman adımı için yazılabilir.

$$\begin{aligned} y(1) &= \varphi^T(1)\theta + e(1) \\ y(2) &= \varphi^T(1)\theta + e(2) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ y(N) &= \varphi^T(1)\theta + e(N) \end{aligned} \tag{5.19}$$

Yukarıdaki eşitlikler vektörler olarak ifade edilirse,

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y(N) \end{bmatrix}, \qquad \phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix}, \qquad E = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e(N) \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Eşitlik 5.20'de verilen vektörler Eşitlik 5.19 yerine yazılırsa

$$Y = \phi\theta + E \tag{5.21}$$

Model tahmini (çıktısı), $\hat{\theta}$ tahmin edilen parametre olmak üzere Eşitlik 5.22'deki gibi yazılır.

$$\hat{y}(t) = \varphi^T(t)\hat{\theta} \tag{5.22}$$

Sistemden ölçülen çıkış değeri ile modelden elde edilen çıkış değerinin farkı tahmin hatasıdır ($\varepsilon(t)$). Tahmin hatası,

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \tag{5.23}$$

şeklinde yazılabilir.

N tane ölçüm için Eşitlik 5.23 yeniden düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
\varepsilon(1) &= y(1) - \hat{y}(1) = y(1) - \varphi^T(1)\hat{\theta} \\
\varepsilon(2) &= y(2) - \hat{y}(2) = y(2) - \varphi^T(2)\hat{\theta} \\
&\quad . \\
&\quad . \\
\varepsilon(N) &= y(N) - \hat{y}(N) = y(N) - \varphi^T(N)\hat{\theta}
\end{aligned} \tag{5.24}$$

elde edilir. Buradaki ifadeler vektörler halinde yazılırsa

$$\varepsilon = Y - \phi\hat{\theta} \tag{5.25}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 5.25'teki ϕ'nin En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile hesaplanması için Eşitlik 5.26 ile ifade edilen maliyet fonksiyonunun minimum yapılması gerekir. Bu durumda bulunan $\hat{\theta}$'dır (Söderström ve Stoica 1989).

$$V = \sum_{t=1}^{N} \varepsilon^2(t) = \varepsilon^T\varepsilon = \|\varepsilon\|^2 \tag{5.26}$$

Eşitlik 5.26'daki ε yerine yazılıp düzenlenirse

$$V = Y^TY - \phi^T\hat{\theta}^TY - Y^T\phi\hat{\theta} + \phi^T\phi\hat{\theta}^T\theta) \tag{5.27}$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitliği minimum yapan $\hat{\theta}$ değerini bulmak için türev alınır, sıfıra eşitlenirse ve düzenlenirse EKK yöntemi ile hesaplanmış model parametre vektörü bulunur.

$$\hat{\theta} = (\phi^T\phi)^{-1}\phi^TY \tag{5.28}$$

Eşitlik 5.28 aşağıdaki gibi bir başka şekilde de ifade edilebilir.

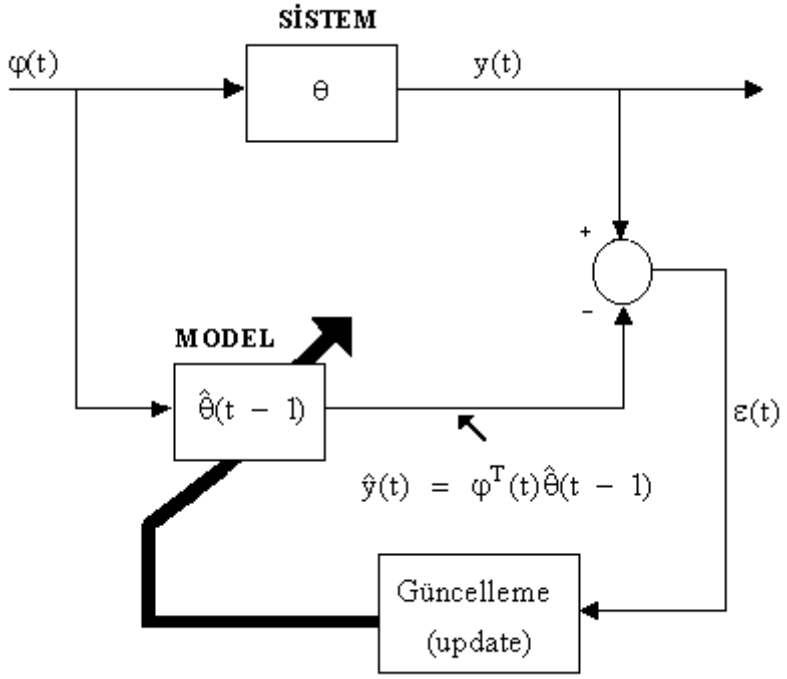
$$\hat{\theta} = \left[\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)\varphi^{T}(t)\right]^{-1} \sum_{t=1}^{N} \varphi(t)y(t) \tag{5.28}$$

EKK yöntemi oldukça yaygın kullanılan bir yöntem olmasına karşılık offline bir çözüm olduğu için adaptif ve öngörmeli kontroller için uygun değildir. Çünkü adaptif ve öngörmeli kontrol yöntemlerinde verilerin ve parametrelerin devamlı olarak yenilenmesi gerekmektedir. EKK yönteminde, Eşitlik 5.28'in her t anında çözülmesi gerekir. Bu şekilde bir çözüm Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi ile bu yapılabilir.

5.3.2 Yinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi (YEKK)

Yinelemeli En Küçük Kareler (YEKK) yöntemi on-line parametre tahmini için kullanılabilecek yöntemlerden biridir. Adaptif kontrol yöntemlerinde, sistemin model parametreleri her bir örnekleme zamanında alınan veriler ile güncellenir. YEKK hesaplama yöntemi, çok fazla veri depolanmadığı için hesaplama için düşük bir hafıza yeterlidir, zamanla değişen model parametrelerin hesaplanması için oluşturulan gerçek zaman algoritmalarına kolaylıkla uygulanabilir, adaptif kontrol sistemlerinin en önemli bölümüdür.

Yinelemeli parametre hesaplama yönteminde, şekil 5.8' den de görülebileceği gibi, geçmiş verilere dayanan model parametreleri $\hat{\theta}(t-1)$ ile yeni giriş ve çıkış değişkeni değerleri kullanılarak yeni tahmin edilen çıkış değişkeninin değeri $\hat{y}(t)$ hesaplanır. Bu hesaplanan tahmin değeri ile gerçek y(t) karşılaştırılır ve aradaki hata $\varepsilon(t)$ bulunur. Bir önceki adımda hesaplanmış olan $\hat{\theta}(t-1)$ yeni hesaplanan $\hat{\theta}(t)$ ile güncellenir. Bu yöntem yinelemeli parametre hesaplaması olarak adlandırılır (Wellstead ve Zarrop 1991).



Şekil 5.8 Yinelemeli parametre hesaplama yönteminin şematik gösterimi

Herhangi bir t anındaki parametre hesabı aşağıda verilen eşitlikle ifade edilebilir.

$$\hat{\theta}(t) = (\phi^T(t)\phi(t))^{-1}\phi^T(t)Y(t) \tag{5.29}$$

Burada,

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ . \\ . \\ . \\ y(t) \end{bmatrix}, \qquad \phi(t) = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ . \\ . \\ . \\ \varphi^T(t) \end{bmatrix} \tag{5.30}$$

olarak verilmiştir.

Bir sonraki örnekleme zamanındaki parametrenin hesaplanması için Eşitlik 5.29 (t+1) kadar ötelenir ve eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{\theta}(t+1) = (\phi^T(t+1)\phi(t+1))^{-1}\phi^T(t+1)Y(t+1) \tag{5.31}$$

eşitliği kullanılır. Burada $\phi(t+1)$ ve $Y(t+1)$ vektör olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\phi(t+1) = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \varphi^T(t+1) \end{bmatrix} \quad , \qquad Y(t+1) = \begin{bmatrix} Y(t) \\ y^T(t+1) \end{bmatrix} \tag{5.32}$$

Bu eşitlikler kullanılarak düzenleme yapılırsa,

$$\phi^T(t+1)\phi(t+1) = \phi^T(t)\phi(t) + \varphi(t+1)\varphi^T(t+1) \tag{5.33}$$

$$\phi^T(t+1)Y(t+1) = \phi^T(t)Y(t) + \varphi(t+1)y(t+1) \tag{5.34}$$

bulunur. Kovaryans matris

$$P(t) = \left[\phi^T(t)\phi(t)\right]^{-1} \tag{5.35}$$

olarak tanımlanırsa ve Eşitlik 5.33'e uygulanırsa ,

$$P(t+1)^{-1} = P(t)^{-1} + \varphi(t+1)\varphi^T(t+1) \tag{5.36}$$

bulunur. P(t) tanımı kullanılarak ve $\hat{\theta}(t-1)$ ile $\hat{\theta}(t)$'nin eşitliklerde yerine yazılması durumunda,

$$\hat{\theta}(t+1) = P(t+1)\phi^T(t+1)Y(t+1) \tag{5.37}$$

$$\hat{\theta}(t) = P(t)\phi^{T}(t)Y(t) \tag{5.38}$$

elde edilir. Eşitlik 5.34, Eşitlik 5.37'deki $\phi^{T}(t+1)Y(t+1)$ yerine yazılacak ve düzenlenecek olursa,

$$\hat{\theta}(t+1) = P(t+1)\phi^{T}(t)Y(t) + P(t+1)\varphi(t+1)y(t+1) \tag{5.39}$$

bulunur. Eşitlik 5.39 gerekli düzenlemeler yapılarak

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t+1)[y(t+1) - \varphi^{T}(t+1)\hat{\theta}(t)] \tag{5.40}$$

elde edilir. Yukarıdaki ifadede (t+1) anındaki tahmin hatası (prediction eror),

$$\varepsilon(t+1) = y(t+1) - \varphi^{T}(t+1)\hat{\theta}(t) \tag{5.41}$$

şeklinde tanımlanırsa, (t+1) anındaki hesaplanan parametre vektörü,

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + P(t+1)\varphi(t+1)\varepsilon(t+1) \tag{5.42}$$

şekilde bulunur. Eşitlik 5.42 yeniden düzenlenirse kovaryans matrisin yeni değerini veren eşitlik elde edilmiş olur.

$$P(t+1) = P(t) - \frac{P(t)\varphi(t+1)\varphi^{T}(t+1)P(t)}{1 + \varphi^{T}(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \tag{5.43}$$

YEKK algoritması Eşitlik 5.41, 5.42 ve 5.43'den oluşmaktadır. Bu algoritma aşağıda verilmiştir.

Algoritma:

t+1 anında,

i) Yeni veriler kullanılarak $\varphi(t+1)$ vektörü oluşturulur.

ii) Eşitlik 5.41 'ten $\varepsilon(t+1)$ hesaplanır.

iii) Eşitlik 5.42 'den $P(t+1)$ hesaplanır.

iv) Eşitlik 5.43 ile parametre vektörü güncelleştirilir.

v) Bir sonraki örnekleme zamanına kadar beklenir ve ilk adıma geri dönülür.

S. cerevisae mikroorganizmasının çoğaltıldığı kesikli bir biyoreaktörde DO ve sıcaklık kontroluna yönelik olan doktora tezi kapsamında, hem teorik hem de deneysel sistem tanımlama ve kontrol çalışmalarında YEKK Yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların grafikleri ve sonuçları Bölüm 9'da yer almaktadır.

6. ORANSAL (P) INTEGRAL(I) DİFERANSİYEL (D) KONTROL

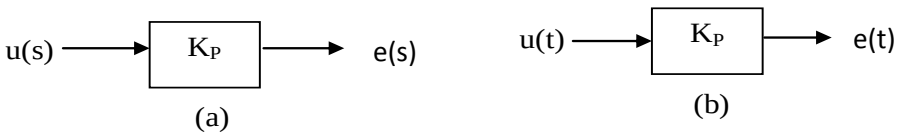
Geleneksel kontrol yöntemlerinden birdir. Endüstride kullanım alanı en yaygın kontrol yöntemidir. Kontrol yönteminde amaç set noktası ile o andaki kontrol edilen değişken arasındaki fark olan hatanın belirlenmesi ve ayarlanabilen değişkenin değerini değiştirilerek bu hatanın en aza indirilmesidir. PID kontrol daha sonra ayrıntılı olarak anlatılacağı gibi çizelge 6.1'den de görülebileceği gibi P, PI, PD ve PID olarak dört farklı şekilde oluşturulabilir. Bunun yanı sıra model parametrelerinin değiştirildiği kendinden ayarlamalı PID kontrol yöntemi de vardır. Bu bölümde sadece sabit parametreli PID kontrol yöntemi anlatılacaktır.

Çizelge 6.1 PID Kontrol alternatifleri ve transfer fonksiyonları (Rao ve Qui 1993, Shearer vd. 1997, Akçalı 2011, Alpbaz vd. 2011)

Kontrol eleman tipi	**Simge**	**Transfer Fonksiyonu G(s)**	**Olası Problemler**
Oransal	P	K_p	Ofset
İntegral	I	τ_I / s	*Tek başına kullanılmaz*
Diferansiyel	D	$\tau_D s$	*Tek başına kullanılmaz*
Oransal-İntegral	PI	$K_p\left(1+\frac{1}{\tau_I s}\right)$	
Oransal-Diferansiyel	PD	$K_p(1+\tau_D s)$	
Oransal-Diferansiyel-İntegral	PID	$K_p(1+\frac{1}{\tau_I s}+\tau_D s)$	
1. Dereceden eleman	P-T_1	$\frac{1}{\tau s+1}$	
Ölü zamanlı elemanlar	P-θ_d	$e^{-s}\theta_d$	

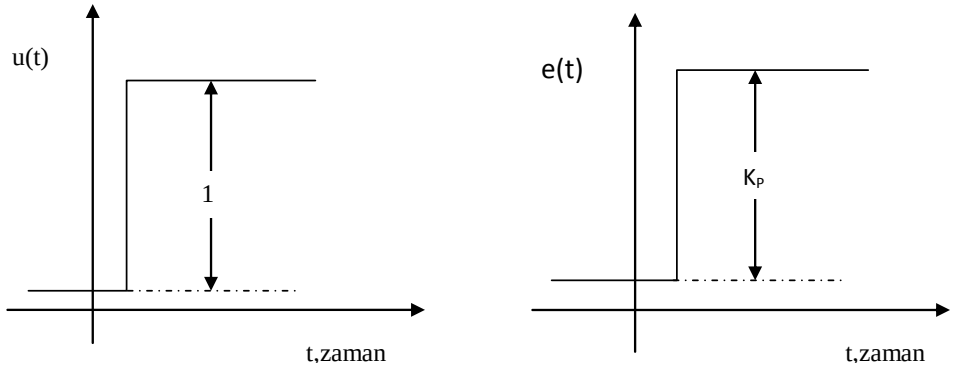
6.1 Orantı Elemanı

Orantı elemanı giriş değişkenini K_p gibi sabit bir değişken ile çarpıp çıkış değişkeni elde etmektir (Biotol 1992). K_p çoğunlukla kazanç olarak ifade edilse de orantı faktörü, büyütme faktörü olarak da adlandırılır. Giriş ve çıkış değişkenlerinin fiziksel niteliği aynı olması durumunda K_p boyutsuzdur. Giriş ve çıkış değişkenlerinin fiziksel niteliği farklı olduğunda K_p boyutu vardır. Örneğin bu tez kapsamındaki sıcaklık kontrolunu göz önünde bulundurursak giriş değişkeni olan soğutma suyu akış hızının birimi mL/dk, çıkış değişkeni olan biyoreaktör sıcaklığının birimi ^oC olmak üzere K_p'nin birimi ^oC/(mL/dk) ; DO kontrolu için ise K_p birimi (mg/L)/(mL/dk) dır. Orantı elemanına ait blok diyagram Şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1 Orantı elemanı blok diyagramı
a.Laplace formunda b. Zaman formunda

Bir sistemin girişi olan e(t)'ye birim basamak etki verilmesine karşılık elde edilen orantı elemanı yanıtı olan u(t)'nin cevabı şekil 6.2'de görülmektedir.



(a) Giriş Büyüklüğü (b) Çıkış Büyüklüğü

Şekil 6.2 Orantı elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt (Akçalı 2011)

Orantı elemanının Laplace formunda transfer fonksiyonu

$$G(s)= \frac{u(s)}{e(s)} =K_p \tag{5.1}$$

olarak ifade edilir.

6.2 İntegral Elemanı

İntegral elemanın transfer fonksiyonu

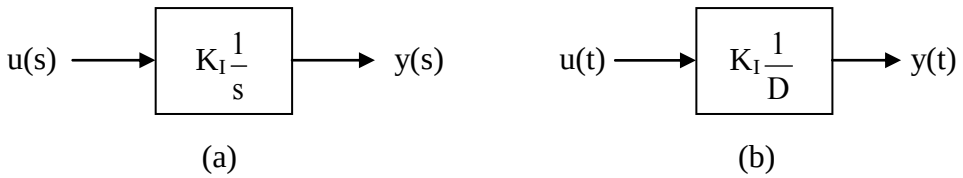
$$G(s)= \frac{u(s)}{e(s)} =K_I \frac{1}{s} \tag{5.2}$$

Giriş değişkeni ile çıkış değişkeni arasındaki ilişkiyi zaman bölgesinde durumu için Eşitlik 5.2 eşitliğinin ters Laplace alınacak olursa

$$u(t)=K_I \int_0^1 e(t)dt \tag{5.3}$$

$$Du = \frac{du}{dt} = K_I e(t) \tag{5.4}$$

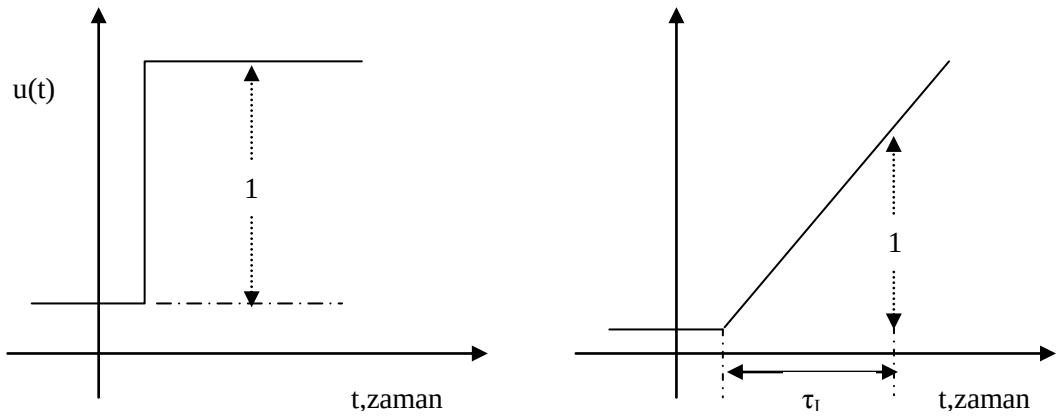
Şekil 6.3'te integral elemanının blok diyagramları görülmektedir.



Şekil 6.3 Orantı elemanı blok diyagramı

a. Laplace formunda b. Zaman formunda

e(t) giriş değişkenine birim basamak etki verilmesi durumunda integral elemanın yanıtımı grafiksel olarak şekil 6.4'de verildiği gibidir. Burada giriş birim basamak etkiye cevap ramp şeklindedir.



(a) Giriş Büyüklüğü (b) Çıkış Büyüklüğü

Şekil 6.4 İntegral elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt (Akçalı 2011)

K_I integral çarpanı yerine bazen τ_I, K_I ilişkisi şekil 6.4'den de görülebileceği gibi $\tau_I = \frac{K_C}{K_I}$ ifadesinden de kolayca bulunabilir.

6.3 Diferansiyel Eleman

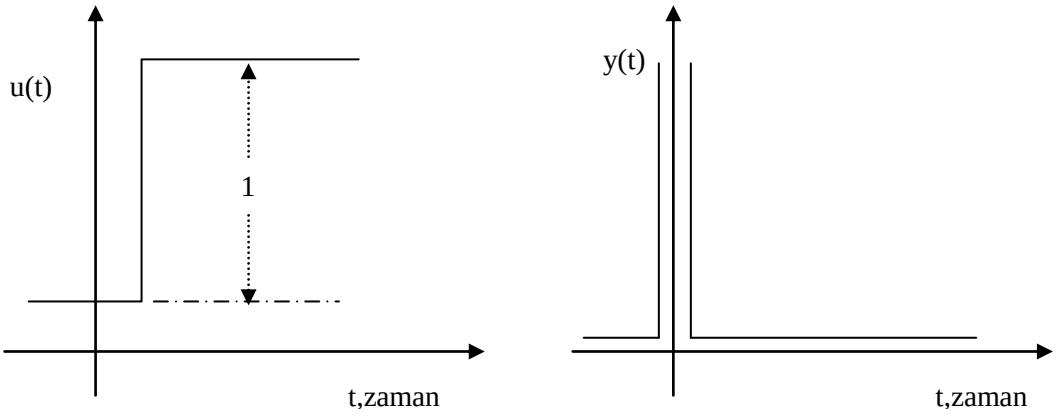
Çıkış değişkeninin büyüklüğü olan u(t)'nin giriş değişkeni olan e(t)'nin türevi ile orantılı olan elemana diferansiyel eleman denir. Diferansiyel elemanın transfer fonksiyonu Eşitlik 6.3'te verilmiştir.

$$G(s)= \frac{u(s)}{e(s)} = K_D s \qquad (6.3)$$

K_D sabit bir sayı olmak üzere diferansiyel elemanın matematiksel modeli

$$u(t)=K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{6.4}$$

Diferansiyel elemanın birim basamak etkiye cevabı şekil 6.4'deki gibidir. Burada giriş birim basamak etkiye cevap impuls (ani darbe) şeklindedir.



(a) Giriş Büyüklüğü (b) Çıkış Büyüklüğü

Şekil 6.5 Diferansiyel elemanı kullanıldığında birim basamak etkiye karşılık elde edilen yanıt (Akçalı 2011)

Diferansiyel eleman kontrol sistemlerinde sönümlemeyi arttırmak gerektiğinde çok yararlı olmakla birlikte sabit hataya yanıt vermediğinden tek başına kullanılamamaktadır (Anand 1984, Akçalı 2011). Diferansiyel eleman diğer kontrol elemanlarıyla bir arada kullanıldığı takdirde önemli işlevleri gerçekleştirmektedir.

6.4 Birinci Mertebeden Eleman

Kontrol edilecek olan sistemin zamanının belirlenmesi örnekleme zamanı ve prosesin kontrol performası açısından çok önemlidir. Matematik modeli aşağıdaki gibi verilen sisteme τ zaman sabitli 1. mertebeden eleman adı verilir.

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = y(t) \qquad (6.4)$$

Bu elemanın transfer fonksiyonu G(s)

$$G(s) = \frac{u(s)}{y(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \qquad (6.5)$$

u(t) girişine karşılık, y(t) Eşitlik 6.4'ten çözülür. Buna göre

$$y(t) = \frac{1}{\tau D + 1} u(t) = \frac{1}{\tau} \; \frac{1}{D + (1/\tau)} u(t) \qquad (6.6)$$

Eşitlik 6.6 denklemi Eşitlik 6.5 denklemine göre

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau) \qquad (6.7)$$

u(0)=0 başlangıç koşulu ve birim basamak fonksiyonu giriş olarak verilirse, elemanın buna yanıtı Eşitlik 6.7'den aşağıdaki gibi olur.

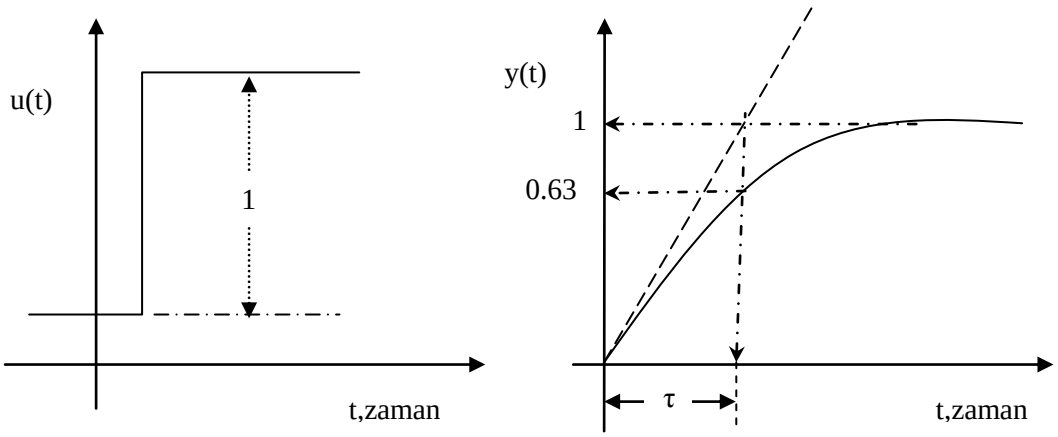
$$y(t)=1-e^{-(t/\tau)} \qquad (6.8)$$

Eşitlik 6.8'de verilen giriş-çıkış ilişkisinin matematiksel ifadesi grafiksel olarak şekil 6.7'de ve zaman adımlarına karşılık denklemin aldığı değerler de çizelge 6.2'de

verilmiştir. Birinci dereceden elemanın birim basamak etkiye yanıtının yüzde kaçına ve kadar sürede ulaşacağının bilinmesi, kontrol tasarımcısı açısından önemlidir. Çizelge 6.2'de zaman sabitinin (τ) katlarında y(t) çıkış büyüklüğü değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2 Birinci mertebeden sistemin birim basamak etkiye yanıtı

Zaman,t	τ	$2\,\tau$	$3\,\tau$	$4\,\tau$	$5\,\tau$
y(t)	0.63	0.87	0.95	0.98	0.99



(a) Giriş Büyüklüğü (b) Çıkış Büyüklüğü

Şekil 6.7 Birinci mertebeden sistemin birim basamak etkiye yanıtı (Rao 1993, Akçalı 2011)

Çizelge 6.2 ve şekil 6.7 dikkat edilirse 1. mertebeden elemanın yanıtı girişin %63 kadarına erişiyor ve 5τ zamanında %99 luk bir değere ulaşmaktadır ki bu da pratikte istenen bir durumdur.

6.5 Ölü Zaman Elemanı

Bir sistemin çıkışı y(t), giriş u(t) etkisine yanıtını bir θ_d zaman sabiti kadar gecikmeyle izliyorsa bu sistem ölü zamanlı bir sistemdir. Matematiksel olarak bir ölü zaman elemanından giriş-çıkış ilişkisi

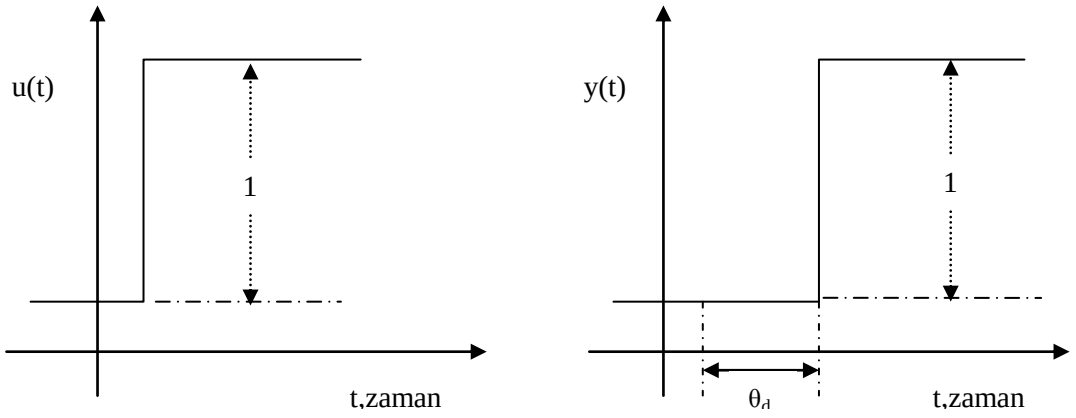
$$y(t)=Y(t-\theta_d)$$

olarak ifade edilebir.

Ölü zaman elemanın transfer fonksiyonu

$$G(s)= \frac{Y(s)}{u(s)} e^{-s\theta_d}$$

olarak verilir. Şekil 6.8'de ölü zaman elemanın, giriş değişkenine verilen birim basamak etkiye karşılık yanıtı grafiksel olarak verilmektedir.

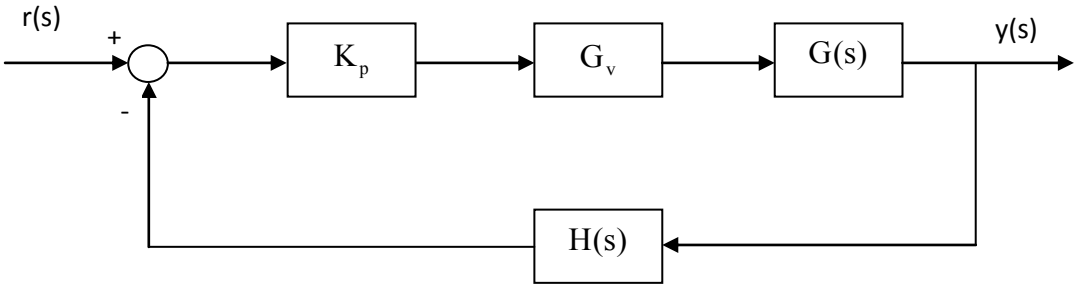


(a) Giriş Büyüklüğü (b) Çıkış Büyüklüğü

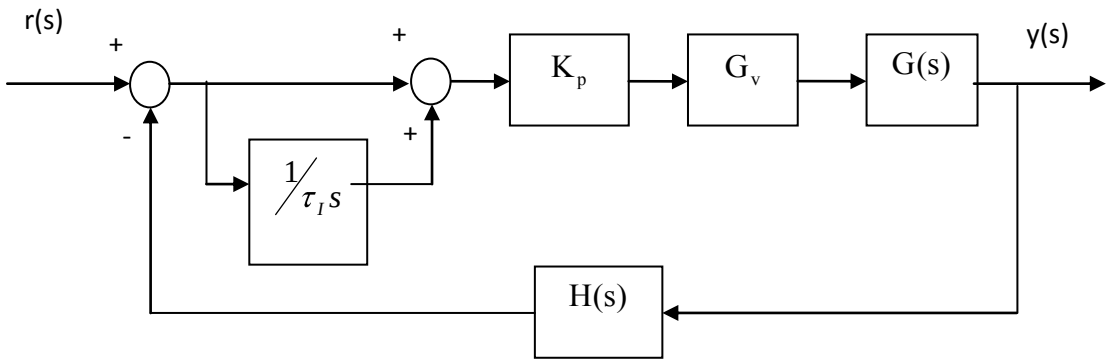
Şekil 6.8 Ölü zaman elemanının birim basamak yanıtı (Akçalı 2011)

6.6 P, PI, PD ve PID Kontrol

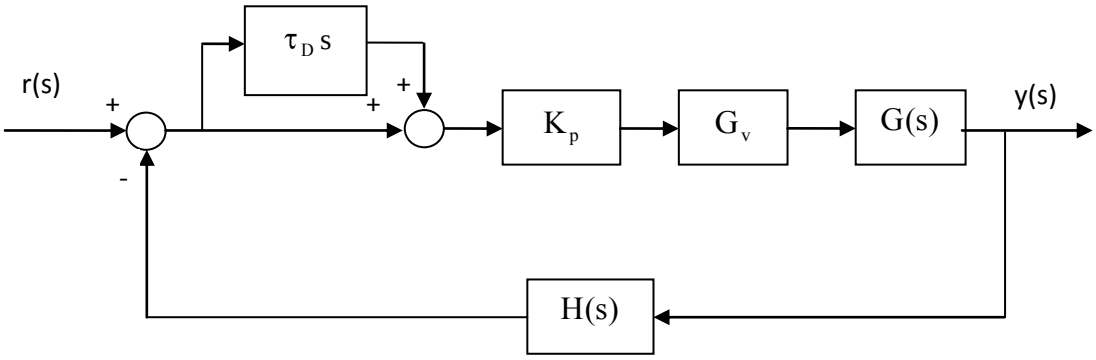
Oransal kontrol en basit kontrol yöntemlerinden biridir. Oransal kontrol yönteminin kullanıldığı bir sistemde kararlı hal hatası ve maksimum aşma kabul edilebilir sınırlar içerisinde ise uygulanabilir bir yöntem olarak seçilebilir. Ancak sistem her zaman bir ofset verecektir. Pratikte, sistemin vereceği ofsetin olmaması için oransal kontrol diğer tip (I ve/veya D) kontrol tipi ile birlikte kullanılır (Anand 1984, Akçalı 2001, Yüksel 2006). Oransal kontrol (Şekil 6.9), oransal-integral kontrol (Şekil 6.10) ve oransal-Diferansiyel kontrol (Şekil 6.11) blok diyagramları aşağıda sırasıyla verilmektedir.



Şekil 6.9 Oransal kontrol blok diyagramı

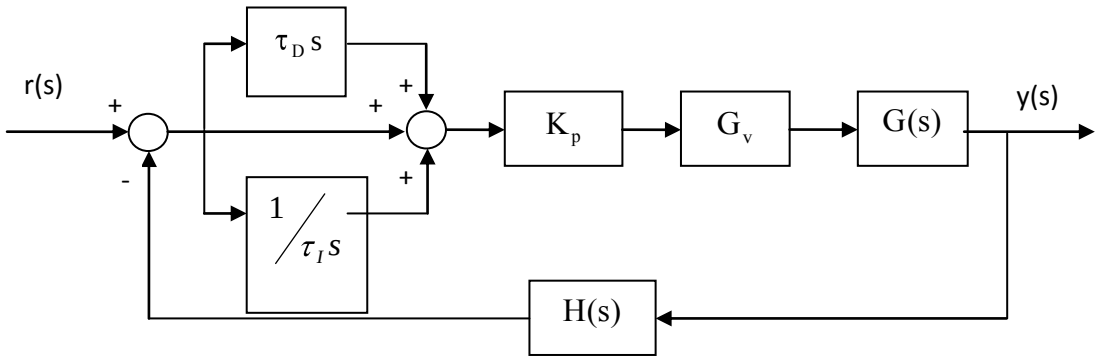


Şekil 6.10 Oransal-integral kontrol blok diyagramı



Şekil 6.11 Oransal-diferansiyel kontrol blok diyagramı

Bütün elemanların olduğu PID kontrol yönteminin en geniş halidir. Blok diyagramı şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12 Oransal-integral-diferansiyel kontrol blok diyagramı

7. GENELLEŞTİRİLMİŞ ÖNGÖRMELİ KONTROL (GPC)

Kolay uygulanabilirliği ve ayarlama kolaylığı nedeniyle geleneksel PID kontrolun sanayide kullanımının çok fazla olmasına rağmen performans değerlendirmesi yapıldığında gelişmiş kontrol yöntemlerinin çok daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle PID kontrolun yanı sıra gelişmiş kontrol yöntemlerinin de sanayide kullanımının gün geçtikçe artmaktadır Gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan Modele dayalı kontrol stratejilerinin endüstride en etkin ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biri olduğu kanıtlanmıştır (Neshasteriz vd. 2010). Moon vd. 2005 yılında yaptıkları çalışmada bildirdiğine göre, Richalet vd. 1978'de ani etki veya Cutler ve Ramaker 1980'de basamak etki yanıtına dayanan erken öngörmeli kontrolun (early predictive control) performansı iyi olmasına rağmen kararlı modellerle sınırlıdır. GPC kontrol yöntemi modele dayalı kontrol yöntemleri arasında en gözde yöntemlerden biridir. GPC kontrol algoritması ilk olarak 1987 yılında Clarke vd. tarafından bulunmuştur. GPC kontrol, non-minimum faz sıfırları, açık döngü kararsız veya yetersiz sönümlü kutupları, bilinmeyen veya değişken ölü zamanlar ve bilinmeyen sistem dereceleri gibi kontrol problemlerini aşmak amacıyla ortaya çıkmış bir kontrol yöntemidir (Parte vd. 2002, Li-Juan vd. 2007). Bu özelliklerinden dolayı diğer MPC kontrol yöntemleri arasından geliştirilmek üzere seçilmiştir (Parte vd. 2002). Öngörmeli kontrolun içine kendinden ayarlamalı adaptif kontrol eklenerek oluşturulan GPC kontrol algoritması daha etkili bir kontrol yöntemi olmuştur (Li-Juan vd. 2007). Wang vd. 2006 yılında ve Durmuş ile Temurtaş'ın 2010 yılında yaptıkları çalışmalarda bildirdiğine göre, Clarke vd. 1987'de, Richalet vd. 1978'de, Demircioğlu ve Karasu'yun 2000'de, Zhang vd. 2004'te yaptıkları çalışmalarda, GPC kontrolun sistemin gelecekteki davranışını kullanarak iyi gürbüzlük özelliklerine sahip uzun menzilli (long-range) öngörmeli kontrol yöntemi olduğunu ve tahmin hatasını en aza indirmeğe dayalı gerileyen ufuklar metodu olduğunu belirtmişlerdir.

Chen 2002 yılında yapmış olduğu çalışmada GPC kontrol yöntemini, on-off kontrol ve PI kontrol ile karşılaştırarak günlük hayatımızda HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning) uygulamalarında da kullanabileceğimiz göstermiştir.

Herhangi bir sistemin kontrol tasarımında, kontrol parametrelerinin ayarlanabilir olması kabul edilebilir bir online kontrol performansı elde edebilmeği sağlar,. Bu online kontrol uygulanmadan önce prosesin benzetimi yapılarak kontrol parametrelerini ayarlamak kolay ve ekonomik olmasını sağlayacaktır (Yu ve Gomm 2003). Bir sistemin modelini belirlemek için offline veya online yöntemler kullanılabilir.

7.1 Kontrol Edici Tasarımı

GPC tasarımında, prosesin modeli ARIMAX (CARIMA) model yapısında oluşturulur. Eşitlik 5.14'te verilen eşitlik düzenlenirse;

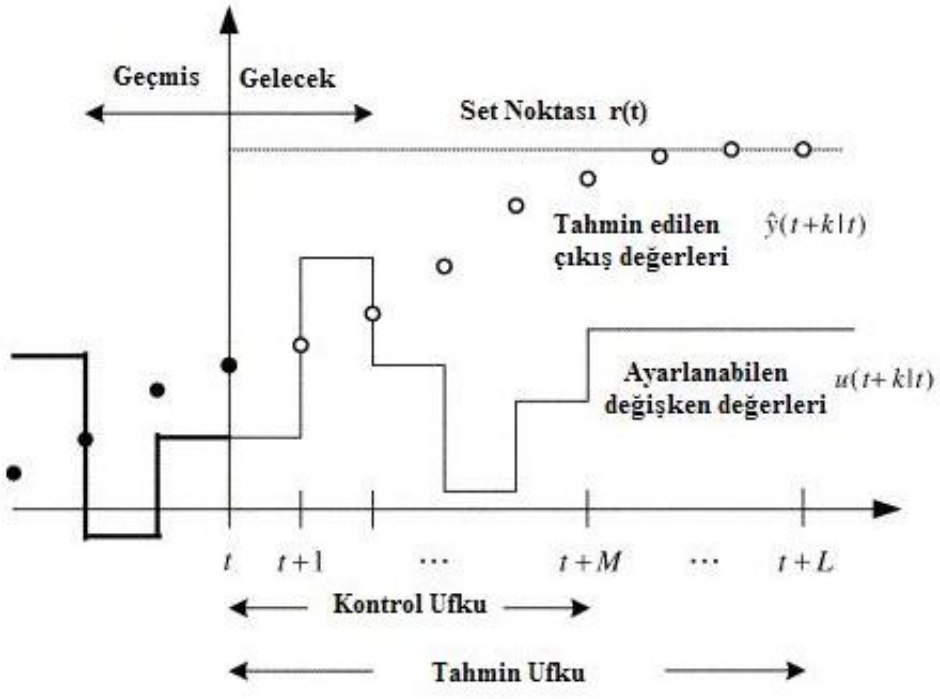
$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta}e(t) \tag{7.1}$$

Burada; A polinomu Eşitlik 5.3'te verilen $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{na} q^{-na}$, B polinomu Eşitlik 5.4'te $B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \ldots\ldots\ldots\ldots + b_{nb} q^{-nb}$ şeklinde açık olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Eşitlik 7.1'de $u(t)$ ayarlanabilen değişken, $y(t)$ kontrol edilen değişken ve $e(t)$ ise sıfır ortalamalı beyaz gürültü ve rahatsızlıkları ifade etmektedir. Δ ise $1 - q^{-1}$ şeklinde fark operatörü göstermekte olup offseti gürültüyü integre ederek yok etmektedir. $C(q^{-1})$ polinomu genelde basitleştirilmek amacıyla GPC tasarımında 1 olarak alınır (Clarke vd.1987).

GPC tasarımında şekil 7.1'den de görülebileceği gibi ileriye yönelik olarak bir nokta değil bir aralık kestirilmektedir. Bu aralık seçilirken zaman gecikmesinden büyük olmasına dikkat edilmelidir. Böylece sistemin zaman gecikmesindeki değişimler kontrol etkinliğini etkilemesi engellenmiş olur. Bu aralıkta N tane tahmin yapılmakta ve bunlar bir maliyet işlevinde birleştirilerek maliyet fonksiyonu (cost function) minimize olacak şekilde GPC tasarımı yapılmaktadır.

$$J(N_1, N_2, N_U) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \left[y(t+j) - w(t+j) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_U} \lambda \left[\Delta u(t+j-1) \right]^2 \qquad (7.2)$$

Eşitlik 7.2'deki N_1 minimum tahmin ufkunu, N_2 maksimum tahmin ufkunu, N_u kontrol ufkunu ve λ kontrol ağırlık faktörünü ifade etmektedir. Bu eşitliğin minimum yapılabilmesi için kontrol artırımlarının gelecekteki ve t anındaki değerlerine dayanılarak $j = N_1, ..., N_2$ için çıktının j basamak ötedeki $y(t+j)$ tahminlerinin yapılması gerekmektedir. j basamak sonraki çıktı tahminlerini yapmak için ARIMAX modelinden elde edilen "Diophantine eşitliklerinin" çözülmesi gerekir (Clarke vd 1987).



Şekil 7.1 Model öngörmeli kontrol metodu (Silva ve Kwong 1999, Na ve Upadhyaya 2006, Kennel vd. 2001)

Eşitlik 7.1'in her iki tarafı A polinomu ile bölünürse;

$$y(t) = \frac{B}{A} u(t-1) + \frac{C}{\Delta A} e(t) \tag{7.3}$$

buradaki üçüncü terim j basamak ileri tahmin için Eşitlik 7.4'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{C}{\Delta A} = E_J + q^{-J} \frac{F_J}{\Delta A} \tag{7.4}$$

Eşitlik 7.4'te $\deg F_J = \deg(\Delta A - 1)$ ve $\deg E_J = j - 1$ olmalıdır. Diğer bir şekilde

$$C = A\Delta E_J + q^{-J} F_J \tag{7.5}$$

yazılabilir. Burada E ve F polinomları aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilir.

$$E_J = 1 + e_1(q^{-1}) + e_2(q^{-2}) + ... + e_{J-1}(q^{-j+1}) \tag{7.6}$$

$$F_J = 1 + f_1(q^{-1}) + f_2(q^{-2}) + \ldots\ldots + f_{J-1}(q^{-j+1}) \tag{7.7}$$

Eşitlik 7.1'de C polinomu yerine Eşitlik 7.5 yazılır ve düzenlenirse Eşitlik 7.8 ve 7.9 bulunur.

$$Ay(t) = Bu(t-1) + \frac{A\Delta E_J + q^{-J} F_J}{\Delta} e(t) \tag{7.8}$$

ve

$$y(t) = \frac{B}{A} u(t-1) + \frac{A\Delta E_J e(t)}{\Delta A} + \frac{q^{-J} F_J}{\Delta A} e(t) \tag{7.9}$$

Eşitliğin her iki tarafı $E_J A\Delta$ ile çarpılırsa;

$$E_J A\Delta y(t) = \frac{B}{A} E_J A\Delta u(t-1) + \frac{A\Delta E_J e(t) E_J A\Delta}{A\Delta} + \frac{q^{-J} F_J e(t) E_J A\Delta}{A\Delta} \tag{7.10}$$

ve sadeleştirmeler yapılarak Eşitlik 7.11 elde edilir.

$$E_J A\Delta y(t) = BE_J \Delta u(t-1) + A\Delta E_J e(t) E_J + q^{-J} F_J e(t) E_J \tag{7.11}$$

Eşitlik 7.5'ten $C - q^{-J} F_J = A\Delta E_J$ olduğundan, Eşitlik 7.11 tekrar düzenlenirse;

$$\left[C - q^{-J} F_J\right] \underline{y}(t) = BE_J \Delta u(t-1) + \left[C - q^{-J} F_J\right] \underline{e}(t) E_J + q^{-J} F_J e(t) E_J \tag{7.12}$$

$$Cy(t) - q^{-J} F_J y(t) = BE_J \Delta u(t-1) + Ce(t) E_J - q^{-J} F_J e(t) E_J + q^{-J} F_J e(t) E_J \tag{7.13}$$

Eşitliğin sağındaki üçüncü ve dördüncü terimler eşit ve ters işaretli olduğundan Eşitlik 7.14 ve 7.15 elde edilebilir.

$$Cy(t) = q^{-J} F_J y(t) + BE_J \Delta u(t-1) + Ce(t) E_J \tag{7.14}$$

$$y(t) = \frac{E_J B}{C} \Delta u(t-1) + \frac{q^{-J} F_J}{C} y(t) + E_J e(t) \tag{7.15}$$

Eşitlik 7.15 j basamak ilerideki çıktı tahmini için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y(t+j) = \frac{E_J B}{C} \Delta u(t+j-1) + \frac{F_J}{C} y(t) + E_J e(t+j) \tag{7.16}$$

Eşitliğin sağındaki birinci ve ikinci terim mevcut verilerden hesaplanır. Üçüncü terim ise gelecekteki yükleri ifade etmektedir. $\hat{y}$ kestirilen (tahmin edilen) kontrol edilen değişken olmak üzere 7.16 eşitliğini aşağıdaki gibi göstermek mümkündür.

$$y(t+j) = \hat{y}(t+j) + E_J e(t+j) \tag{7.17}$$

$$\hat{y}(t+j) = \frac{E_J B}{C}\Delta u(t+j-1) + \frac{F_J}{C}y(t) \tag{7.18}$$

Eşitliğin sağındaki ilk terim hem geçmiş, hem de gelecek verileri içermektedir. İlk terim ikinci bir Diophantine eşitliği çözümüyle geçmiş ve gelecek veriler olarak ayrılırsa;

$$\frac{E_J B}{C} = G_J + q^{-J}\frac{H_J}{C} \tag{7.19}$$

Burada; $\deg(H_J) = \deg(C) - 1$ ve $\deg(G_J) = j - 1$ olmalıdır ve $G = 1 + g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2} + \ldots\ldots\ldots\ldots + g_{J-1} q^{-J+1}$ olarak verilmiştir. Eşitlik 7.19, 7.18'de yerine yazılırsa Eşitlik 7.20 elde edilir.

$$\hat{y}(t+j) = G_J \Delta u(t+j-1) + \frac{H_J}{C}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{C}y(t) \tag{7.20}$$

Eşitliğin sağındaki ilk terim gelecek verileri, ikinci ve üçüncü terim ise geçmiş ve şu andaki verileri göstermektedir. Eşitlik 7.20 vektör formuna getirilirse, birinci terim Eşitlik 7.21' deki gibi ifade edilir.

$$G_J \Delta u(t+1-j) = \underline{g_J}\ \underline{\Delta u_J} \tag{7.21}$$

Burada;

$$\underline{g_J} = \begin{bmatrix} g_{J-1} & g_{J-2} & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & g_1 & g_0 \end{bmatrix} \tag{7.22}$$

$$\underline{\Delta u_J} = \begin{bmatrix} \Delta u(t) & \Delta u(t+1) & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \Delta u(t+j-1) \end{bmatrix}^T \tag{7.23}$$

olarak verilmiştir. Benzer şekilde ikinci terimi Eşitlik 7.24'deki gibi tanımlanırsa;

$$f_J = \frac{H_J}{C}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{C}y(t) \tag{7.24}$$

7.20 eşitliği 7.25 şeklinde vektörel formda yazılabilir.

$$\hat{y}(t+j) = \underline{g_J}\ \underline{\Delta u_J} + f_J \tag{7.25}$$

$N_1 = 1, \quad N_2 = N$ ve $N_U = N$ alınırsa tanımlanan vektörler

$$\underline{\hat{y}} = \left[\hat{y}(t+1) \quad \hat{y}(t+2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \hat{y}(t+N)\right]^T \tag{7.26}$$

$$\underline{w} = \left[w(t+1) \quad w(t+2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad w(t+N)\right]^T \tag{7.27}$$

$$\underline{\Delta u} = \left[\Delta u(t) \quad \Delta u(t+1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \Delta u(t+N-1)\right]^T \tag{7.28}$$

$$\underline{f} = \left[f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad f_N\right]^T \tag{7.29}$$

olur. Böylece aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\hat{y} = G\ \underline{\Delta u} + \underline{f} \tag{7.30}$$

Burada

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & . & . & . & 0 \\ g_1 & g_0 & . & . & . & 0 \\ . & & . & & & . \\ . & & & . & & . \\ . & & & & . & . \\ g_{N-1} & g_{N-2} & . & . & . & g_0 \end{bmatrix}_{NxN} \tag{7.31}$$

alt üçgen matristir. Eşitlik 7.2'de verilen maliyet fonksiyonu vektörler cinsinden yazılırsa Eşitlik 7.32 elde edilir.

$$\begin{aligned} J(1,N,N) &= \left(\underline{\hat{y}} - \underline{w}\right)^T \left(\underline{\hat{y}} - \underline{w}\right) + \lambda \Delta u^T \Delta u \\ &= \left(G\underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{w}\right)^T \left(G\underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{w}\right) + \lambda \Delta u^T \Delta u \end{aligned} \tag{7.32}$$

Adında anlaşılabileceği gibi GPC kontrol yönteminde amaç, maliyet fonksiyonunu minimize etmektir. Bu da Eşitlik 7.32 minimum yapacak u vektörünün bulunması ile mümkündür. Matematiksel olarak, bir denklemin teğetinin eğiminin sıfır olduğu yer o denklemin minimum olduğu noktadır. Buna göre 7.32 eşitliğinin türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{dJ}{d\underline{\Delta u}} = 2\left(G\underline{\Delta u} + \underline{f} - \underline{w}\right)^T G + \lambda 2\underline{\Delta u}^T = 0 \tag{7.33}$$

elde edilir ve kontrol hareketindeki gelecek artırımlar aşağıdaki gibi olur;

$$\underline{\Delta u} = \left(G^T G + \lambda I\right)^{-1} G^T \left(\underline{w} - \underline{f}\right) \tag{7.34}$$

Ayarlanabilen değişken olarak, $\underline{\Delta u}$ vektörünün ilk elemanı dikkate alınır ve prosese uygulanır. Yeni ölçümler elde edildiği zaman yeni kontrol sinyali hesaplanır. Buna geriye çekmeli ufuk kontrol stratejisi (receding-horizon control strategy) denir (Thomas 1975). Bu durumda kontrol sinyali $\Delta u(t)$ Eşitlik 7.35'ten hesaplanır.

$$\Delta u(t) = \left[1\ 0\ 0 \ldots\ldots\ldots 0\right]\left(G^T G + \lambda I\right)^{-1} G^T \left(\underline{w} - \underline{f}\right) \tag{7.35}$$

Bu durumda GPC kontrol kanunu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u(t) = u(t-1) + \left(G^T G + \lambda I\right)^{-1} G^T \left(\underline{w} - \underline{f}\right) \tag{7.36}$$

Bölüm 5'te anlatıldığı gibi, adaptif genelleştirilmiş öngörmeli kontrol yapmak için, her adımda A ve B polinomlarının parametrelerinin hesaplanması gereklidir. Farklı tahmin ufukları için hesaplanan değerlerde kullanılarak Eşitlik 7.36'dan kontrol edilebilen değişkenin değeri hesaplanır. Adaptif GPC bir indirekt kontrol algoritmasıdır. N_U genellikle küçüktür. Bu yüzden oluşan matrisler küçük boyutlardadır. Eşitlik 7.34'ün hesaplanmasında $N_2 x N_U$ boyutlu matris gereklidir. Gelecek kontrol sinyallerindeki

bilgiler kısıtlanarak hesaplamaları azaltmak mümkündür. $N_U < N_2$ basamağından sonraki kontrol artırımları sıfır olarak kabul edilebilir.

$$\Delta u(t+j-1) = 0 \qquad j > N_U \tag{7.37}$$

Bu durumda kontrol sinyalinin N_U basamağından sonra sabit olduğu kabul edilir.

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ & & \cdots & g_0 \\ \vdots & & & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_{N-N_U} \end{bmatrix}_{NxN_U} \tag{7.38}$$

ve

$$\underline{\Delta u} = \begin{bmatrix} \Delta u(t) & \Delta u(t+1) & \cdots & \Delta u(t+N_U-1) \end{bmatrix}^T \tag{7.39}$$

olur. Eğer $N_1 \neq 1$ ve $N = N_2$ ise

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1-1} & g_{N_1-2} & \cdots & g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_{N_1-2} & g_{N_1-3} & \cdots & & g_0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & & & g_0 \\ \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & g_{N_2-N_U} \end{bmatrix}_{N_2 xN} \tag{7.40}$$

$$\underline{w} = \begin{bmatrix} w(t+N_1) & \cdots\cdots\cdots\cdots & w(t+N_2) \end{bmatrix}^T \tag{7.41}$$

$$\underline{f} = \begin{bmatrix} f_{N_1} & \cdots\cdots\cdots\cdots & f_{N_2} \end{bmatrix}^T \tag{7.42}$$

olur. Eşitlik 7.5'in her iki tarafı B ile çarpılıp, Eşitlik 7.19'dan $E_J B$ yerine yazılarak Eşitlik 7.43 elde edilir.

$$\begin{aligned} CB &= \Delta A\left(CG_J + q^{-J}H_J\right) + q^{-J}F_J B \\ &= C\Delta AG_J + q^{-J}\left(\Delta AH_J + F_J B\right) \end{aligned} \tag{7.43}$$

Eşitlik 7.5 ve 7.19'un her ikisi de çözülebilen polinomlar olduğuna göre, Eşitlik 7.5'ten E_J ve F_J, Eşitlik 7.19'dan G_J ve H_J'yi bulmak mümkündür. Çözülebilen bu iki polinomun toplamı da bir polinom olacağından ve C'yi kapsayacağından Eşitlik 7.44 yazılabilir.

$$\Delta AH_J + F_J B = CL_J \tag{7.44}$$

Bu durumda Eşitlik 7.43, Eşitlik 7.45 halini alır.

$$B = \Delta AG_J + q^{-1}L_J \tag{7.45}$$

Eşitliğin her tarafı ΔA'ya bölünürse 7.46 eşitliği bulunur.

$$\frac{B}{\Delta A} = G_J + q^{-J}\frac{L_J}{\Delta A} \tag{7.46}$$

Burada, sol tarafta yer alan B ve A sistemi tanımlayan polinomlar, sağ tarafdaki G_J polinomunun katsayıları ise, sistemin basamak cevabı (step response) değerleridir. Buradan anlaşılacağı gibi Eşitlik 7.36'daki kontrol sinyalinin hesaplanması için gereken G matrisi sistemden elde edilecek basamak cevap (step response) ile oluşturulacaktır.

Ayarlanabilen değişkenin (kontrol sinyalinin) hesaplanabilmesi için Eşitlik 7.36'daki f vektörünün de oluşturulması gerekir. f_J, j anındaki bir değer olup geçmiş zamanlarda ölçülen değerlerden oluşmaktadır. Bu durumda $\Delta u(t-1)=0$ alarak f_J'yi hesaplamak mümkündür. Eşitlik 7.3 ve 7.24'ün birleştirilmesi ile Eşitlik 7.47 elde edilir.

$$f_J = \frac{H_J}{C}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{C}\left(\frac{B}{\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{C}{\Delta A}e(t)\right) \tag{7.47}$$

Bu eşitlik ise düzenlenirse 7.48'deki gibi olur.

$$\begin{aligned} f_J &= \frac{H_J}{C}\Delta u(t-1) + \frac{F_J B}{C\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{\Delta A}e(t) \\ &= \frac{\Delta A H_J}{C\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J B}{C\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{\Delta A}e(t) \\ &= \frac{\Delta A H_J + F_J B}{C\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{\Delta A}e(t) \end{aligned} \tag{7.48}$$

Eşitlik 7.48'de $\Delta A H_J + F_J B = C L_J$ olmak üzere düzenlenirse;

$$f_J = \frac{L_J}{\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{\Delta A}e(t) \tag{7.49}$$

j basamak ilerisi için çıktı değeri aşağıdaki gibidir.

$$y(t+j) = \frac{B}{\Delta A}u(t+j-1) + \frac{C}{\Delta A}e(t+j) \tag{7.50}$$

$\frac{B}{\Delta A}$ yerine Eşitlik 7.46 ve $\frac{C}{\Delta A}$ yerine Eşitlik 7.4 yazılıp düzenlenirse;

$$\begin{aligned} y(t+j) &= \left(G_J + q^{-J}\frac{L_J}{\Delta A}\right)\Delta u(t+j-1) + \left(E_J + q^{-J}\frac{F_J}{\Delta A}\right)e(t+j) \\ &= G_J\Delta u(t+j-1) + \frac{L_J}{\Delta A}\Delta u(t-1) + \frac{F_J}{\Delta A}e(t) + E_J e(t+j) \end{aligned} \tag{7.51}$$

elde edilir. Burada eşitliğin sağındaki birinci terim prosesin gelecek girdi değerlerine, ikinci terim geçmiş girdi ve gürültü değerlerine, üçüncü terim ise sadece gelecek gürültü değerlerine bağlıdır. Bu durumda prosesin çıkış değişkeni değerinin

1. Sisteme henüz uygulanacak giriş değişkenine
2. Önceki giriş değişkeni ve gürültülere
3. Gelecekteki gürültülere

bağlı olduğu görülür. Böylece f_J, açık hat sistemde gelecek kontrol artışları sıfır kabul edilerek iterasyonla hesaplanabilir. Diğer bir deyişle gelecek kontrol sinyali $u(t)$, bir önceki kontrol sinyali $u(t-1)$'e eşittir. Yani,

$$u(t+j-1) = u(t-1) \qquad j = 1,2,\ldots\ldots,N_2 \tag{7.52}$$

olur. Böylece GPC algoritması aşağıdaki gibi elde edilir.

Kendinden ayarlamalı GPC algoritması : (İndirekt Metod)

Başlangıç verileri : A ve B polinomunun derecesi, N_1, N_2, N_U, λ ve C polinomu verilir.

i) A ve B polinomlarının parametreleri yinelemeli en küçük kareler yöntemiyle bulunur.

ii) $j = 1,2,3,\ldots\ldots,N_2$ için $B/\Delta A$ 'nın değerleri her Δt adım aralığında hesaplanır ve G matrisininin oluşturulmasında kullanılır.

iii) Her t anında, t anı ve önceki değerleri kullanılarak f vektörü Eşitlik 7.24'ten hesaplanır.

iv) w vektörü oluşturulur. $\underline{w} = [w(t+N_1)\ldots\ldots\ldots\ldots w(t+N_2)]^T$

v) Kontrol artışları hesaplanır.

$$\Delta u(t) = [1\ 0\ 0\ldots\ldots..\ 0]\left(G^T G + \lambda I\right)^{-1} G^T \left(\underline{w} - \underline{f}\right)$$

vi) $\Delta u(t)$ sisteme uygulanır.

7.2 GPC Kontrol Tasarım Parametrelerinin Seçilmesi

Bu bölümde GPC tasarımında kullanılan ve Eşitlik 7.2 ile verilen maliyet fonksiyonunda yer alan N_1, N_2, λ ve N_U parametrelerinin seçimi hakkında bilgi verilmiştir (Aström ve Wittenmark 1992).

Minimum Tahmin Ufku (Minimum Prediction Horizon) , N_1: Eğer zaman gecikmesi biliniyorsa (ya da en azından alt sınırı biliniyorsa) N_1 zaman gecikimine eşit alınır. Zaman gecikmesi hakkında hiçbir bilgi yoksa $N_1 = 1$ alınır. N_1'in zaman gecikiminden daha küçük bir değere ayarlamak gereksiz hesaplamalara yol açar.

Maksimum Tahmin Ufku (Maximum Prediction Horizon), N_2: Minimum olmayan faz sistemlerde sistem çıktısının yön değişikliğini içine alacak şekilde seçilmelidir. Sistem cevabı üzerinde etkisi fazla olmamakla birlikte yeterince büyük seçilmelidir. Yaklaşık $N_2 = 20$ alınabilir. Genelde pratikte $N_2 = 10$ iyi sonuçlar verir (Clarke vd 1987).

Kontrol Ufku (Control Horizon), N_U: Basit prosesler için $N_U = 1$ genelde iyi sonuçlar vermektedir. Daha karmaşık sistemlerde (kararsız kökler varlığında) N_U'yu büyütmek gerekebilir. Yaklaşık 2 veya 3 seçilebilir.

Kontrol Ağırlık Faktörü (Control Weighting), λ : Kontrol aktivitesi üzerinde en etkin ayar parametresidir. λ büyüdükçe sistem tepkisi yavaşlar. Küçük seçersek sistem daha hızlı tepki verir. Eğer λ büyükse ve eğer açık hat sistem kararsız ise, kapalı hat sistemde kararsız hale gelir.

Bu doktora tezi kapsamında en uygun kontrol performansını bulmak üzere kontrol tasarım parametrelerinin farklı değerlerinde çalışmalar yapılmış ve Bölüm 9'da verilmiştir.

8. MATERYAL VE YÖNTEM

8.1 Mikroorganizma Çoğaltılması

Bu çalışmada liyofilize halde "Agricultural Research Service Culture Collection, USA"'den temin edilen NRRL Y-567 *Saccharomyces cerevisiae* mikroorganizması kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanmak amacıyla liyofilize haldeki mikroorganizma öncelikle canlandırma ortamında çoğaltılmıştır.

8.2 Besi Ortamları

Mikroorganizmaların gelişmeleri, çoğalmaları ve ürün üretebilmeleri için besinlere ihtiyaçları olduğu, hazırlanacak besi ortamının bileşiminin, belirli bir mikroorganizmanın gelişmesi, üremesi ve fizyolojik yaşamalarını sürdürebilmeye yetecek miktarda gerekli maddeleri içermesi gerektiği Bölüm3'te verilmişti. Mikroorganizma için uygun organik ve inorganik maddeleri içeren bu çözeltiye "besi ortamı" denir. Bu çalışmada besi ortamı olarak hem katı hem sıvı besi ortamı kullanılmıştır. Katı besi ortamı, çalışmada kullanılan ekmek mayasının genç kalması ve yapısındaki enzimlerin aktivitesini kaybetmemesi amacıyla periyodik olarak (7-10 gün) aktarıldıkları ortamlardır. Katı besi ortamı bileşimi ilerleyen bölümlerde anlatılacak olan tek koloni ekimi amacıyla da kullanılmıştır. Sıvı besi ortamı ise deneysel mikroorganizma çalışmalarında kullanılmıştır.

Bölüm 4'te anlatılan biyoproses basamaklarından olan, besi formülasyonu ve sterilizasyonun yer aldığı ön işlemler *S. cerevisiae* mikroorganizmasının optimum çoğalma ortamları için 8.2.1. ve 8.2.2. bölümlerinde anlatılmıştır.

8.2.1 Katı besi ortamı

8.2.1.1 Eğik agar katı besi ortamı

Katı besi ortamı bileşimi çizelge 8.1'de verilmiştir. Miktarları verilmiş olan maddeler, 0.0001 hane hassasiyetli terazide tartılmıştır. Glukoz çözeltisi (glukoz ve saf su) ve tuz çözeltisi (glukoz dışındaki maddeler ve saf su) olarak iki ayrı çözelti halinde homojen hale gelinceye kadar magnetik karıştırıcıda ısıtılmadan karıştırılmıştır. Besi ortamının ayrı iki çözelti halinde hazırlanmasının amacı sterilizasyon işlemi sırasında glukozun mineral tuzları ile olacak etkileşimini önlemektir. Daha sonra glukoz ve tuz çözeltileri, otoklavda 2 atü basınç altında ve 120°C'deki doygun buhar ile 20 dakika sterillenmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra laminer akışlı Class II steril kabinde tuz ve glukoz çözeltileri karıştırılmıştır. Tuz-glukoz çözeltisinden (katı besi ortamından), 10- 15 ml olacak şekilde sterillenmiş tüplere konulmuştur. Çözelti ile doldurulan tüpler, daha önce hazırlanan steril filtreler ile kapatılmış, eğdirilerek eğik agarlar elde edilmiş ve steril kabinde UV ışık altında katılaşması için bekletilmiştir. Daha sonra katı besi ortamı içeren eğik agarlar, alüminyum folyo ile sarılmış ve +4°C'de bir gece buzdolabında tutulmuştur. Mikroorganizma, eğik agarlar üzerine steril kabinde, alev yanında öze yardımıyla aktarılmış ve 32°C'de 20 saat inkübatörde çoğaltılmıştır. Katı besi ortamına aktarım, 7-10 günde bir yeni katı ortamına aktarılarak periyodik olarak tekrarlanmış ve çoğaltıldıktan sonra +4°C'de buzdolabında saklanmıştır.

Çizelge 8.1 Katı besi ortamı bileşimi

MADDE	DERİŞİM(g/L)
Glukoz	20
Maya Özütü	6
K_2HPO_4	3
$(NH_4)_2SO_4$	3.35
NaH2PO4	3.76
$MgSO_4.7H_2O$	0.52
$CaCl_2.4H_2O$	0.017
Agar	20

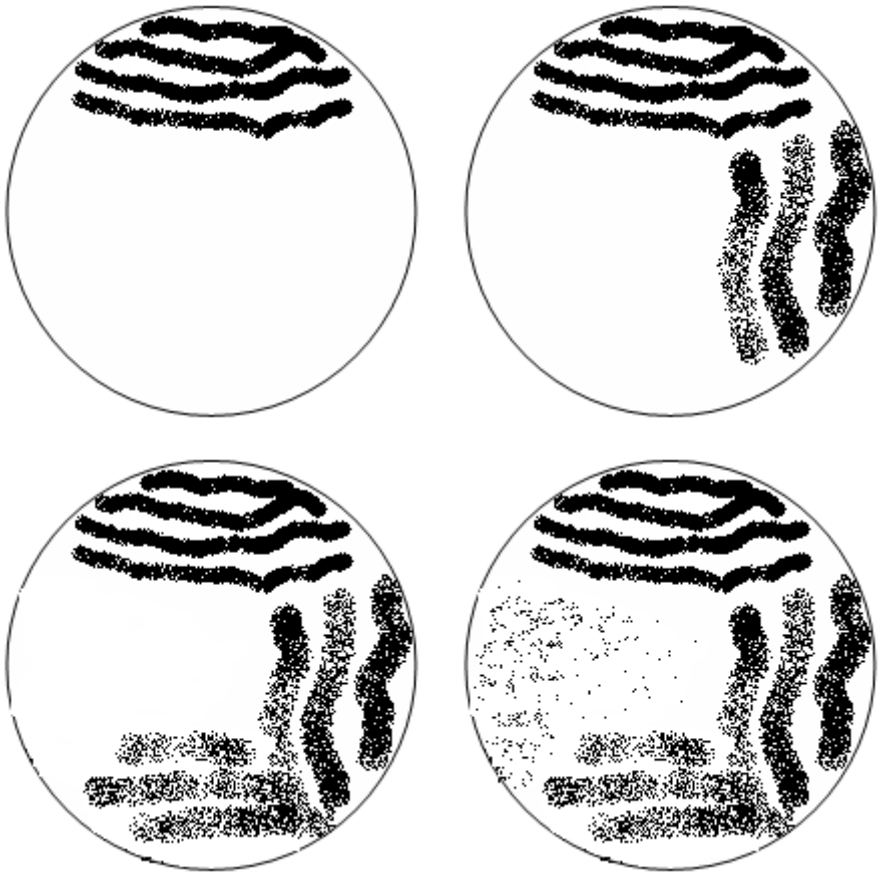
8.2.1.2 Tek koloni katı besi ortamı

Mikroorganizmaların çoğaltılması, aktivitelerinin yüksek olmasının sağlanması ve safsızlığının sağlanması için kullanılan yöntemlerden biri de tek koloni yöntemidir. Bu doktora tezi kapsamında, periyodik eğik agar aktarımlarının yanı sıra tek koloni ekimi de kullanılmıştır.

Çizelge 8.1'de verilen katı besi ortamı bileşimi, 0.0001 hane hassasiyetli terazide tartılarak tuz ve glukoz çözeltileri halinde hazırlanmıştır. Çözeltiler, otoklavda 2 atü basınç altında ve 120°C'deki doygun buhar ile 20 dakika sterillenmiş ve laminer akışlı Class II steril kabinde petri kaplarına dökülmüştür. Katı besi ortamı bulunan petri kapları, steril kabinde UV ışık altında katılaşıncaya kadar bekletildikten sonra bir gece +4°C'de buzdolabında saklanmıştır.

Tek koloni ekimi, laminer akışlı Class II steril kabinde bek alevinde gerçekleştirilmiştir. Kaynaktan öze ile alınan mikroorganizma petri kabının birinci bölgesine sürerek ekilmiştir. İkinci, üçüncü, dördüncü ekim bölgelerine her geçişte öze bek alevinde tutulduktan sonra soğutulmuş ve bir önceki bölgeden maya hücreleri alınarak sürme işlemine devam edilmiştir. Dördüncü bölüme sürülen öze, petri kabının ortasında yer alan beşinci bölgeye bek alevine tutulmadan sürülmüştür. Maya hücreleri, şekil 8.1 'deki gibi petri kabının 5 farklı bölümüne özenin sırayla sürülmesiyle, bölge sayısı arttıkça mikroorganizma sayısı giderek azalır. Böylece maya hücrelerinin, her sürme bölgesine bir önceki alandan daha az sayıda düşmeleri sağlanır. Petri kabının ortasına doğru yer alan 5. bölgede maya sayısı teke düşer ve bu bölgede çoğalarak tek koloni oluşturur. Bu yöntemle ekimin amacı her canlı hücrenin inkübasyon sonucu izole edilerek bir adet koloni oluşturmasıdır**.** Bu nedenle sürme yöntemine tek koloni düşürme yöntemi de denir.

Petri kabına ekilen mayalar 32°C'de 20 saat inkübatörde çoğaltılmıştır. Petri kabında çoğaltılarak elde edilen tek koloni eğik agara aktarılarak periyodik çoğaltmalara devam edilmiştir.



Şekil 8.1 Tek koloni ekimi

8.2.2 Sıvı besi ortamı

Sıvı besi ortamı bileşimi çizelge 8.2'de verildiği gibidir. Üç aşamalı olarak 1/10 ölçek büyütme ile çoğaltılacak hacimdeki toplam çözelti miktarı hesaplanmıştır. Besi ortamını oluşturan maddeler 0.0001 hane hassasiyetli terazide tartılmıştır, glukoz çözeltisi ve tuz çözeltisi olarak homojen hale gelinceye kadar magnetik karıştırıcıda ısıtılmadan karıştırılmıştır. Çözeltiler, otoklavda 2 atü basınç altında ve 120°C'deki doygun buhar ile 20 dakika sterillenmiştir. Tuz ve glukoz çözeltileri laminer akışlı Class II steril kabinde homojen hale getirilinceye kadar karıştırılmıştır. 20 saat önce katı besi ortamına aktarıldıktan sonra çoğaltılan mikroorganizmalar, steril kabinde 16 mL'lik ön sıvı ortamına öze yardımıyla ekilmiş ve 32°C'de 12 saat süre hava çalkalamalı inkübatörde çoğaltılmıştır. İkinci aşama olarak, mikroorganizma 160 mL'lik ikinci sıvı ortamına

aktarılmış ve birinci ölçek büyütme basamağındaki koşullarında çoğalma gerçekleştirilmiştir. Son olarak, 1/10 ölçek büyütmenin son aşaması 1600 mL'lik sıvı besi ortamı olan deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği biyoreaktöre aktarma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 8.2. Sıvı besi ortamı bileşimi

MADDE	DERİŞİM(g/L)
Glukoz	20
Maya Özütü	6
K_2HPO_4	3
$(NH_4)_2SO_4$	3.35
NaH2PO4	3.76
$MgSO_4.7H_2O$	0.52
$CaCl_2.4H_2O$	0.017

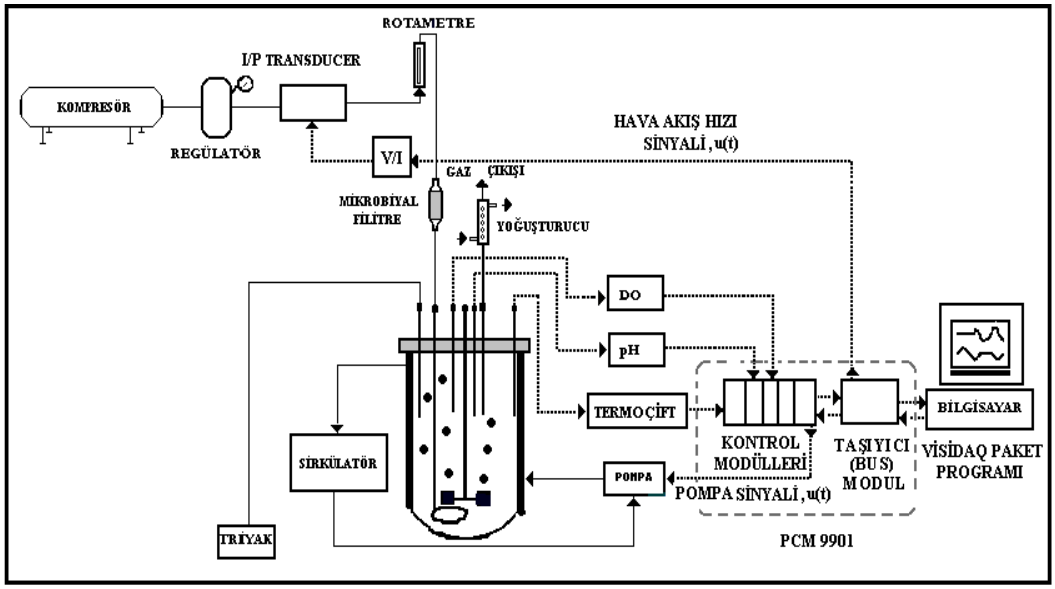
8.3 Deney Sistemi

Bölüm 3 ve Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, havalı koşullarda işletilen kesikli bir biyoreaktörde ekmek mayasının çoğaltılması, ürün verimliliği ve yaşamsal faaliyetlerini devam edebilmesi gerekli olan çözünmüş oksijen derişimi ve sıcaklık önemli işlerim parametreleridir. Bu çalışmada kullanılan deneysel sistemin gerektirdikleri ve çözünmüş oksijen derişimi üzerine daha etkili olan karıştırma hızı (Boyacıoğlu 2004) seçiminin mikroorganizmanın hücre duvarına verebileceği kötü etkilerden dolayı, çözünmüş oksijen derişimi kontrolu için ayarlanabilen değişken olarak hava akış hızı seçilmiştir.

Ürün verimliliği için önemli bir parametre olan biyoreaktör sıcaklığının kontrol edilmesi için ceketten geçirilen akışkanın hızı, dalgıç ısıtıcı, ceketten geçirilen akışkanın sıcaklığının değiştirilmesi ayar değişkeni olarak seçilebilirdi. Dalgıç ısıtıcı mikroorganizmaların bulunduğu besi ortamında bulunması ve mikroorganizmalarla temasta olması nedeniyle ayarlanabilen değişken olarak seçilmesi durumunda sınırlama

gerekecektir. Çünkü Bölüm 3'te de konu edildiği gibi mikroorganizmalar sıcaklık değişimlerine karşı çok hassastırlar. Çevrelerindeki ani sıcaklık değişimleri çoğalma verimini düşürmektedir. Ceketten geçirilen akışkanın sıcaklığının değiştirilmesi ise sisteme fazladan zaman gecikimine neden olacaktır. Bunlar yerine biyoreaktör ceketinden geçirilen akışkanın hızını ayarlamak ani sıcaklık değişimlerine neden olmayacağı (Ertunç 2003) ve daha az zaman gecikimine neden olacağı için bu çalışmada biyoreaktör sıcaklığını kontrol etmek amacıyla ceketten geçirilen akışkanın hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan deney sistemi şekil 8.2'de görüldüğü gibidir. Biyoreaktör, 2L. hacminde soğutma ceketli pyrex camdan yapılmıştır. Karıştırma, 2 tane 4 bıçaklı türbin tipte mekanik karıştırıcı ile sağlanmaktadır. Biyoreaktöre, deney süresince çözünmüş oksijen derişiminin kontrolunu sağlamak üzere sisteme on-line bağlı bir DOmetre (oksijenmetre), sıcaklık kontrolunu sağlamak için on-line bağlı termoçift (ısılçift), pH değişimi görmek için pHmetre, hava girişini sağlamak amacıyla dağıtıcı, yoğuşturucu, ısıtıcı, hava besleme hattı ve pompa yerleştirilmiştir. Ceketten geçen suyun sabit tutmak amacıyla da sirkülatör kullanılmıştır. Mikroorganizma derişimi, EK 5'teki bilgiler ışığında ölçülmüştür.



Şekil 8.2 Deney sistemi

Şekil 8.2'den de görülebileceği gibi; deney sisteminde, giriş veya ayarlanabilen değişken sinyaller ve çıkış veya kontrol edilen değişken sinyaller olmak üzere iki ana sinyal akışı bulunmaktadır.

Birinci sinyal akışı, ölçerlerden VISIDAQ paket programına kadar devam eden sinyal yoludur. Deneyler süresince sistemin çıkış (kontrol edilen) değişkenlerinden olan çözünmüş oksijen derişimi ile sıcaklık değerleri, sırasıyla biyoreaktör içine daldırılmış olan DOmetre ve termoçiftin ürettiği sinyaller olarak kontrol modülünde yer alan yükselticiye gönderilmektedir. Analog sinyaller, bilgisayarın kullanılabileceği dijital sinyallere dönüştürülmek üzere taşıyıcı (bus) modül aracılığıyla bilgisayar içindeki VISIDAQ paket programının da olduğu karta ulaşmaktadır.

İkinci sinyal akışı, VISIDAQ paket programından son kontrol elemanına kadar devam eden sinyal yoludur. Giriş değişkenlerinin değerleri sisteme iki farklı şekilde yollanır. Dinamik deneylerde sistemin bu giriş değişken değerleri kullanıcı (programcı) tarafından girilir, kontrol deneylerinde ise kontrol programının hesapladığı değerler sisteme gönderilir. Sisteme gönderilen/gönderilecek olan giriş değişkenleri sinyalleri Visiual Basic dilinde yazılmış olan dinamik ve/veya kontrol programına göre taşıyıcı (bus) modüle, oradan da son kontrol elemanına gönderilmektedir. Böylece giriş değişkeni olarak gönderilmesi/gönderilmemesi gereken hava ve soğutma suyu sisteme uygulanmış olur.

8.4 VISIDAQ Veri Alma-İşleme-Veri Gönderme Paket Programı

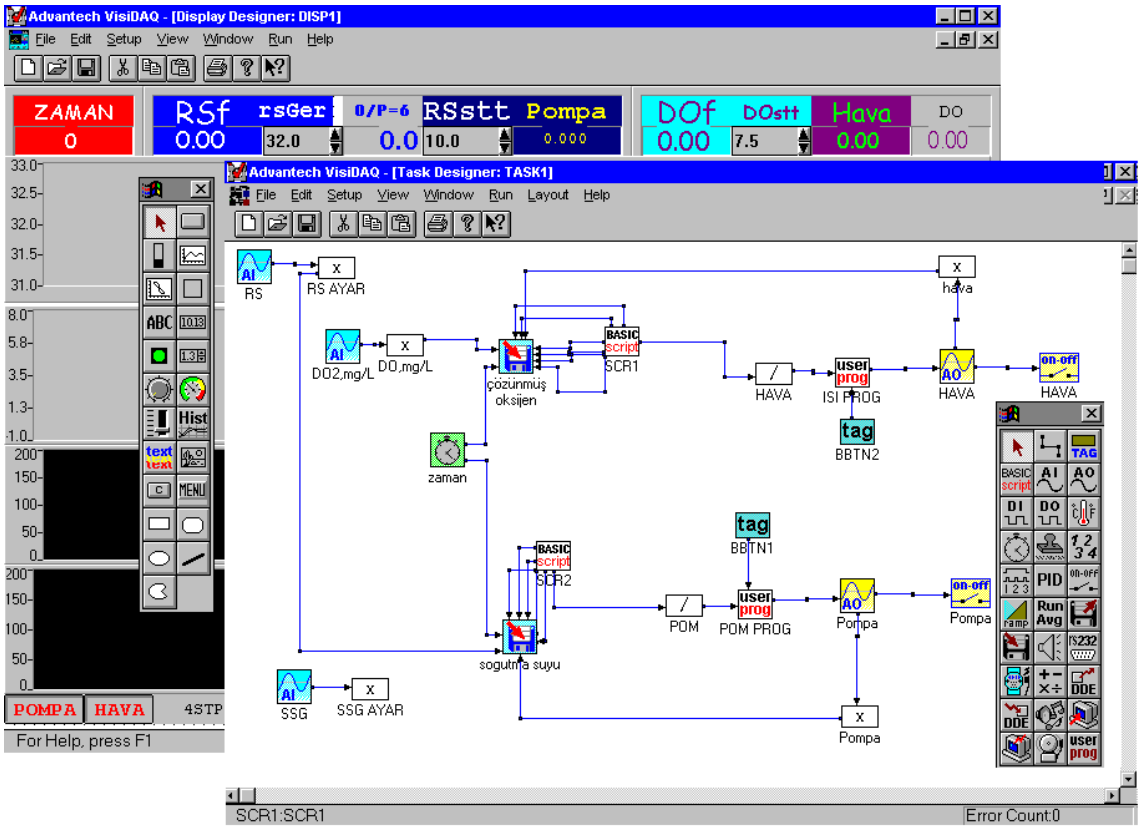
Deneysel çalışmalarda bilgisayar programı olarak VISIDAQ veri alma-işleme-veri gönderme paket programı kullanılmıştır. Bu program, Windows temelli veri işleme, analiz, kontrol ve görsel temelli bir programdır. Sistemin giriş, çıkış değişkenleri ile hesaplanan değerleri ekranda hem sayısal hem de grafiksel olarak görülebilmesiyle kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Task Designer ve Display Designer olarak iki pencereden oluşmaktadır.

Task Designer penceresinde sistemin giriş değişkenleri, çıkış değişkenleri, veri kayıt yerleri, kontrol programı ve bunlara ait bağlantılar yer almaktadır. AI kutucukları sistemden çıkan sinyalleri (çözünmüş oksijen derişimi, biyoreaktör sıcaklığı, pH, soğutma suyu sıcaklığı vs gibi), AO kutucukları sisteme giren sinyalleri (pompa, hava akış hızı,triak vs gibi), ET zamanı, SOC kutucukları farklı matematiksel işlemler yapılmasını, ON/OFF kutucukları anahtar modülleri ve Basic Script kutucuğu kontrol algoritmasını simgeleyen bazı kutucuk örnekleri olarak verilebilir. Kontrol programı Visual Basic dilinde yazılmaktadır. Bu kutuların düzenlenmesinde ve bağlantıların yapılmasında çok dikkat edilmelidir. Yanlış yapılacak bir bağlantı ve/veya yanlış seçim yapılması sistemin doğru tanımlanmasına ve sinyallerin yanlış gönderilmesine neden olacaktır. Bilgisayardan çıkan ve bilgisayara giren sinyaller, kartta ve taşıyıcı (bus) modülde yeralan çeşitli kanallar yoluyla gidip gelmektedir. AO ve AI kutucuklarında yer alan kanal seçimleri bu nedenle çok önemlidir. Deney sistemi 2 tane giriş sinyaline, 5 tane çıkış sinyaline izin vermektedir. Biyoreaktör sıcaklığını ifade eden termoçift sinyalleri sıfırıncı kanaldan, soğutma suyu sıcaklığını ifade eden termoçift sinyalleri birinci kanaldan, çözünmüş oksijen derişimini ifade eden DOmetre sinyalleri ikinci kanaldan bilgisayara girmektedir. Bilgisayardan çıkan sinyallerden de hava akış hızı sinyali sıfırıncı kanaldan I/P transducera, soğutma suyu akış hızı sinyali birinci kanaldan pompaya ulaşmaktadır.

ET kutucuğu, deney süresini veya deney saatini gerçek zamanlı (real-time) görmek ve/veya kaydetmek amacıyla kullanılabilir. Giriş ve çıkış sinyallerini, zaman ve programda hesaplanan değerler kayıt yapılmak isteniyorsa her bir veri için LOG kutucuğuna bağlantıların yapılması gerekir. Kontrol programının yazıldığı Basic Script kutucuğu pompa ve hava akış hızı değerleriyle birlikte ancak 8 farklı değişkenin LOG kutucuğuna kayıt yapılmasına imkan vermektedir. Visual Basic dilinde yazılan algoritmanın yazıldığı kutucuğun adı ise Basic Script olarak geçmektedir. Basic Script'in yazılımında sinyallerin alındığı kanalların ve değerlerin kesirli/tam sayı olduğunun dikkatli tanımlanması gereklidir. Algoritmanın sonunda ilk 2 tanesi sistemin giriş değişkeni olmak üzere toplam 8 tane değişken bulunmaktadır. Programdaki daha çok değişken kaydetmek isteniyorsa program içinde başka bir dosya açılmalı ve kayıt edilmesi istenen değişkenler belirtilmelidir. SOC kutucukları ise sinyaller ile ölçülen

değerler arasındaki ölçümlerin doğru yapılması için matematiksel işlemlerin yapıldığı bölümdür. Bu bahsedilen ana kutucuklar dışında kullanılan başka kutucuklar da bulunmaktadır.

İkinci pencere olan Display Designer sistemden on-line olarak elde edilen değerleri(sinyalleri) ekranda anında (real-time) rakamsal ve grafiksel olarak görmeyi sağlamanın yanı sıra istenildiğinde sistemin herhangi bir bölümünü (pompa, hava akış hızı) bilgisayardan anında kapatmayı veya değerini değiştirmeyi sağlamaktadır (Şekil 8.3). Task Designer penceresi gibi Display Designer'da yer alan kutuların ve grafiklerin de tanımlamalarının, maksimum ve minimum değerlerininin, tam sayı/kesirli sayı gibi özelliklerinin doğru girilmesinin sağlanması önemlidir (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 VISIDAQ Task Designer ve Display Designer görünümü

8.5 Deney Sisteminde Kontrol Çevriminde Kullanılan Ekipmanlar

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi sistemde kullanılan bütün ekipmanların hem prosese uygun olması hem de birbirlerine uygun olmasına dikkat edilmelidir. Kontrol edilen ve ayarlanabilen değişken seçimleri yapıldıktan sonra sistemden alınacak ölçümler ve ayarlamalar için ekipmanların uygun şekilde seçilmesi, kalibrasyonunun yapılması ve bağlantılarının ayarlanması önemli basamaklardan biridir. Bu nedenle ilk olarak pompa, transducer ve DOmetre kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Proses Kontrolde önemli olan sadece bir değerin ölçülmesi değil hem doğru ve gürültüsüz ölçülmesi hem de özellikle kontrol edilen değişken ise on-line ölçülebilmesidir. Bu amaçla, sistemde kontrol edilen değişkenler olan DO ve sıcaklık için on-line ölçümlerin yapılabileceği ölçerler kullanılmış ve kontrol performansının yüksek olabilmesi için DO ve sıcaklık için deneysel olarak filtre çalışmaları yapılarak gürültülerin azaltılması sağlanmıştır.

Deney sistemindeki giriş sinyalleri volt cinsinden, çıkış sinyalleri mA cinsinden elektrik sinyali olarak ayarlanmıştır. Bilgisayara (algoritmaya) giren sinyallerinin 0-10 V, bilgisayardan (algoritmadan) çıkan sinyallerinin 4-20 mA olması gerekmektedir. Bu nedenle sisteme bağlı tüm ekipmanlar için bu kısıtlamaların dikkate alınması çok önemlidir. Sistemde çözünmüş oksijen derişimi ölçümü için kullanılan DOmetrenin çıkış voltajı veri aktarım sistemine uygun olmadı için 10X amplifier (yükseltici) kullanılarak bilgisayara giriş sinyalinin 0-10 V aralığında olması sağlanmıştır. Benzer şekilde termoçiftler için de yükselticiler kullanılmıştır. Hava vanası yerine kullanılan I/P transducerın kullanılabilmesi için de V/I çevirici kullanılmıştır. Böylece bilgisayardan çıkan 0-10 V sinyali 4-20 mA çevrilmiş ve I/P transducera akım sinyali olarak gönderilmiştir. Sisteme bağlı transducer 1.2 bar basınçta çalışmaya uygun olduğu için, 12 bar basınç sağlayan kompresör ve transducer arasına bir regülatör bağlanarak basınç 1.2 bar'a düşürülmüştür. Biyoreaktöre beslenecek hava sinyali I/P transducera gönderilmiş ve 1.2 bar sabit basınçtaki havadan algoritmadan çıkan sinyalle doğru orantılı olarak hava sisteme beslenerek çözünmüş oksijen derişimi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Diğer son kontrol elemanı olan pompaya, algoritmadan çıkan sinyaller gönderilir ve sirkülatörden alınan sabit sıcaklıktaki soğutma suyu sinyallerle doğru orantılı olarak sisteme beslenerek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

9. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çok Girdili-Çok Çıktılı Kontrolun Ekmek Mayası Üretimine Uygulanması adlı bu doktora tezi çalışması, hem teorik hem de deneysel olarak yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Önceki bölümlerde anlatılan kuramsal bilgiler ışığında ve Bölüm 8'de verilen materyal metodlar kullanılarak yapılan çalışmalar bu bölümde verilmiştir. Araştırma Bulguları'ndan oluşan bu bölüm, dinamik çalışmalar ve kontrol çalışmaları olarak 2 ana bölüm ve onları oluşturan alt bölümlerden oluşmaktadır.

9.1 Dinamik (Açık-Hat) Çalışmaları

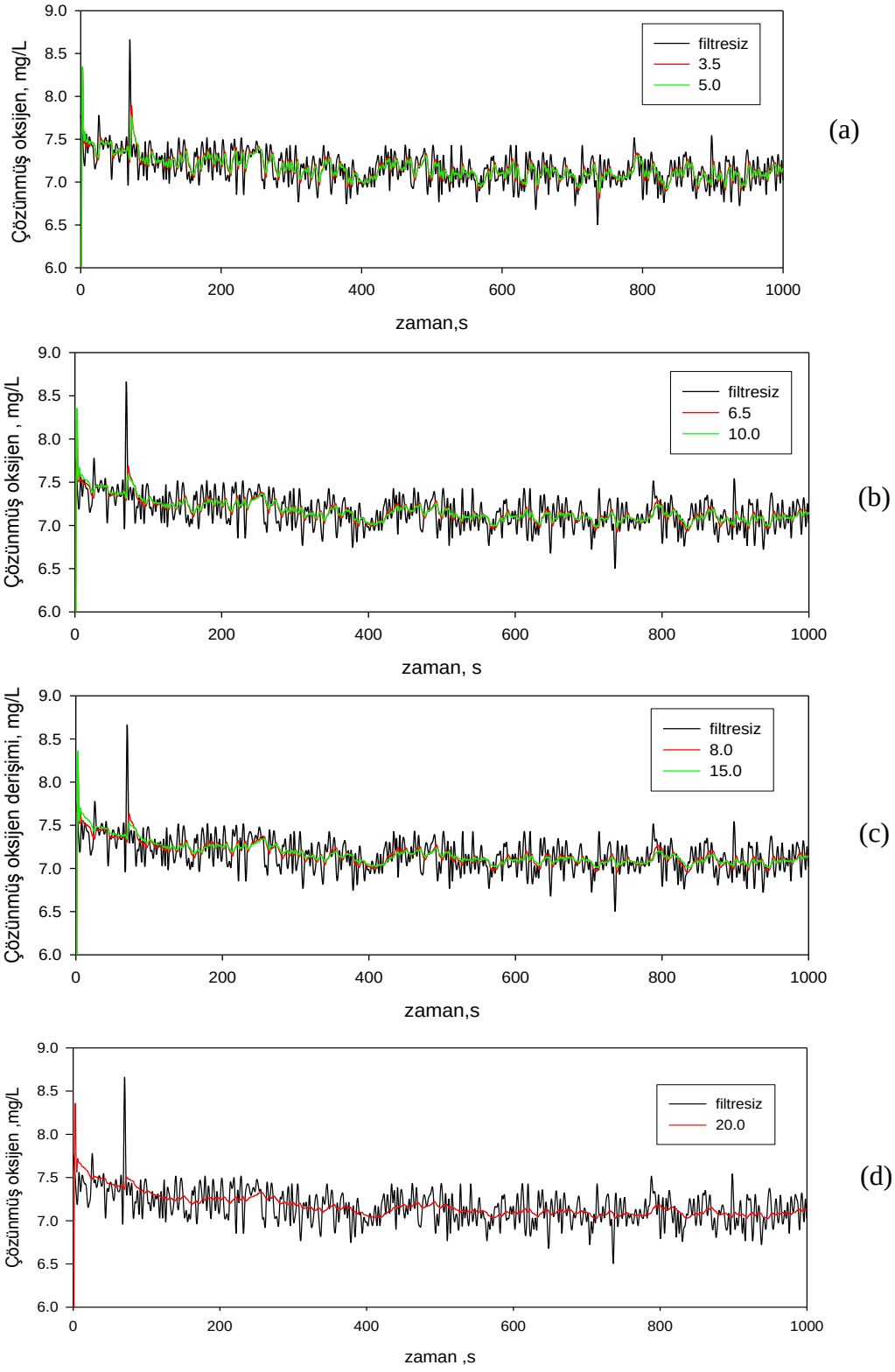
Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, bir prosesi iyi kontrol edebilmek için öncelikle o sistemdeki ölçümlerin doğru olarak yapılması ve sinyallerin çok iyi iletilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bir proseste çalışmadan önce kalibrasyon ve gerekiyorsa filtre çalışmalarının yapılması gerekir. Bu nedenle dinamik çalışmalara kalibrasyon ve filtre çalışmaları ile başlanmıştır.

9.1.1 Filtre ve kalibrasyon çalışmaları

Ekmek mayası üretiminde SISO ve MIMO kontrolun gerçekleştirildiği bu tez kapsamında çalışmalara dinamik çalışmalar ile başlanmıştır. Bir sistemi iyi şekilde kontrol edebilmenin önemli parametrelerinden biri de sistemin giriş ve çıkış değişkenlerinden alınan ve gönderilen sinyallerin doğruluğudur. Bu nedenle, çalışmalara öncelikle DOmetre kalibrasyonu (EK 1), termoçift kalibrasyonu (EK 2), transducer kalibrasyonu (EK 3) ve pompa kalibrasyonu (EK 4) yapılarak başlanmıştır. Kalibrasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra sistemde var olan gürültülerin etkisini yok etmek için çözünmüş oksijen derişimi ile biyoreaktör sıcaklığı filtrelenerek, çıkış (aynı zamanda kontrol edilen) değişkenleri sinyallerinin doğru olarak okunması sağlanmıştır.

Sisteme on-line bağlı olan DOmetre kalibrasyonundan sonra çıkış değişkenlerinden biri olan çözünmüş oksijen derişiminin değişimi (kontrol edilmesi) sırasında oluşan gürültüleri azaltmak amacıyla birinci mertebeden bir filtre algoritmaya yerleştirilmiştir. Bu amaçla en uygun filtre katsayısının bulunması için 3.5 ile 20 arasında 7 farklı filtre katsayıları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylere ait grafikler şekil 9.1'de verilmiştir.

Filtre çalışmalarında seçilen filtre katsayısı, filtre edilen değişkenin hareketlerini görünmeyecek ve/veya geciktirecek hale getirmemelidir. Çözünmüş oksijen derişiminin hareketini daha iyi görmek amacıyla yapılan deneysel filtre çalışmaları sonucunda, bundan sonraki deneysel çalışmalarda çözünmüş oksijen derişimi verilerinde birinci mertebe filtre katsayısı olarak 10 kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 9.1 DO derişimine farklı filtre katsayıları kullanılarak birinci mertebeden filtre uygulanması

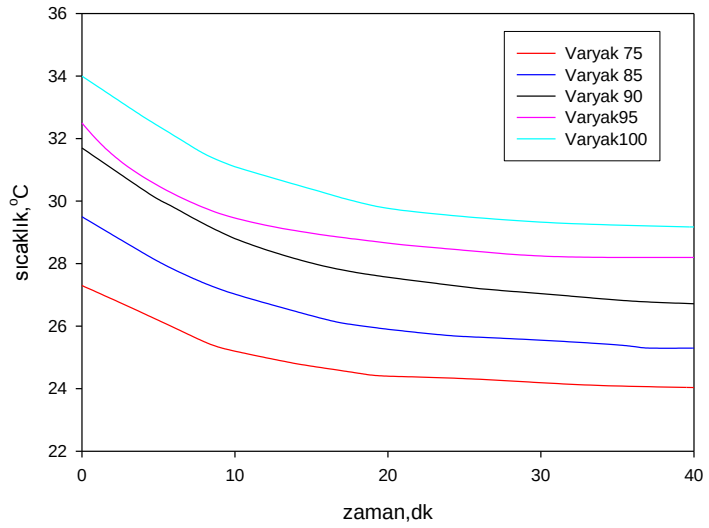
a.DO derişiminin filtre edilmemiş değeriyle filtre katsayısı 3.5 ve 5.0 durumunda
b.DO derişiminin filtre edilmemiş değeriyle filtre katsayısı 6.5 ve 10.0 durumunda
c.DO derişiminin filtre edilmemiş değeri ile filtre katsayısı 8.0 ve 15.0 durumunda
d.DO derişiminin filtre edilmemiş değeri ile filtre katsayısı 20.0 durumunda

9.1.2 Bağıl Kazanç Analiz (RGA) deneyleri

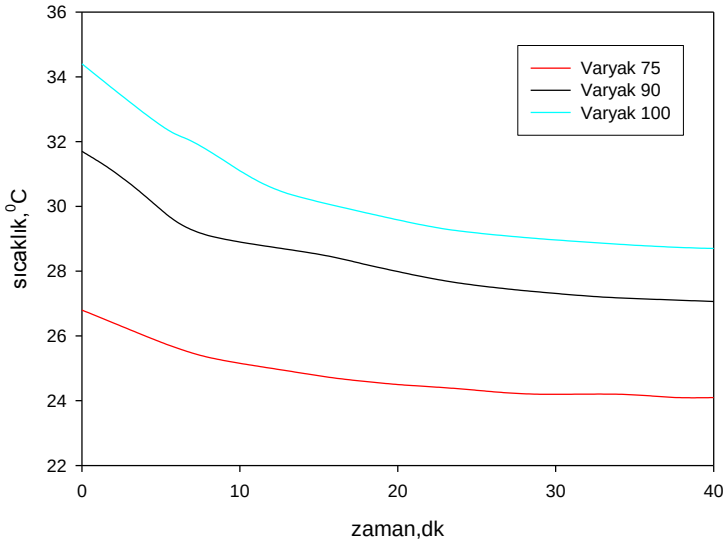
Sistemin ayar değişkeni olarak seçilen giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu ve aralarındaki ilişkileri bulmak amacıyla, çizelge 8.2'de verilen bileşimlerde hazırlanan sıvı besi ortamında yapılan dinamik deneylerdir. Sistemin giriş değişkenine verilen etkilerin çıkış değişkeni üzerindeki etkisinin büyüklüğü özellikle MIMO kontrol deneylerinde önemlidir. Daha sonra yapılacak kontrol çalışmalarında karşılaşılabilecek etkileşimleri engellemek ve/veya azaltmak amacıyla giriş-çıkış değişkenleri arasındaki bağlantılar şekil 4.8'deki gibi kullanılması gerekebileceği düşünülerek gerçekleştirilmiştir.

9.1.2.1 RGA sıcaklık deneyleri sonuçları

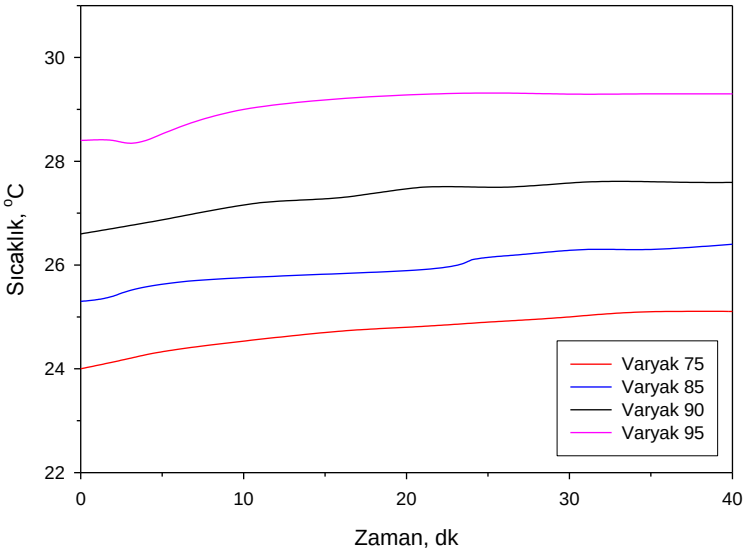
Kesikli biyoreaktörde sıcaklığın dinamik incelmesi amacıyla giriş değişkenlerinden biri olan soğutma suyu akış hızına pozitif ve negatif etkiler verilerek, sistemdeki sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Daha sonra diğer bir giriş değişkeni olan hava akış hızına pozitif ve negatif etkiler verilmiş, sistemdeki sıcaklık değişimleri incelenmiştir.



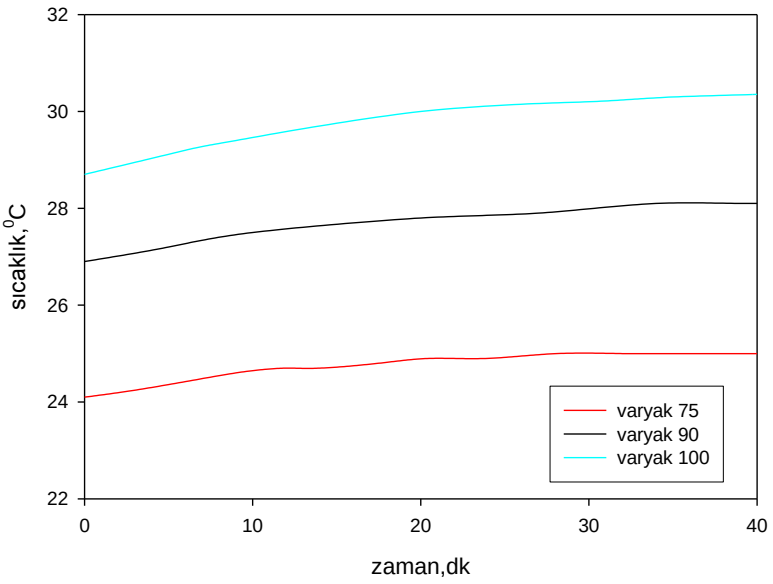
Şekil 9.2 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi



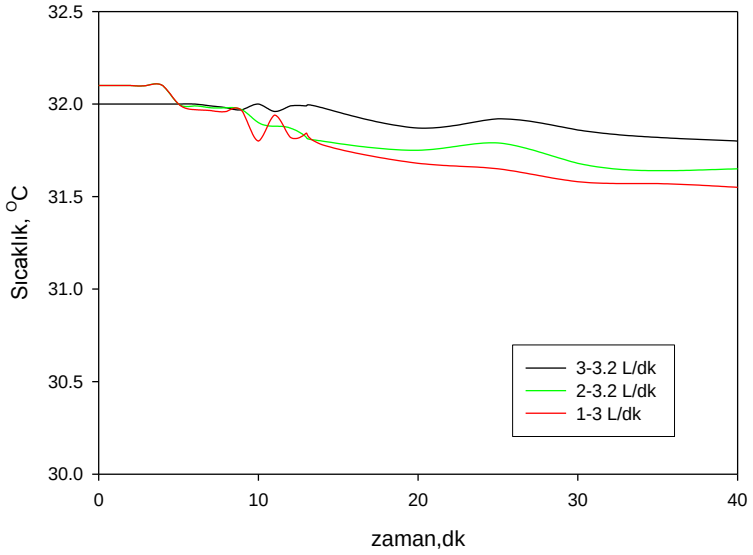
Şekil 9.3 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinde 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 9.4 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 9.5 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi

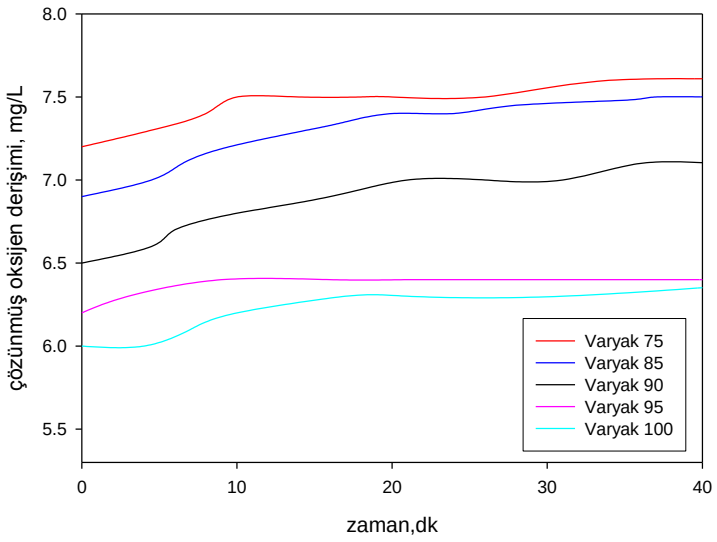


Şekil 9.6 Sabit varyak ve pompa akış hızı değerlerinde hava akış hızına çeşitli değerlerde basamak etki verildiğinde sıcaklığın zamanla değişimi

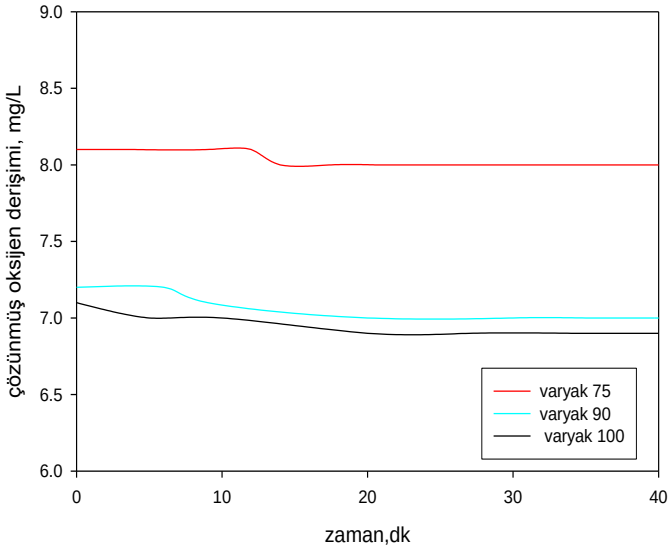
Sıvı besi ortamında yapılan bu deneylerde beklenildiği gibi ve şekil 9.2-9.6'lerdeki grafiklerden de görüldüğü gibi sıcaklık, soğutma suyu akış hızına verilen etkilerden hava akış hızına verilen etkilerden daha fazla etkilenmektedir.

9.1.2.2 RGA çözünmüş oksijen derişimi deneyleri sonuçları

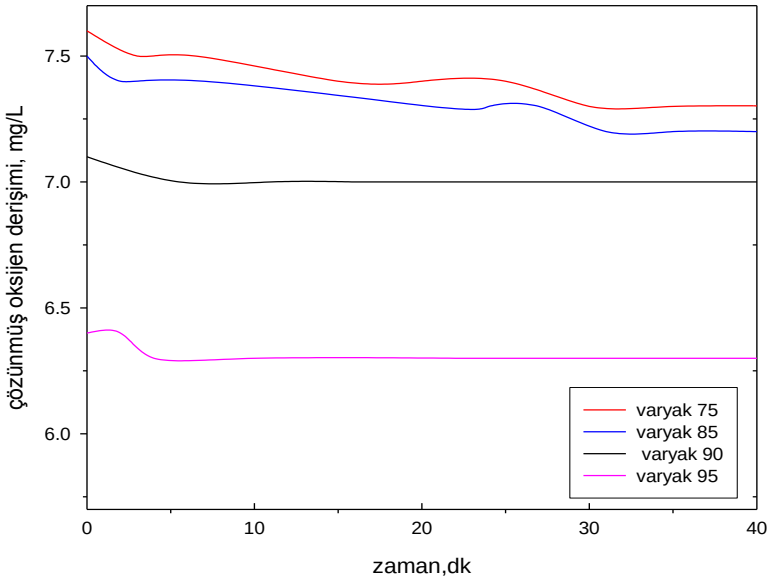
Bu doktora tezi kapsamında, çıkış değişkenlerinden biri olan çözünmüş oksijen derişiminin giriş değişkenlerinden nasıl ve ne kadar etkilendiğinin belirlenmesi amacıyla giriş değişkenlerine etkiler verilmiştir. Deneyler çizelge 8.2'de verilen bileşimlerde hazırlanan sıvı besi ortamında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak soğutma suyu akış hızına pozitif ve negatif etkilere verilerek, sistemdeki çözünmüş oksijen derişiminin değişimleri incelenmiştir. Daha sonra hava akış hızına pozitif ve negatif etkiler verilmiş, sistemdeki çözünmüş oksijen derişimi değişimleri incelenmiştir.



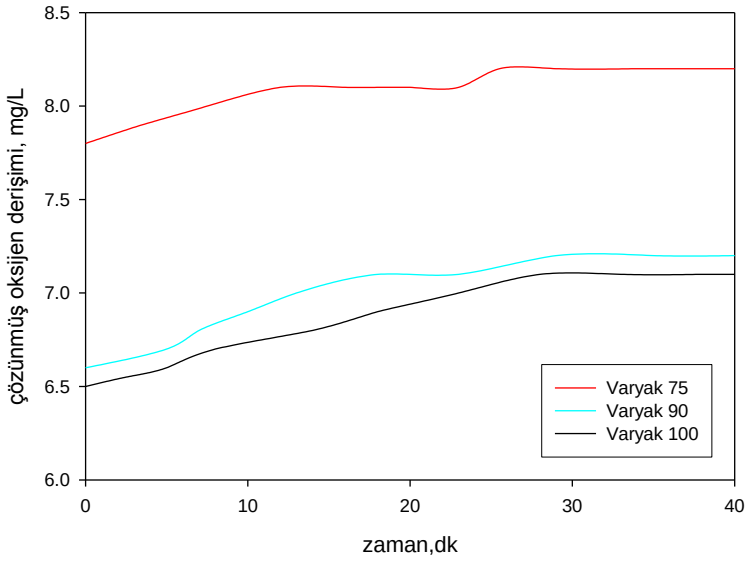
Şekil 9.7 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi



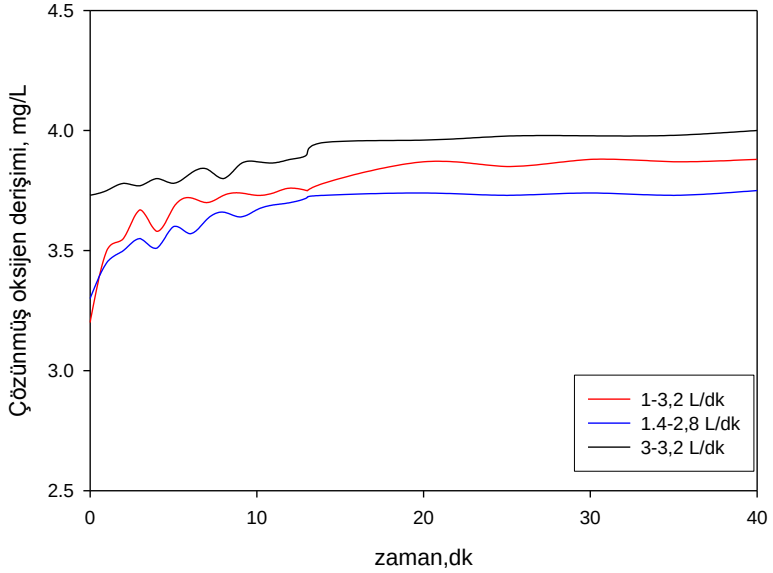
Şekil 9.8 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinden 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi



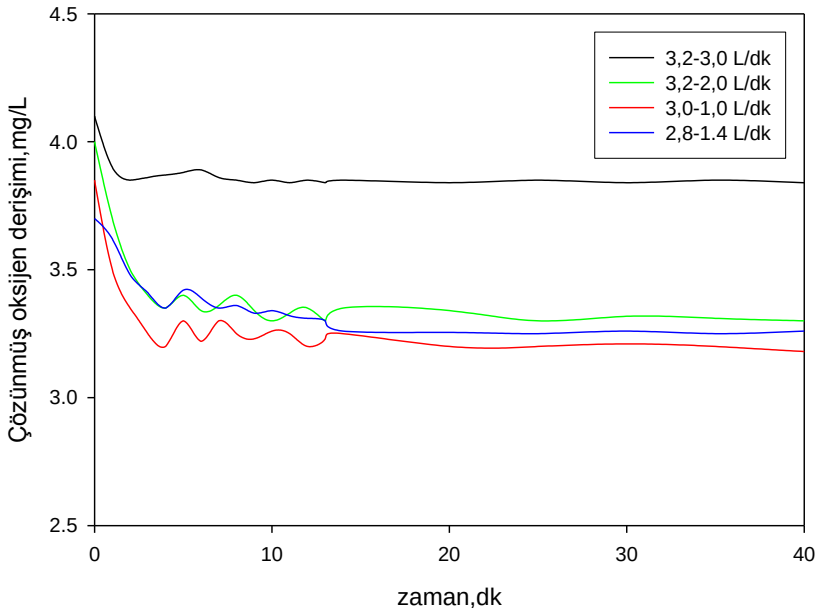
Şekil 9.9 1 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 378 mL/dk değerinde 182 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi



Şekil 9.10 2 L/dk sabit hava akış hızında ve farklı varyak değerlerinde soğutma suyu akış hızına 76 mL/dk değerinden 378 mL/dk değerine basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi



Şekil 9.11 Sabit varyak ve soğutma suyu akış hızı değerlerinde çeşitli değerlerde hava akış hızına basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi



Şekil 9.12 Sabit varyak ve soğutma suyu akış hızı değerlerinde çeşitli değerlerde hava akış hızına basamak etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin zamanla değişimi

Şekil 9.7-9.12'lerden de görüldüğü ve beklenildiği gibi soğutma suyu akış hızı arttırıldığında sıcaklık düşmüştür. Gazların sudaki çözünürlüğünün sıcaklık ile ters orantılı olması nedeniyle, sıvı besi ortamındaki çözünmüş oksijen derişimi artmıştır.

Sistemin giriş değişkenleri olan varyağa (ısı), soğutma suyu akış hızına ve hava akış hızına çeşitli koşullarda etkiler verildiğinde sistemin çıkış değişkenleri olan sıcaklık ve çözünmüş oksijen derişimi üzerine oldukça etkili olduğu grafiklerden de görülebileceği gibi gözlemlenmiştir. Sistemin giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki etkilerin nasıl olduğunu ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla sistemin kazançları her bir deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapılan bu RGA deneylerine ait kazanç hesaplamaları çizelge 9.1-9.4'lerde görülmektedir.

Çizelge 9.1 Soğutma suyu akış hızına etki verilerek yapılan sıcaklık deneylerinin kazançları

Deney Koşulları	Verilen etki	Kazanç(^{o}C/ml*dk)
1L/dk varyak 75	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.011
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-6.12e-3
1L/dk varyak 85	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.014
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-5.61e-3
1L/dk varyak 90	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.016
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-3.06e-3
1L/dk varyak 95	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.017
1L/dk varyak 100	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.018
2L/dk varyak 75	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-8.94e-3
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-4.59e-3
2L/dk varyak 90	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.016
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-6.6e-3
2L/dk varyak 100	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	-0.0188
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	-8.67e-3

Çizelge 9.2 Soğutma suyu akış hızına etki verilerek yapılan çözünmüş oksijen derişimi deneylerinin kazançları

Deney Koşulları	Verilen etki	Kazanç (mg*dk/L^{2})
1L/dk varyak 75	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.32
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	1.53
1L/dk varyak 85	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.98
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	1.02
1L/dk varyak 90	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.98
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	0.51
1L/dk varyak 95	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.98
1L/dk varyak 100	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.98
2L/dk varyak 75	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.32
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	0.51
2L/dk varyak 90	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.65
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	1.02
2L/dk varyak 100	76ml/dk'dan 378ml/dk'ya	1.98
	378ml/dk'dan 182 ml/dk'ya	1.02

Çizelge 9.3 Hava akış hızına basamak etkiler verilerek yapılan sıcaklık deneylerinin kazançları

Verilen etki		Kazanç
Varyak 100 Pompa 100	3.2ml/dak'dan 3ml/dk'ya	-1
	3.2ml/dak'dan 2ml/dk'ya	-0.375
	3ml/dak'dan 1ml/dk'ya	-0.275

Çizelge 9.4 Hava akış hızına basamak etkiler verilerek yapılan çözünmüş oksijen derişimi deneylerinin kazançları

Verilen etki		Kazanç
Varyak 100 Pompa 100	3.2ml/dak'dan 3ml/dk'ya	-1.3
	3.2ml/dak'dan 2ml/dk'ya	-0.583
	3ml/dak'dan 1ml/dk'ya	-0.335
	2.8ml/dk'dan 1.4ml/dk'ya	-0.314

9.1.3 Sistem tanımlama deneyleri sonuçları

Doktora tezinin önceki bölümlerinde özelikle Bölüm 4 ve Bölüm 5'te ayrıntılı olarak anlatıldı gibi bir sistem, kontrol performansı yüksek olacak şekilde kontrol edilmek isteniyorsa öncelikle o sistemin giriş-çıkış değişkenlerinin, giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi önemlidir. Bir sistemin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi için yapılması gereken iki önemli nokta bulunmaktadır. Bunlardan birincisi uygun yatışkın koşul değerlerinin bulunması, ikincisi ise sistemin dinamiğinin ve sistem tanımlanmasının yani modellemesinin gerçekleştirilmesidir.

Bir sistemde dinamik veya kontrolu olarak çalışmak istenildiğinde en önemli unsur sistemin yatışkın hale getirilmesidir. Sistemde çalışmaların doğru olarak yapılabilmesi için öncelikle sistemin yatışkın halde olması zorunludur. Sistem yatışkın hale gelmeden yapılacak olan çalışmaların sonuçları başlangıç noktaları farklı olacağı için yanıltıcı olabilir. Kontrol deneylerinde de sistem yatışkın hale getirilmeden başlanacak olursa, sistemin kararsız hale gelmesi veya kontrol performansının düşük olmasına neden olacaktır. Bu nedenlerden dolayı, sistem tanımlama ve kontrol çalışmaları öncesi ilk

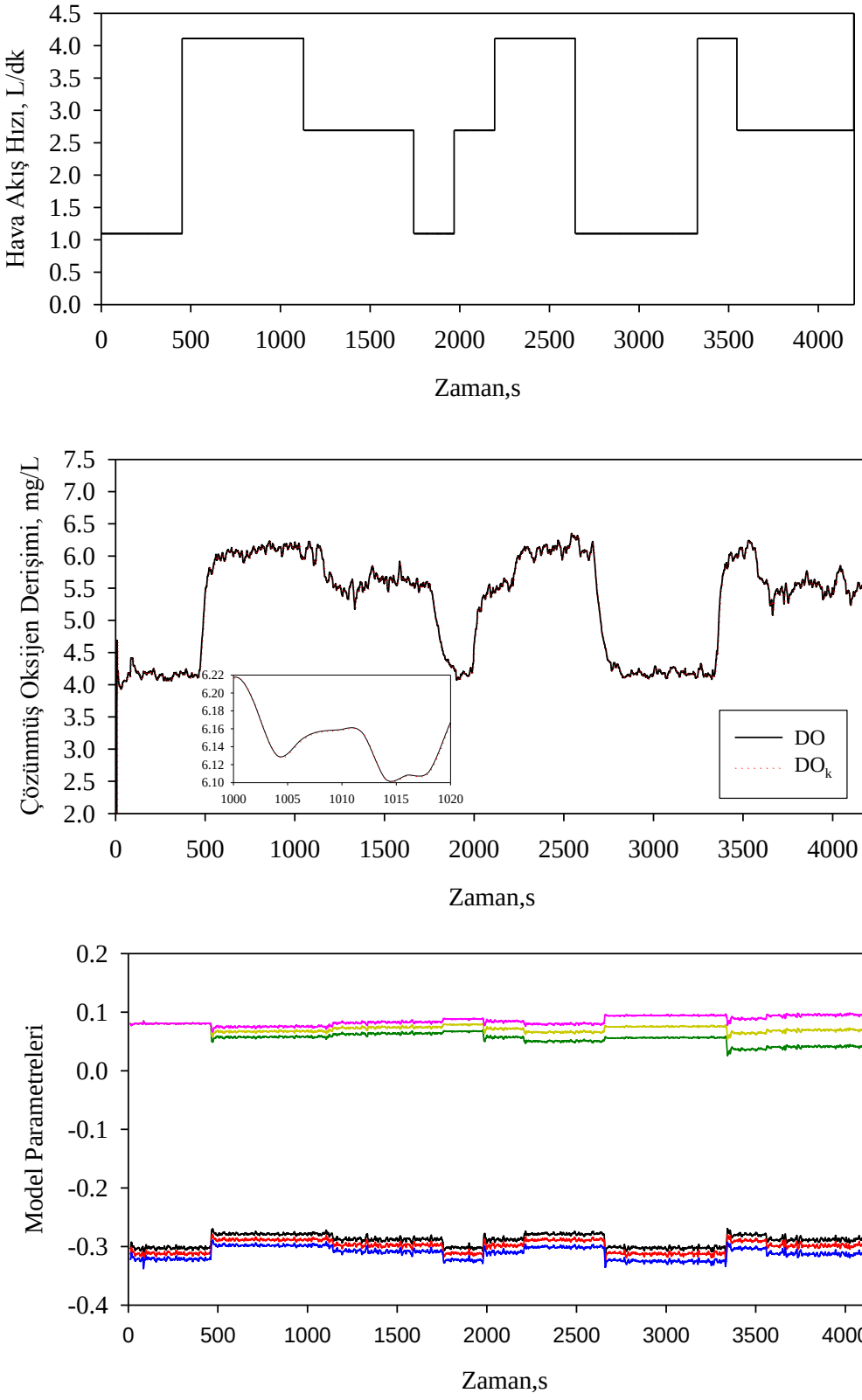
olarak sistemi ılımlı[3] koşullarda yatışkın hale getirecek sistem parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, 35 pompa sinyalinde yani yaklaşık 62 mL/dk soğutma suyu akış hızında, 26ºC sirkülatör set noktasında, 26.5ºC soğutma suyu giriş sıcaklığında, 1.0 L/dk hava akış hızında sistemin 32ºC ve 7,5 mg/L çözünmüş oksijen değerinde en az 2 saatte sistemin yatışkın hale geldiği deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.

9.1.3.1 Çözünmüş oksijen derişiminin sistem tanımlama deneyleri sonuçları

Bir prosesin kontrolunun iyi bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ikinci aşama olarak prosesin tanınması, girdi-çıktı arasındaki ilişki ve/veya ilişkilerin belirlenmesi, o prosesin dinamiğinin incelenmesi ve sistem tanımlamasının yapılması gerektiği belirtilmişti. Bu amaçla, tez kapsamında gerçekleştirilmesi gereken biyotepkime ortamının çözünmüş oksijen derişiminin hava akış hızı ile kontrolu için, hava akış hızı ile çözünmüş derişimi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla hem deneysel hem de teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, sistem yatışkın hale getirildikten sonra, giriş değişkenlerinden biri olan hava akış hızına farklı genlik ve periyodlarda etki verilmiştir. Sistemin bu etkiye karşılık çıkış değişkeni olan çözünmüş oksijen derişiminin zamanla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada mikroorganizmanın tükettiği oksijenin yerine sisteme 1.2 L/dk sabit akış hızında N_2 gazı beslemesi yapılmıştır. Böylece, sisteme gönderilen havanın içindeki oksijenin bir kısmının N_2 ile sürüklenmesi sağlanmıştır. Sisteme on-line olarak bağlı olan bilgisayarda Visual Basic dilinde yazılan YEKK algoritması ile giriş-çıkış değişkeni arasındaki ilişki, sistem açık hatta iken gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonunda, giriş değişkeni hava akış hızı olmak üzere çıkış değişkenlerinden biri olan çözünmüş oksijen derişiminin çıkış değişkeni olması durumunda sistemin doğrusal bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

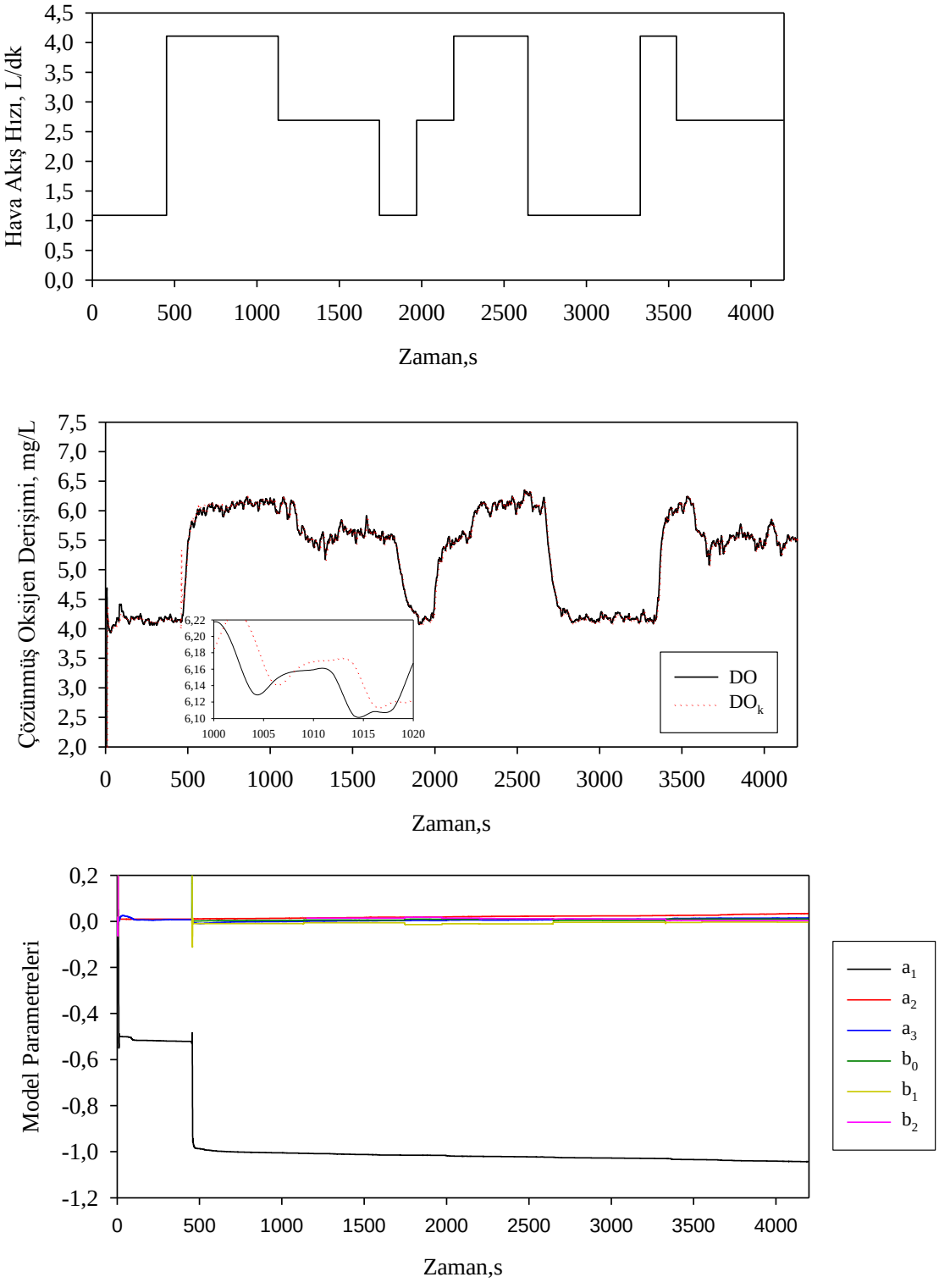
[3]Mayalar genellikle ılımlı koşullarda çoğalırlar (Bkz Bölüm 3).



Şekil 9.13 Farklı genlik ve periyodlarda hava akış hızına verilen etkiler sonucunda sistemin çıkış değişkeni DOnun zamanla değişimi (deneysel)

Sistemin giriş değişkeni hava akış hızı, çıkış değişkeni çözünmüş oksijen derişimi olmak üzere sistemin ARMAX model parametrelerinin, A ve B polinomlarının derecesinin sırası ile 3. ve 2. mertebeden olduğu bulunmuştur. Yapılan bu çalışmaya ait grafik şekil 9.13'de verilmiştir. Şekil 9.13'e bakıldığında sistemin çıkış değişkeni olan çözünmüş oksijen derişimi (DO) değeri ile sistem tanımlamadaki ARMAX modelden kestirilen çözünmüş oksijen (DO_k) neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Buna göre sistemin modelinin mertebesinin, örnekleme zamanının, kovaryans matrisin ilk değerinin, unutma çarpanının doğru seçildiği anlaşılmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, sistemin giriş değişkenlerinden biri olan hava akış hızına verilen etkiler sonucunda çıkış değişkenin zamanla değişim değerlerinin deneysel verileri ve *.m file olarak yazılan program MATLAB paket programı kullanılarak teorik olarak biyoreaktör sisteminin sistem tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara ait grafik şekil 9.14'de verilmiştir. Yapılan teorik çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 9.14 Farklı genlik ve periyotlarda hava akış hızına verilen etkiler sonucunda sistemin çıkış değişkeninin zamanla değişimi (teorik)

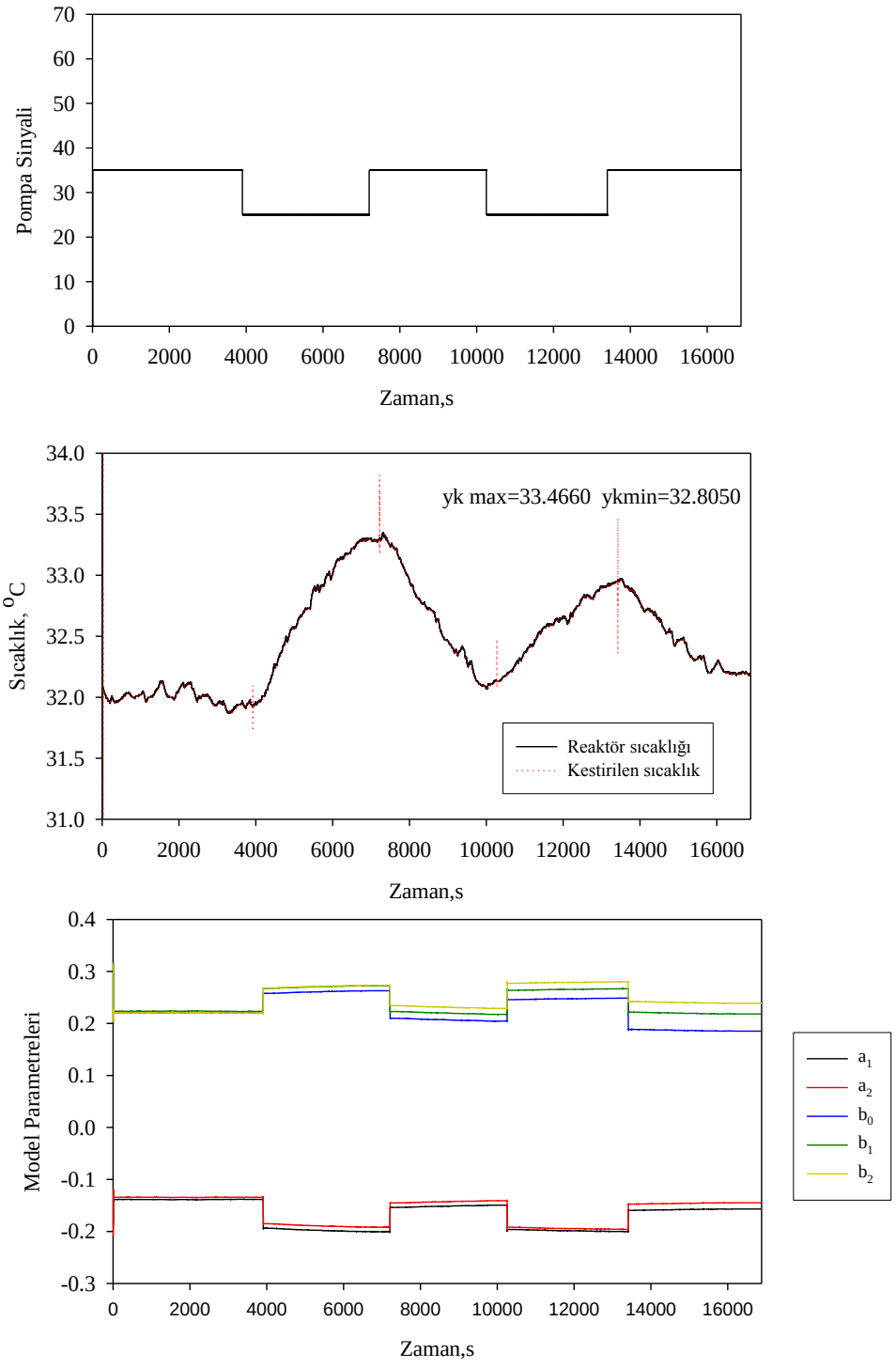
9.1.3.2 Biyoreaktör sıcaklığının sistem tanımlama deneyleri sonuçları

Bir prosesin kontrolunun iyi bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ikinci aşama olarak prosesin tanımlanması, girdi-çıktı arasındaki ilişki ve/veya ilişkilerin belirlenmesi, o prosesin dinamiğinin incelenmesi ve sistem tanımlamasının yapılması gerektiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu amaçla, tez kapsamında gerçekleştirilmesi gereken biyotepkime ortamının sıcaklığının kontrolu için, sıcaklık ile ilgili ilişkilerin belirlenmesi için dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir.

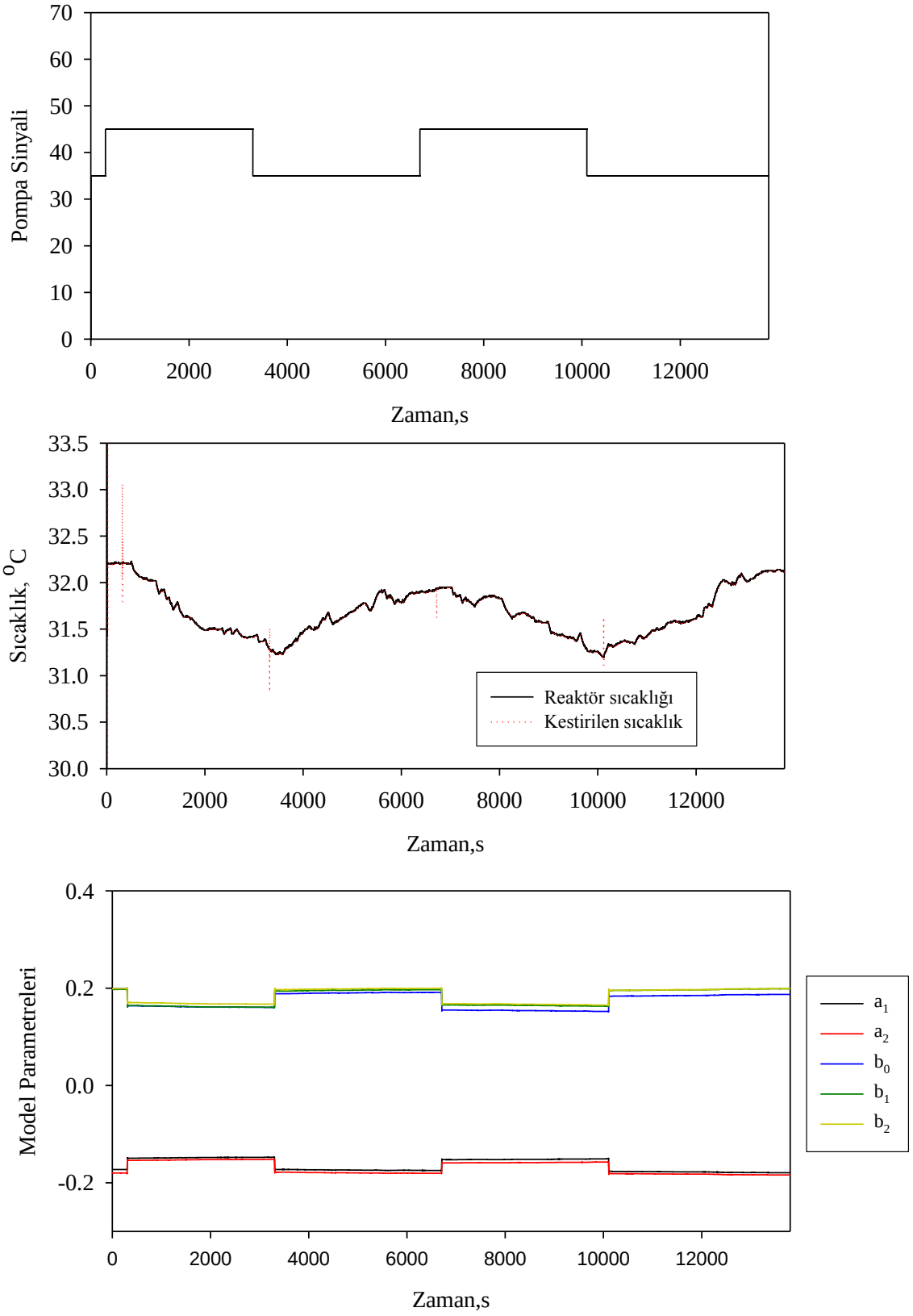
Bu doktora tezi çalışmasının bu bölümünde, sistemin giriş değişkenlerinden biri olan soğutma suyu ile tepkime ortamı sıcaklığı arasındaki ilişkiyi veren modeli belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar yer almaktadır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmalarda, sisteme on-line bağlı olan bilgisayarda Visual Basic dilinde yazılan Yinelemeli En Küçük Kareler algoritması ile sistemin modelinin tespit etmek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Sistem her deney öncesinde yatışkın hale getirilmiş daha sonra sistemin giriş değişkeni olan soğutma suyu akış hızına etkiler verilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Sistemin giriş değişkeni olan soğutma suyu akış hızı ile sistemin çıkış değişkeni olan biyoreaktör sıcaklığı arasındaki modeli bulmak için iki farklı sinyal türü kullanılmıştır. Çizelge 9.5'deki işletim koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, kare dalga etki ile periyodu ve genliği değişken olan ternary etki olmak üzere verilen bu iki farklı giriş sinyali değişimi kullanılarak sistemin bu etkilere karşı cevabı incelenmiştir.

Kare dalga etki için pompa sinyaline 35'ten 25'e ve 35'ten 45'e olacak şekilde iki farklı pompa sinyali etkisi verilmiştir. Farklı iki etki altında sistemin modelinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmalara ait grafikler şekil 9.15-9.16'lerde verilmiştir.



Şekil 9.15 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 35'ten 25'e, 25'ten 35'e değiştirilerek kare dalga etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar



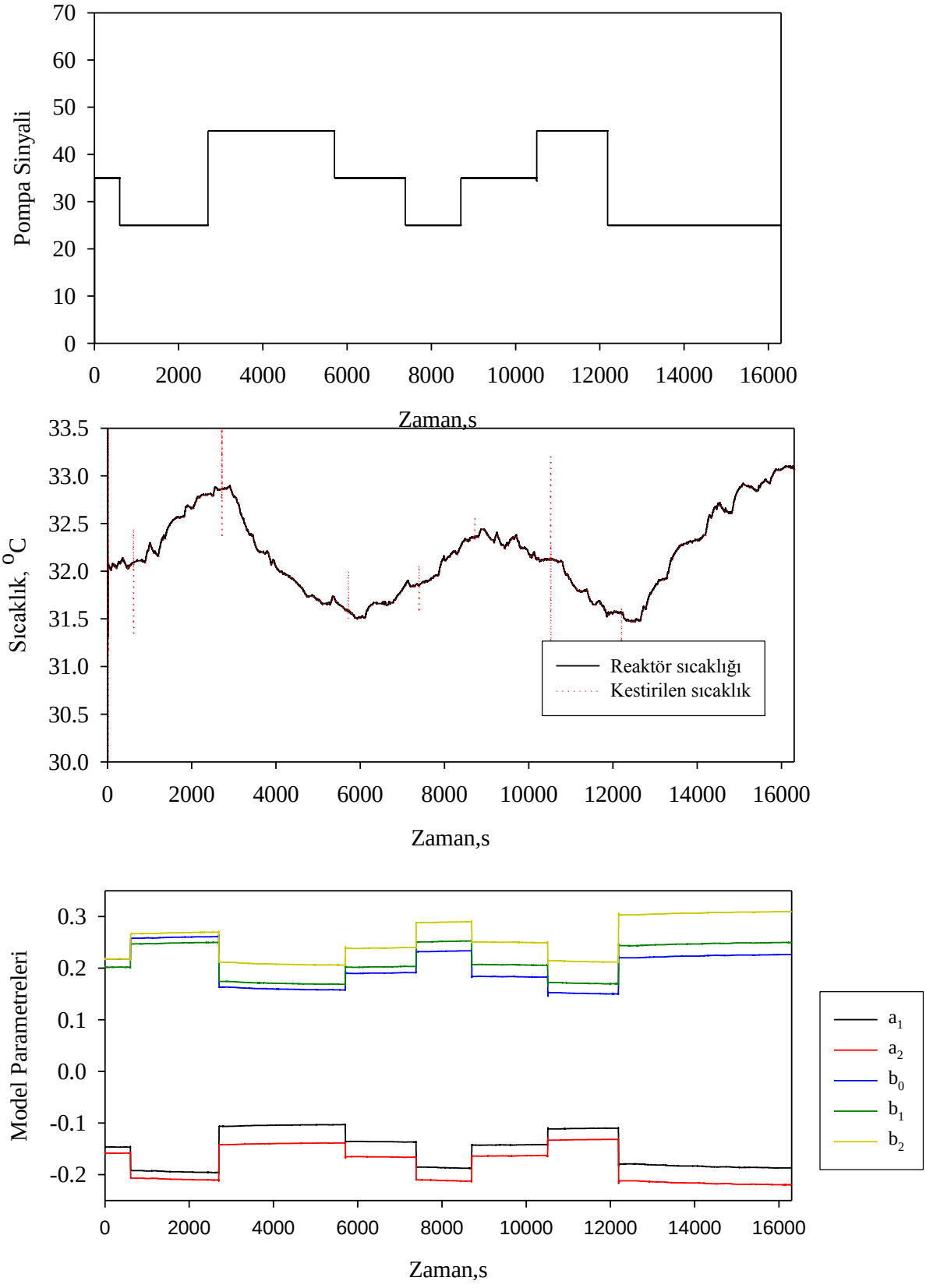
Şekil 9.16 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 35'ten 45'e, 45'ten 35'e değiştirilerek kare dalga etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar

Çizelge 9.5 Sıvı besi ortamında sıcaklığın sistem tanımlama deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı, ^{o}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Hava akış hızı, L/dk
26	600	5	178	1

Şekil 9.15 ve şekil 9.16'den görülebileceği gibi giriş değişkeni soğutma suyu akış hızı, çıkış değişkeni biyoreaktör sıcaklığı olmak üzere sistemin modelinin A ve B polinomlarına göre ikinci dereceden ARMAX tipi bir modele uyduğu görülmüştür. Sistemin çıkış değişkeni olan biyoreaktör sıcaklığı ile ARMAX modelden çıkan kestirilen sıcaklık değerlerinin neredeyse aynı olduğu şekillerden de görülmektedir. Soğutma suyu akış hızına verilen bu etkiler sonucunda, pompa sinyaline 35'ten 25'e etki verilmesi sonucunda sistemin model parametrelerinin a_1= -0.1578, a_2= -0.1458, b_0=0.1865, b_1=0.2195, b_2=0.2401; pompa sinyaline 35'ten 45'e etki verilmesi sonucunda sistemin model parametrelerinin a_1= -0.1568, a_2=-0.1449, b_0=0.1851, b_1=0.2182, b_2=0.2387 olarak bulunmuştur.

İkinci inceleme olarak, sistem çizelge 9.5'deki koşullarda yatışkın hale getirildikten sonra pompa sinyalini 25,35 ve 45 değerlerine farklı genlik ve periyotlarda etki vererek yapılmıştır. Bu farklı etkilere karşılık sistemin modelinin A ve B polinomlarına göre ikinci dereceden ARMAX modele uygun olduğu modelin çıktısı olan kestirilen değerler ile sistemin gerçek çıktısı biyoreaktör sıcaklığının ne kadar yakın olduğu görülmektedir. Giriş sinyali ternary etki olmak üzere yapılan bu deneysel çalışma sonucunda sistemin model parametrelerinin a_1=-0.1833, a_2=-0.2160, b_0=0.2233, b_1=0.24680, b_2=0.3065 olarak bulunmuştur. Yapılan bu çalışmaya ait grafik şekil 9.17'de verilmiştir.



Şekil 9.17 Soğutma suyu pompasına gönderilen sinyalin 25,35,45 değerlerine değiştirilerek ternary etki verilmesi durumunda elde edilen sonuçlar

9.2 Kontrol (Kapalı-Hat) Çalışmaları

Ekmek mayası üretiminde, önemli parametrelerden ikisi olan çözünmüş oksijen derişimi ve biyoreaktör sıcaklığını kontrol ederek hem ürün seçimliliğini gerçekleştirmek hem de ürün verimliliğini arttırmanın amaç olarak seçildiği bu doktora tezi çalışması kapsamında bu bölümde yapılan kontrol çalışmalarına yer verilmiştir. Daha önceki bölümlerde, kontrol edilmek istenen çıkış değişkenleri olan çözünmüş oksijen derişimi ve biyoreaktör sıcaklığı için ayarlanabilen değişken olarak seçilen giriş değişkenleri olan hava akış hızının ve soğutma suyunun nasıl etkilediği, ne kadar etkili olduğu ve birbirleri üzerine olan etkileri incelenmişti. Bu çalışmalar ışığında bu bölümde yer alan kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kontrol çalışmalarında Bölüm 6'da anlatılan PID Kontrol Yöntemi ve Bölüm 7'de anlatılan GPC Kontrol Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler hem SISO kontrol çalışmalarında hem de MIMO kontrol çalışmaları olmak üzere iki farklı durum için sisteme uygulanmıştır.

9.2.1. PID kontrol deneyleri sonuçları

Kontrol çalışmalarına ilk olarak geleneksel kontrol yöntemlerinden biri olan PID kontrol ile başlanmıştır. Hem SISO hem MIMO çalışmalar olmak üzere sistemde PID Kontrol yöntemi uygulanmıştır. On-line kontrol yönteminin kullanıldığı biyoreaktör sisteminde Visual Basic dilinde yazılan program algoritması kullanılmıştır. Hem SISO hem MIMO çalışmalar için yazılan programlar, sıvı besi ortamında kontrol yönteminin uygunluğu test edildikten sonra mikroorganizmalı ortam kontrol çalışmalarında kullanılmıştır.

PID kontrol çalışmalarında PID parametrelerini bulmak için Cohen-Coon parametre ayarlama yöntemi kullanılmıştır. Sistemin giriş değişkenine verilen basamak etki sonucunda sistemin cevabının yer aldı proses reaksiyon eğrisini kullanan bir yöntem

olan Cohen-Coon parametre ayarlama yöntemine ait bilgiler EK 6 ve EK 7'de bulunmaktadır.

PID kontrol yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalara ait deneysel sonuçlar ayrıntılı olarak ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

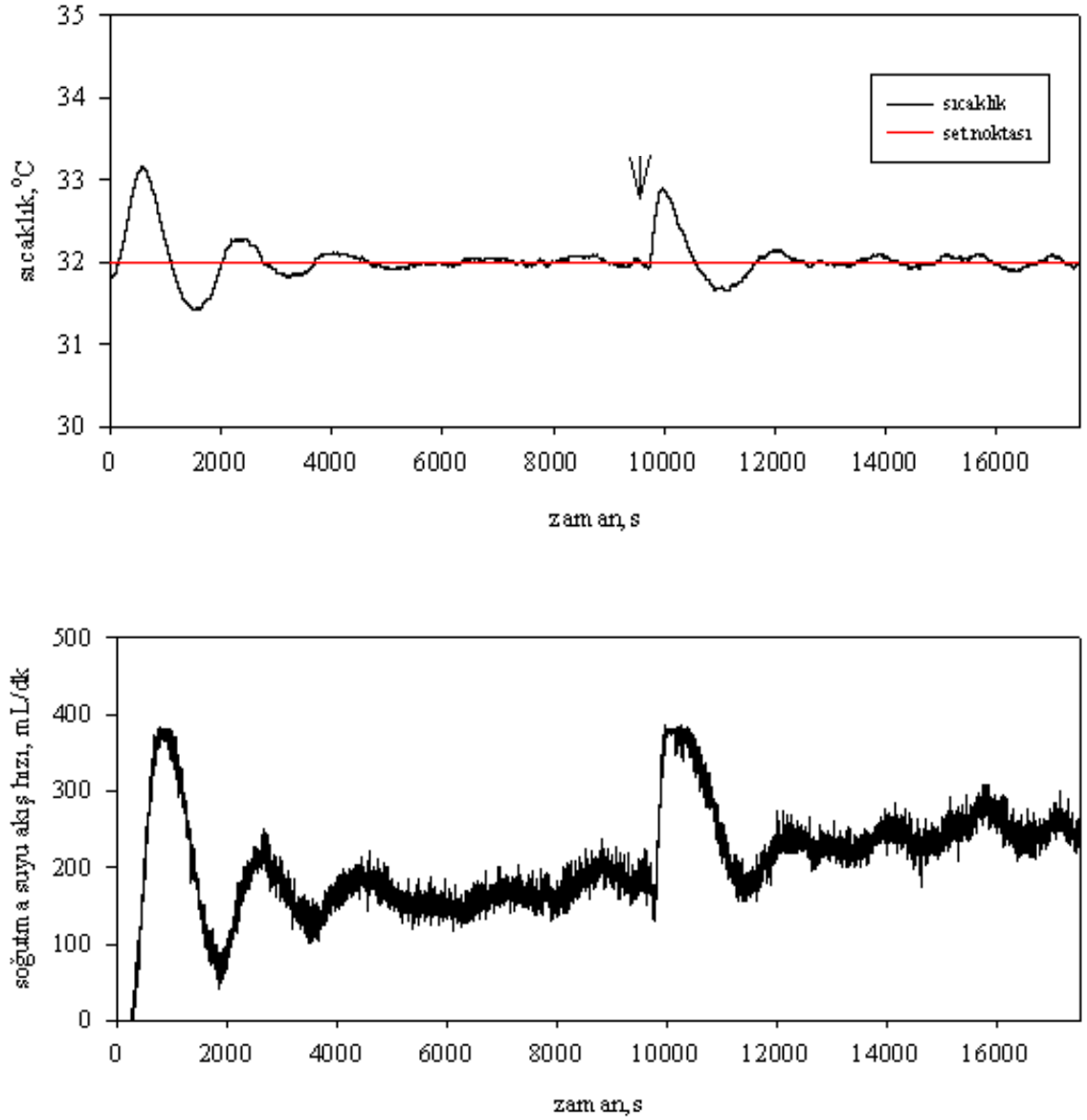
9.2.1.1 Tek girdili - tek çıktılı (SISO) PID kontrol sonuçları

SISO kontrol çalışmaları, sıvı besi ortamında, hem çözünmüş oksijen derişimini kontrol etmek hem de biyoreaktör sıcaklığını kontrol etmek amacıyla farklı etkiler altında gerçekleştirilmiştir.

SISO PID biyoreaktör sıcaklığı kontrolu için sistem, çizelge 9.6'deki işletim koşullarında 32°C'de yatışkın hale getirildikten sonra kapalı hatta alınmıştır. PID kontrol edici biyoreaktör sıcaklığını sabit set noktasında kontrol etmeyi başardığı görülmüştür. Daha sonra sisteme 1°C'lik bir yük etkisi verilmiş ve PID kontrol edicinin yük etkisini ortadan kaldırmak amacıyla soğutma suyu akış hızını arttırarak sistemi tekrar 32°C'de kontrol ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile ilgili grafikler şekil 9.18'de verilmiştir.

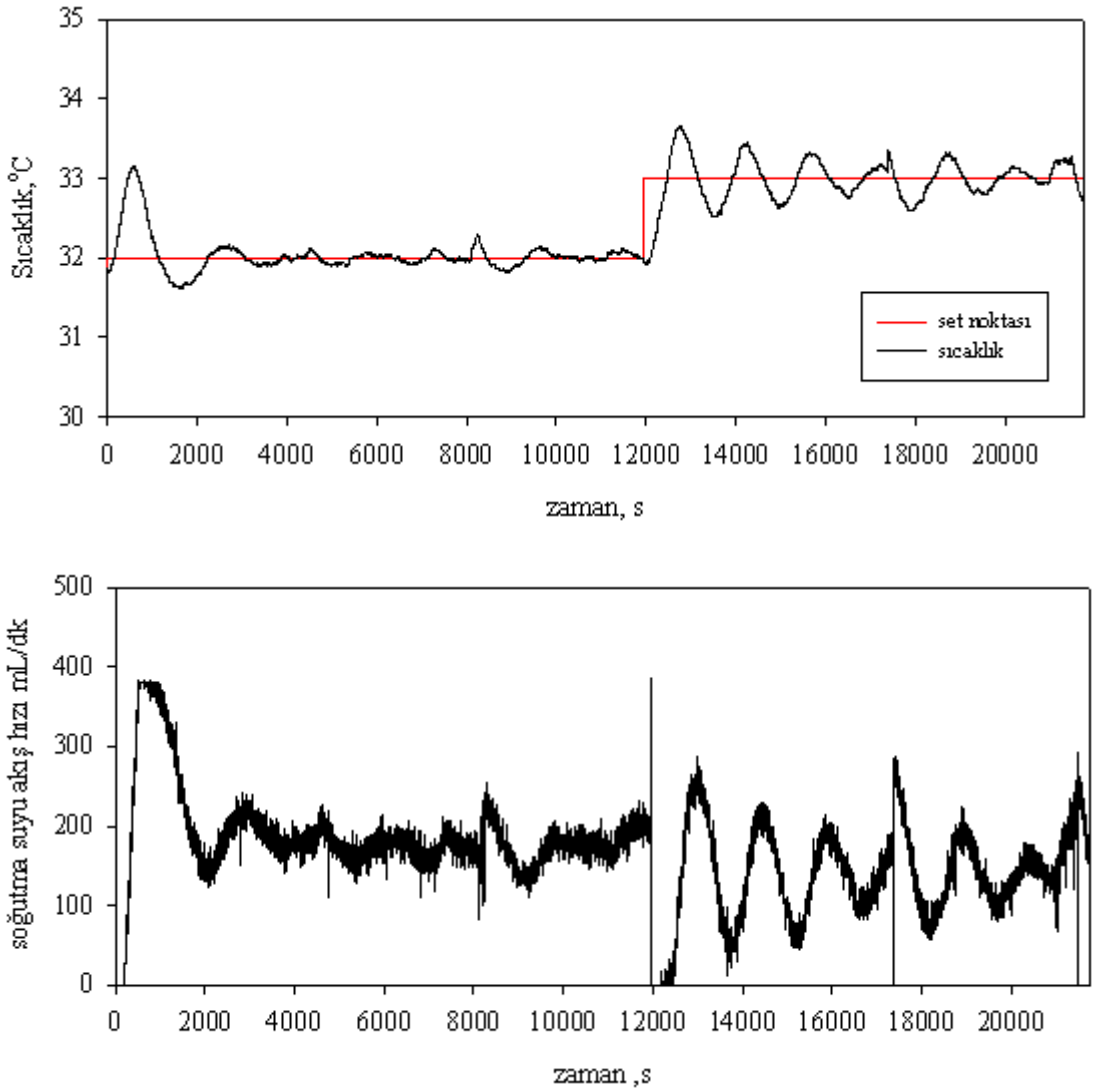
Çizelge 9.6 Sıvı besi ortamında sıcaklığın SISO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı,^{O}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Hava akış hızı,L/dk
26	600	5	178	1



Şekil 9.18 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen sıcaklığın sabit set noktasında kontrol edildiği SISO PID kontrol sonuçları

Benzer çalışma set noktasına $1^{o}C$ basamak etki verilerek gerçekleştirilmiştir. Sistem çizelge 9.6'de yer alan koşullarda yatışkın hale getirilmiş ve kapalı hatta alınmıştır. Kontrol edicinin sistemi $32\ ^{o}C$ 'de kontrolu iyi şekilde sağladığı ancak $33\ ^{o}C$ 'de salımlı olarak sağladığı görülmüştür. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar şekil 9.19'de verilmiştir.

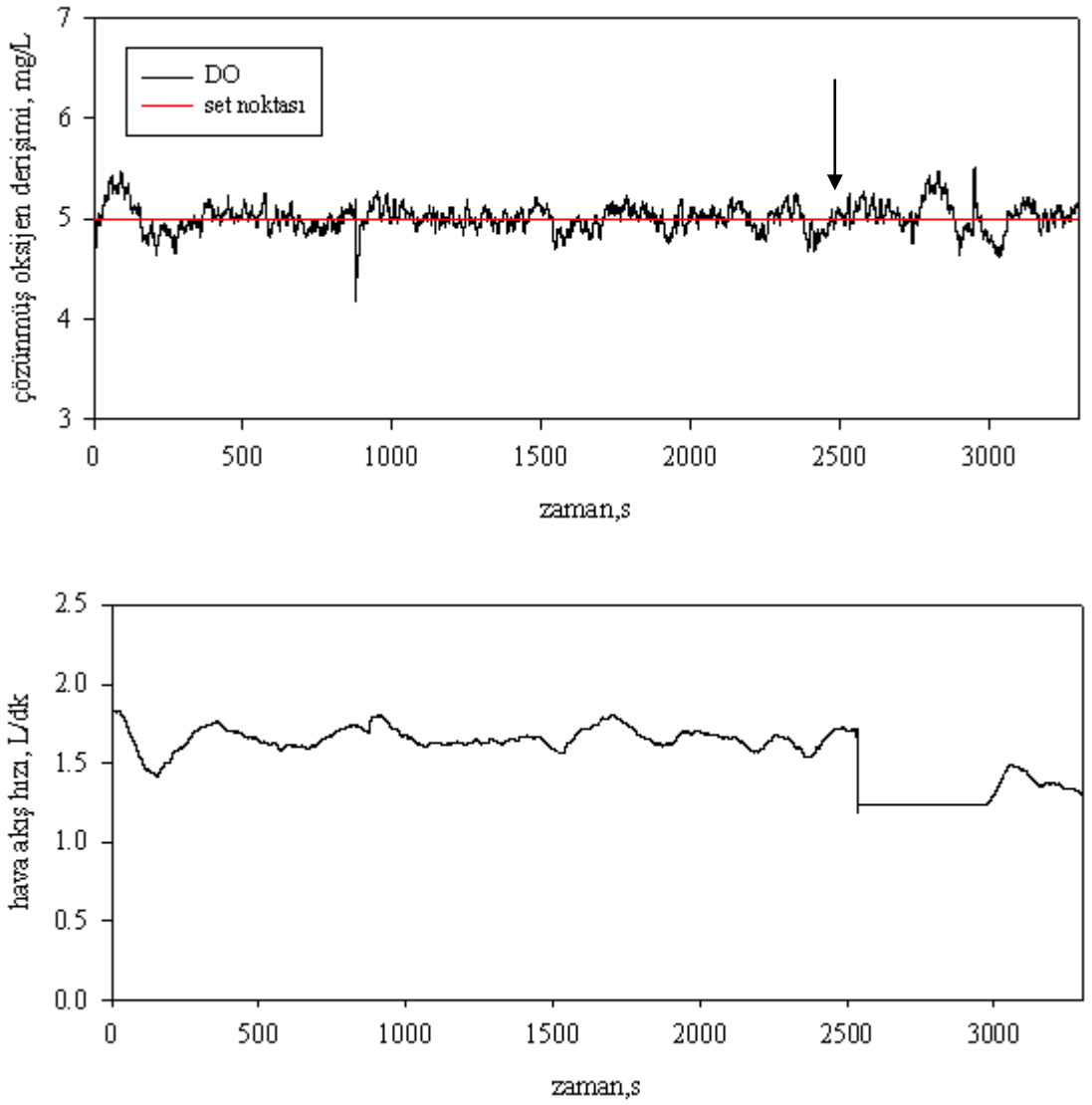


Şekil 9.19 Sıvı besi ortamında set noktasına basamak etki verildiğinde sıcaklığın SISO PID kontrol sonuçları

Biyoreaktör sıcaklığının SISO PID kontrol çalışmaları tamamlandıktan sonra çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda sistem, çizelge 9.7'de verilen işletim koşullarında yatışkın hale getirilmiş daha sonra sistem kapalı hatta alınıp SISO PID kontrol gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sistemin sabit set noktasında 5 mg/L'de kontrolu sağlanmış daha sonra azot akış hızını azaltarak sisteme yük etkisi verilmiştir. PID kontrol edicinin bu yük etkisini ortadan kaldırmak amacıyla hava akış hızını azaltarak sistemi istenilen sabit set noktası olan 5 mg/L'de iyi bir şekilde tuttuğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile ilgili şekil 9.20'de verilmektedir.

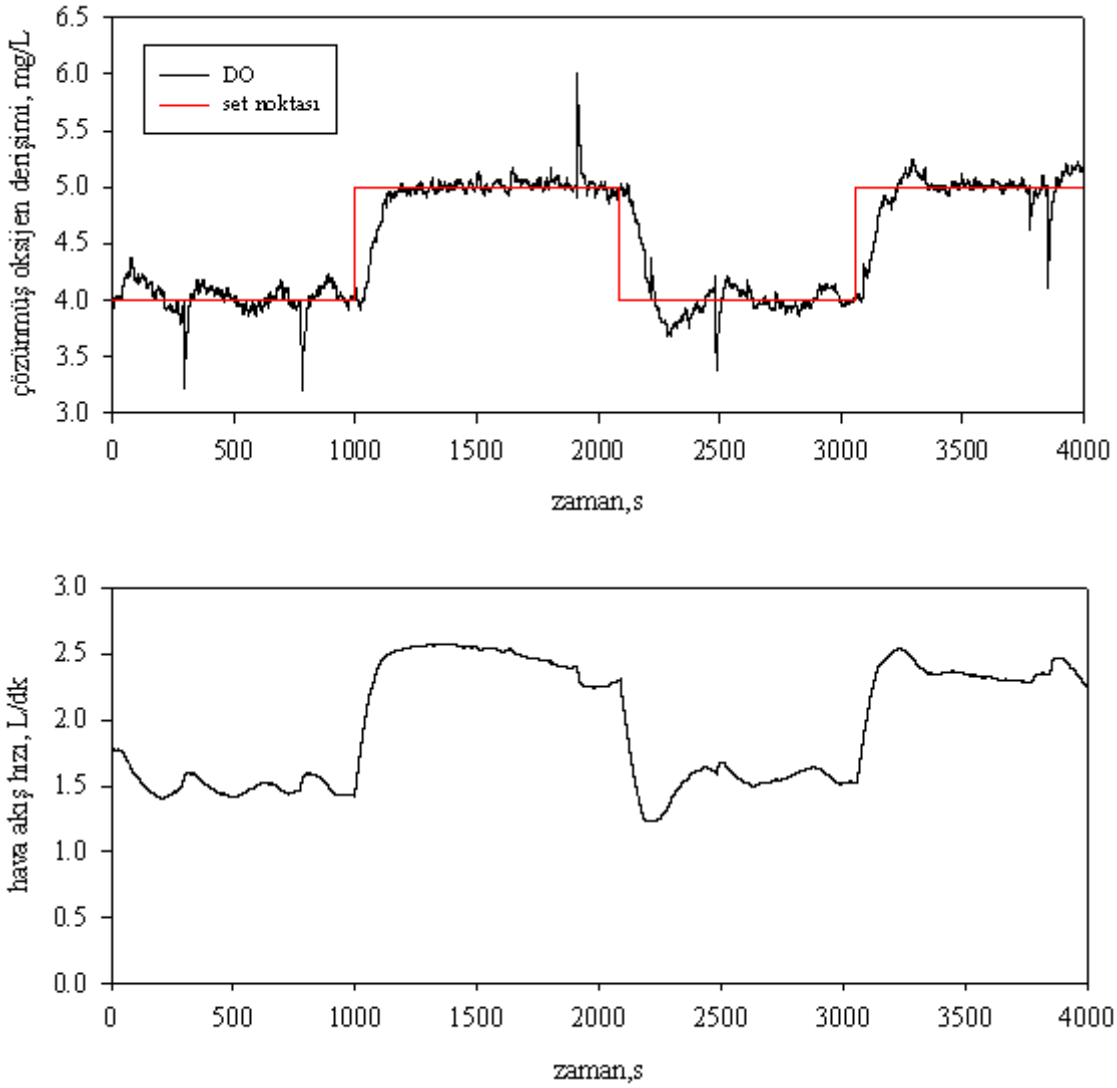
Çizelge 9.7 Sıvı besi ortamında çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı,^{O}C	Karıştırma hızı,devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Soğutma suyu akış hızı,mL/dk	N_2 akış hızı,L/dk
26	600	5	178	62	1.2



Şekil 9.20 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen çözünmüş oksijen derişiminin sabit set noktasında kontrol edildiği SISO PID kontrol sonuçları

Çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol çalışmalarının ikincisinde set noktasına kare dalga etki verilmiştir. Sistem, çizelge 9.7'de yer alan koşullarda yatışkın hale getirilmiş ve kapalı hatta alınmıştır. Kontrol edicinin, sistemi set noktası değişimlerinde iyi şekilde kontrol sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar şekil 9.21'de verilmiştir.



Şekil 9.21 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen set noktasına kare dalga etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol sonuçları

9.2.1.2 Çok girdili - çok çıktılı (MIMO) PID kontrol sonuçları

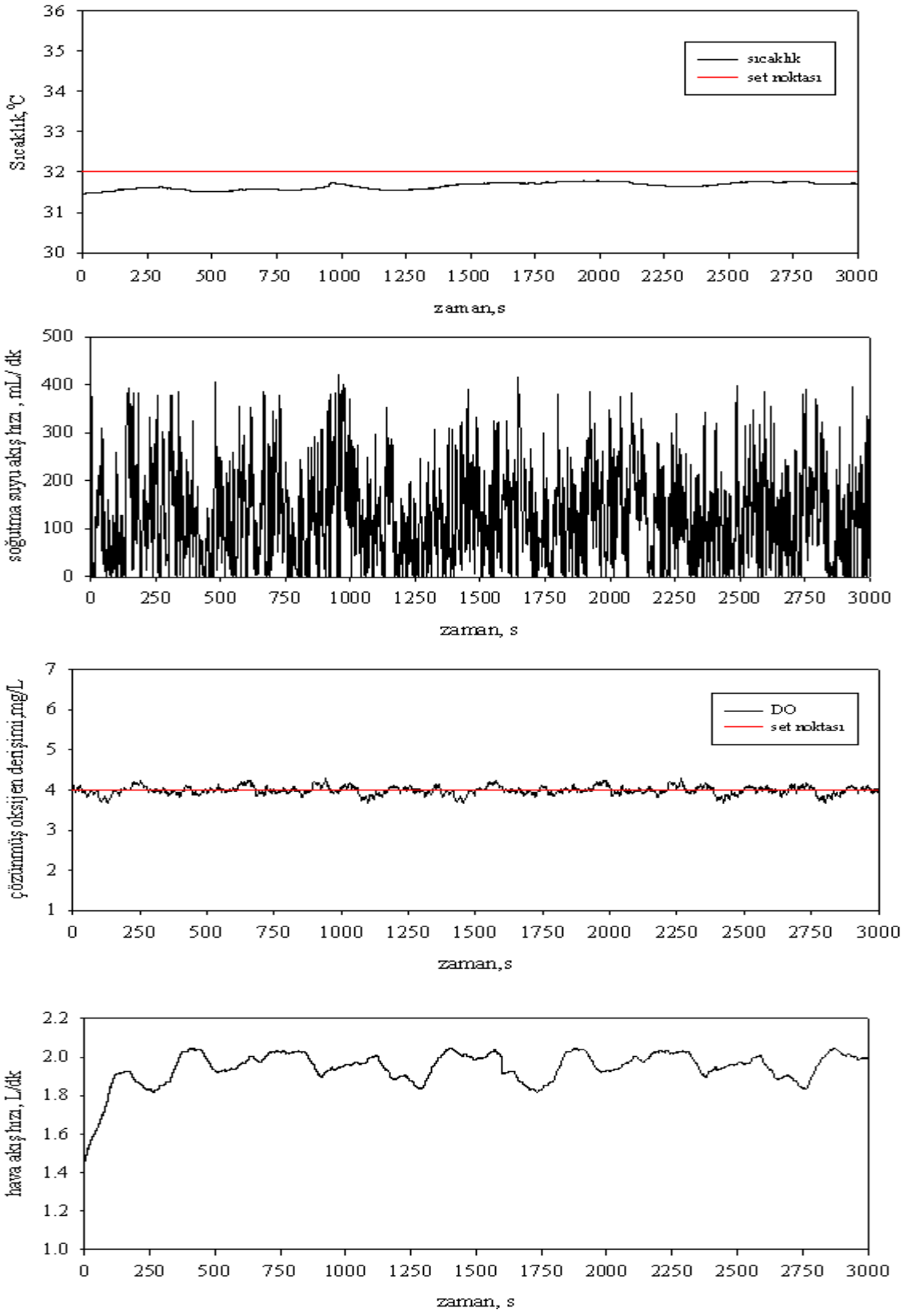
Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde çoğalma sırasında artan sıcaklığın kontrolunu ve azalan çözünmüş oksijen derişiminin kontrolu amacıyla yapılan SISO PID kontrol çalışmalarından sonra hem sıcaklığın hem de çözünmüş oksijen derişiminin eşanlı olarak kontrol edildiği MIMO PID kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. MIMO PID kontrol çalışmaları sıvı besi ortamında ve mikroorganizmalı ortamda olmak üzere iki farklı durumda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 9.8 Sıvı besi ortamında MIMO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları

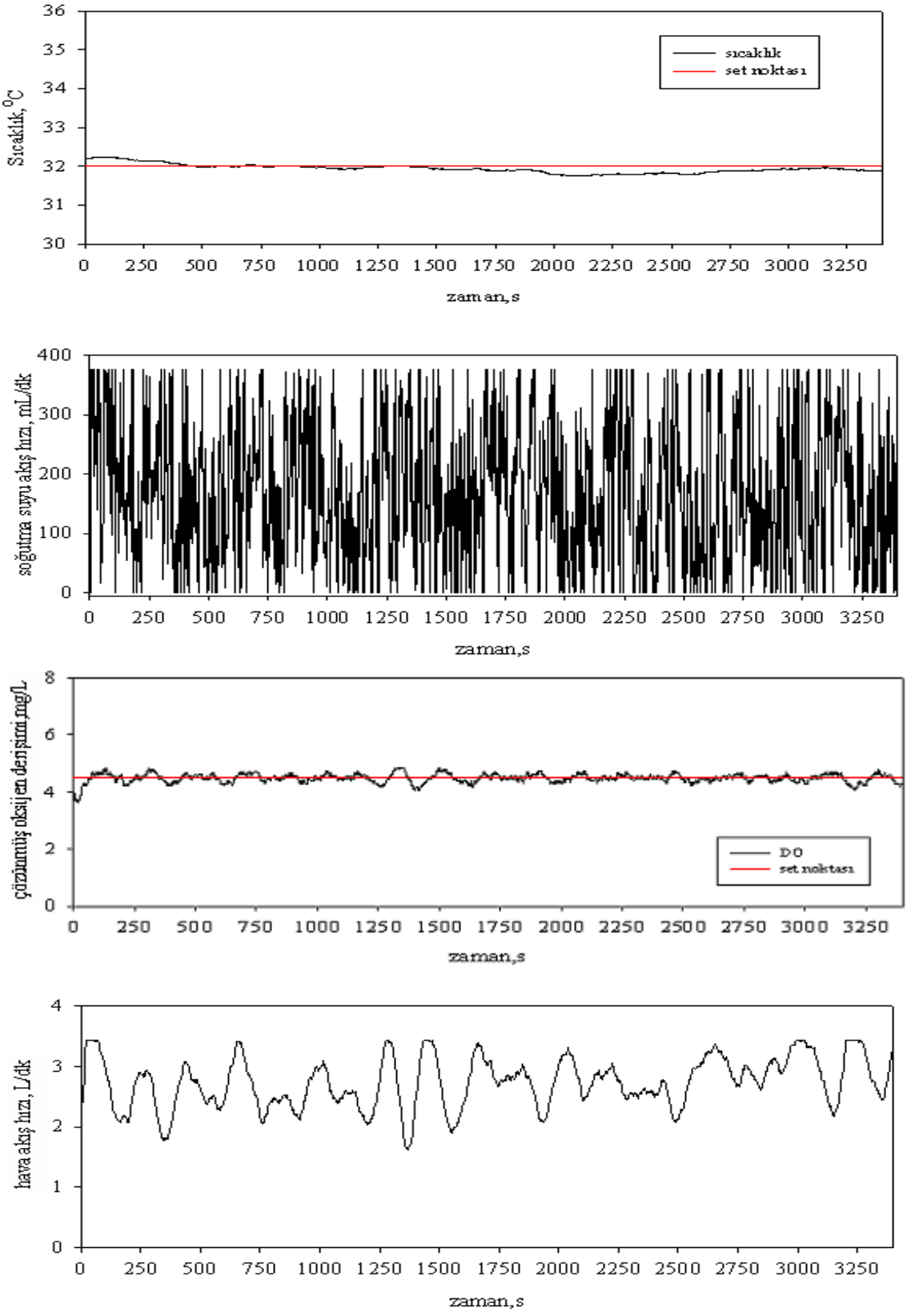
Soğutma suyu sıcaklığı,^{o}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	N_2 akış hızı,L/dk
26	600	5	178	1.2

MIMO PID kontrol çalışmalarının ilk bölümünde sistem çizelge 9.8'de yer alan işletim koşullarında sistem yatışkın hale getirilmiş ve kapalı hatta alınarak PID kontrol ile sistem sabit set noktalarında kontrol edilmiştir. Hem sıcaklığın hem çözünmüş oksijen derişiminin eşanlı kontrolunun gerçekleştirildiği MIMO kontrol sırasında PID kontrol edicinin, çözünmüş oksijen derişimini istenilen set noktasında başarılı bir şekilde kontrol ettiği ancak sıcaklığı yaklaşık 0.5^{o}C ofset vererek kontrol edebildiği görülmüştür. Yapılan bu deneyin sonuçları şekil 9.22'de verilmiştir.

Yapılan MIMO PID kontrol çalışmasından sonra etkileşim önleyicinin gerekli olduğu görülmüştür. Bölüm 9.1'de ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktör sisteminin bağıl kazanç analizi (RGA) yapılarak sistemin etkileşim önleyici (decoupler) katsayıları bulunmuştur. Yapılan çalışmalar sonunda D_1 etkileşim önleyici katsayısının 0.2, D_2 etkileşim önleyici katsayısının ise 6.3 olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Bölüm 4.2'de anlatıldığı gibi sistem, etkileşim önleyici katsayıları kullanılarak MIMO PID kontrol gerçekleştirilmiştir. Etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları şekil 9.23'te verilmiştir.



Şekil 9.22 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları



Şekil 9.23 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları

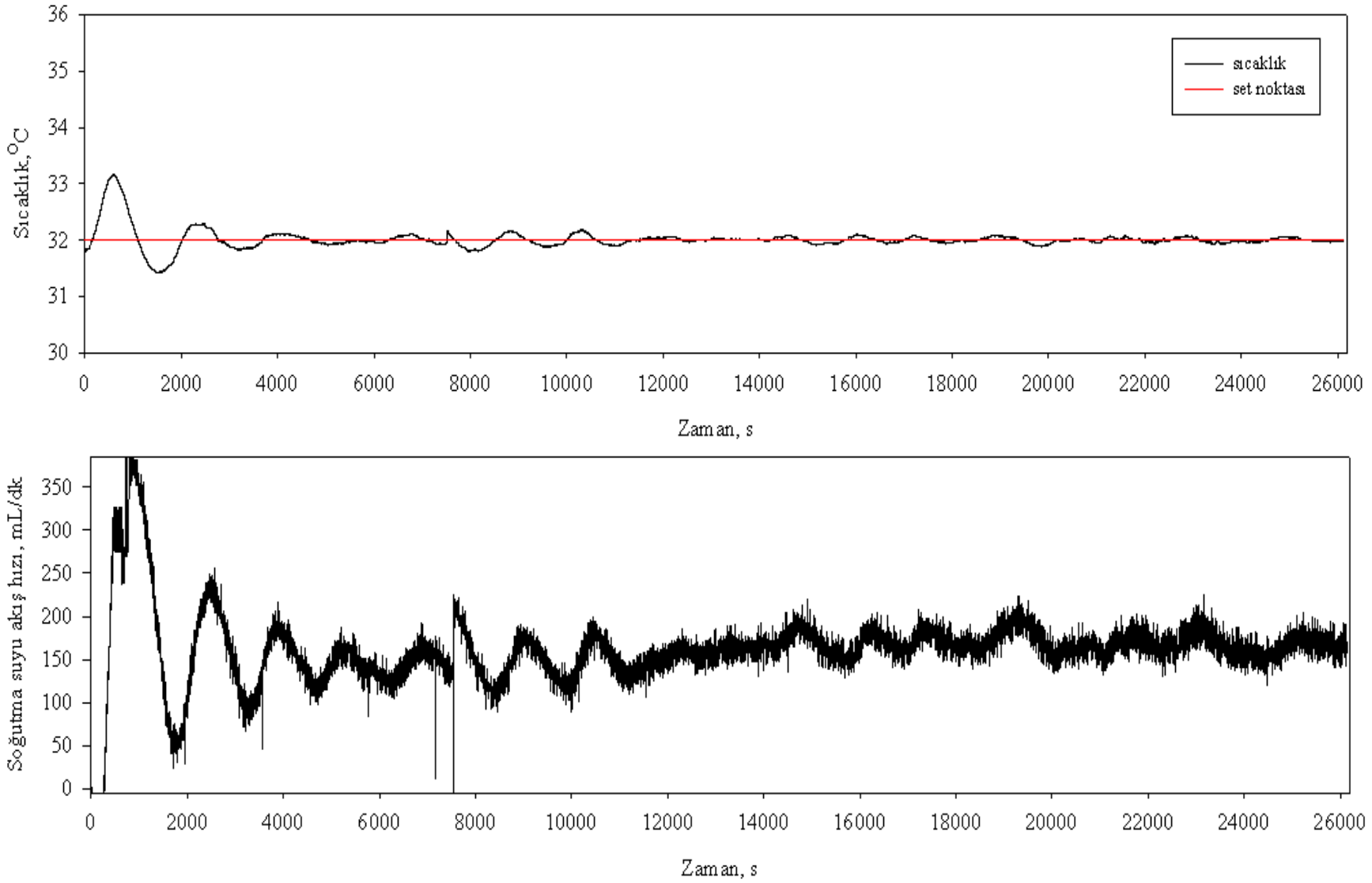
Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen ön çalışmalardan sonra ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği kesikli biyoreaktörde MIMO PID kontrol çalışmaları yapılmıştır. Mikroorganizmalı ortamda gerçekleştirilen MIMO PID kontrol çalışmaları etkileşim önleyicisiz ve etkileşim önleyicili olmak üzere iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 9.9 Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği mikroorganizmalı ortamda MIMO PID kontrol deneylerinin işletim koşulları

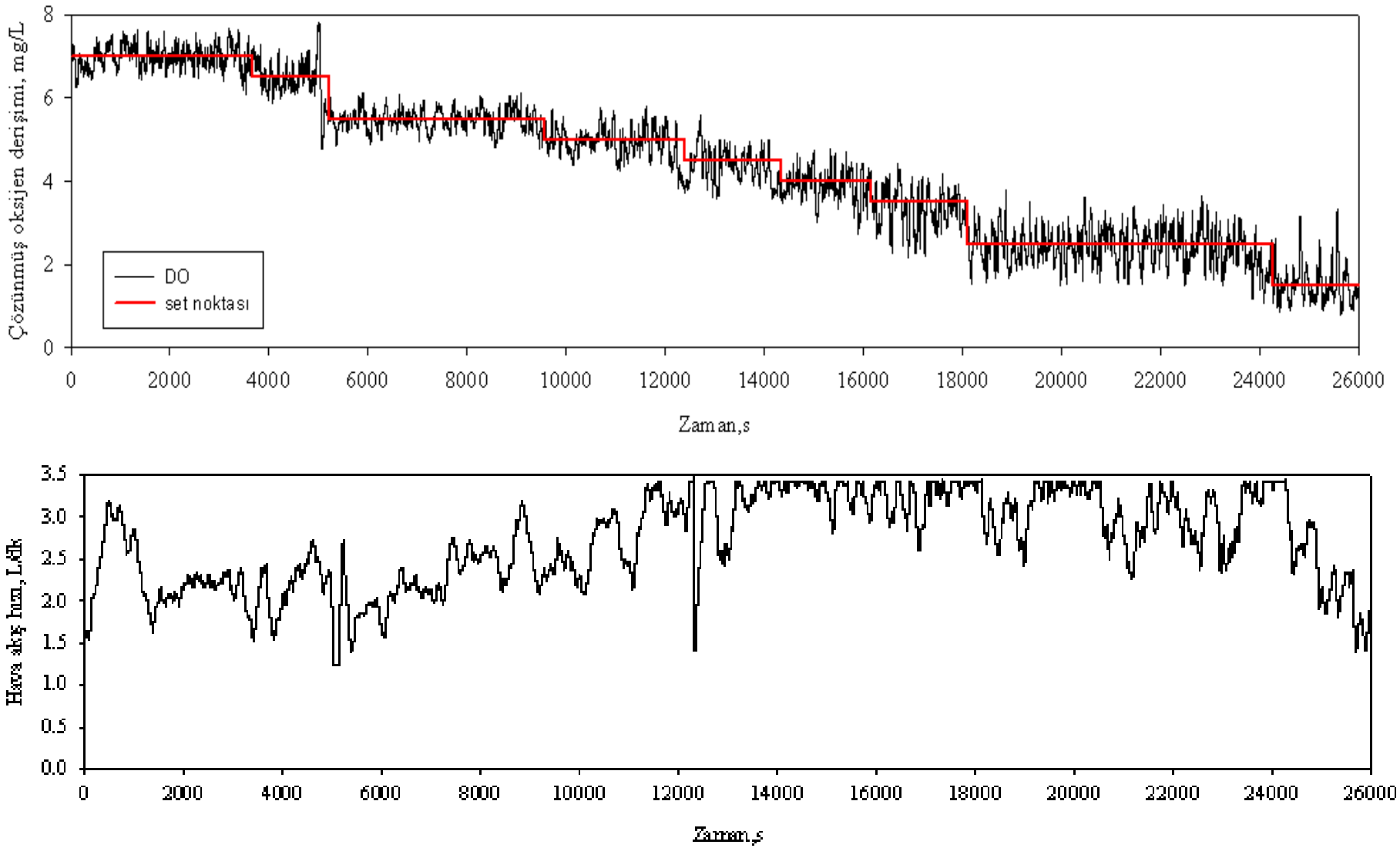
Soğutma suyu sıcaklığı, ^{o}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Optimum çoğalma sıcaklığı, ^{o}C
26	600	5	178	32

Ekmek mayası üretilen biyoreaktörde mikroorganizmalı ortamda MIMO PID kontrol deneylerinde sistem, çizelge 9.9'de verilen işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra besi ortamına *S. cerevisiae* mikroorganizması aktarılmış ve çözünmüş oksijen derişiminin ve biyotepkime ortamı sıcaklığının eşanlı olarak kontrolu gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında sıcaklık 32°C'de, çözünmüş oksijen derişimi ise set noktası basamak halinde indirilerek en son kritik değerin üzeri olan 1mg/L'de sabit tutulmuştur. Deney süresince pH, karıştırma hızı, sisteme verilen ısı sabit tutulmuş ve mikroorganizma derişiminin değişimi ölçülmüştür.

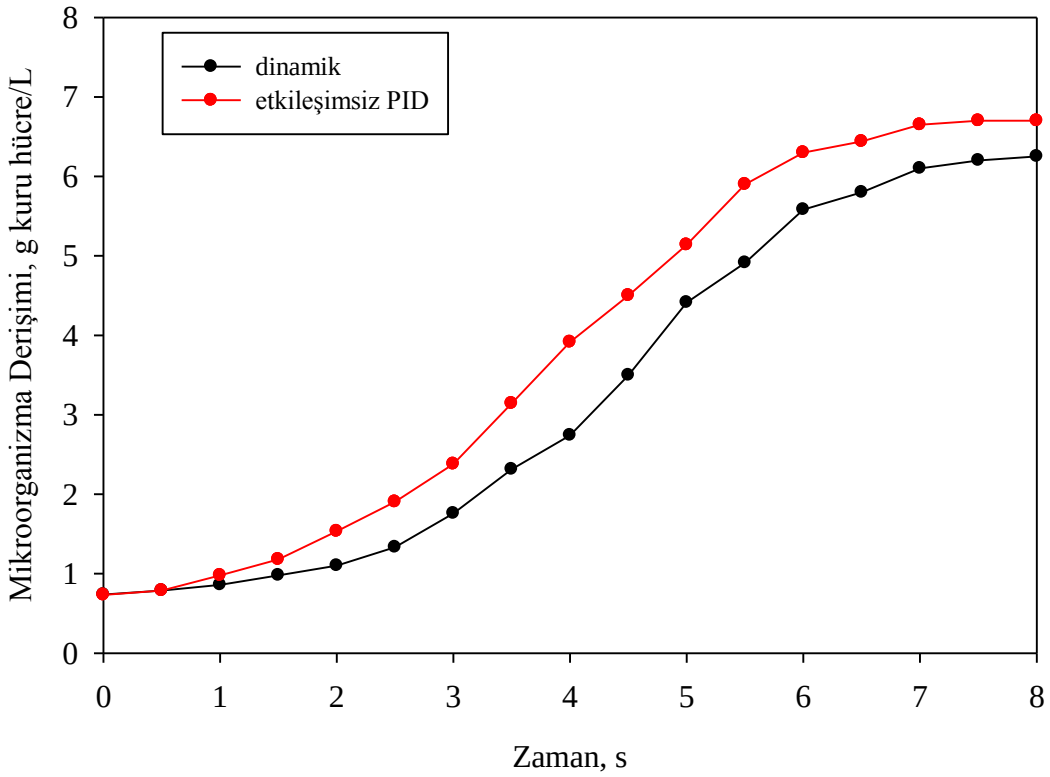
Şekil 9.24'den görüleceği gibi etkileşim önleyici kullanmadan gerçekleştirilen mikroorganizmalı deney sırasında, sistem sıcaklık için klasik PID kontrol hareketi yaparak salınımlı olarak set noktasına oturmuştur. Bu sırada sıcaklık yaklaşık 1°C'ye yakın bir artış göstermiştir. Aynı deneyde biyotepkime süresince çözünmüş oksijen derişiminin basamak şeklinde indirilen set noktasını salınımlı olarak takip ederek kontrolun gerçekleştirildiği şekil 9.25'de görülmektedir. Deney süresince elde zamanla değişen mikroorganizma derişimi UV spektrofotometre ile ölçülmüş ve EK 5'teki bilgiler ile toplam kuru hücre derişimi hesaplanmıştır.



Şekil 9.24 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları:Biyotepkime süresince biyoreaktör sıcaklığının ve soğutma suyu akış hızının zamanla değişimi



Şekil 9.25 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince çözünmüş oksijen derişiminin ve hava akış hızının zamanla değişimi



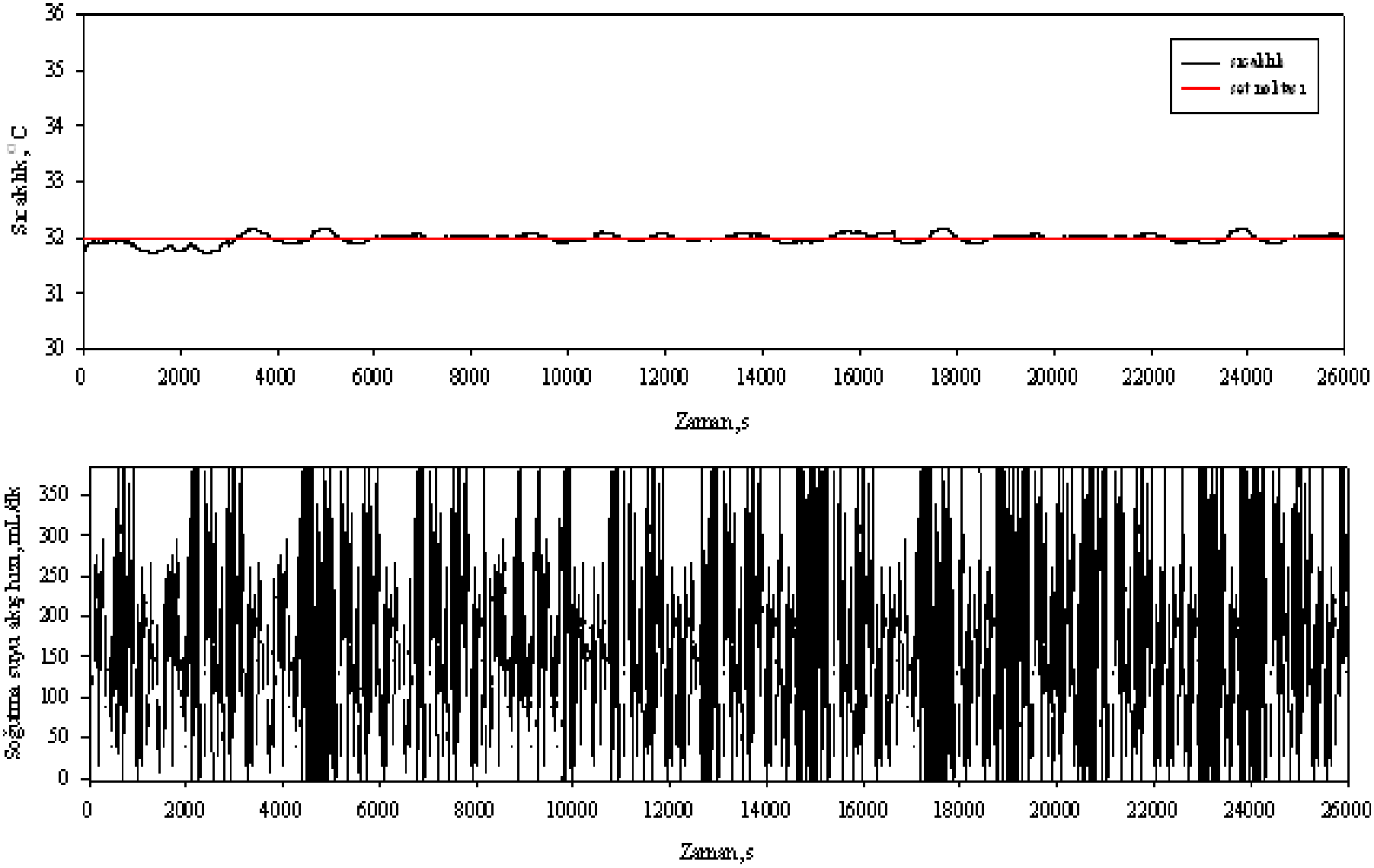
Şekil 9.26 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları: Biyotepkime süresince mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi ve dinamik deney[4] ile karşılaştırması

Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde mikroorganizmalı ortamda gerçekleştirilen MIMO PID kontrol deneylerinin ikinci aşamasında; RGA yöntemi ile bulunan ve sıvı besi ortamında gerçekleştirilen MIMO PID kontrol deneylerinde performansı incelenen etkileşim önleyici katsayıları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

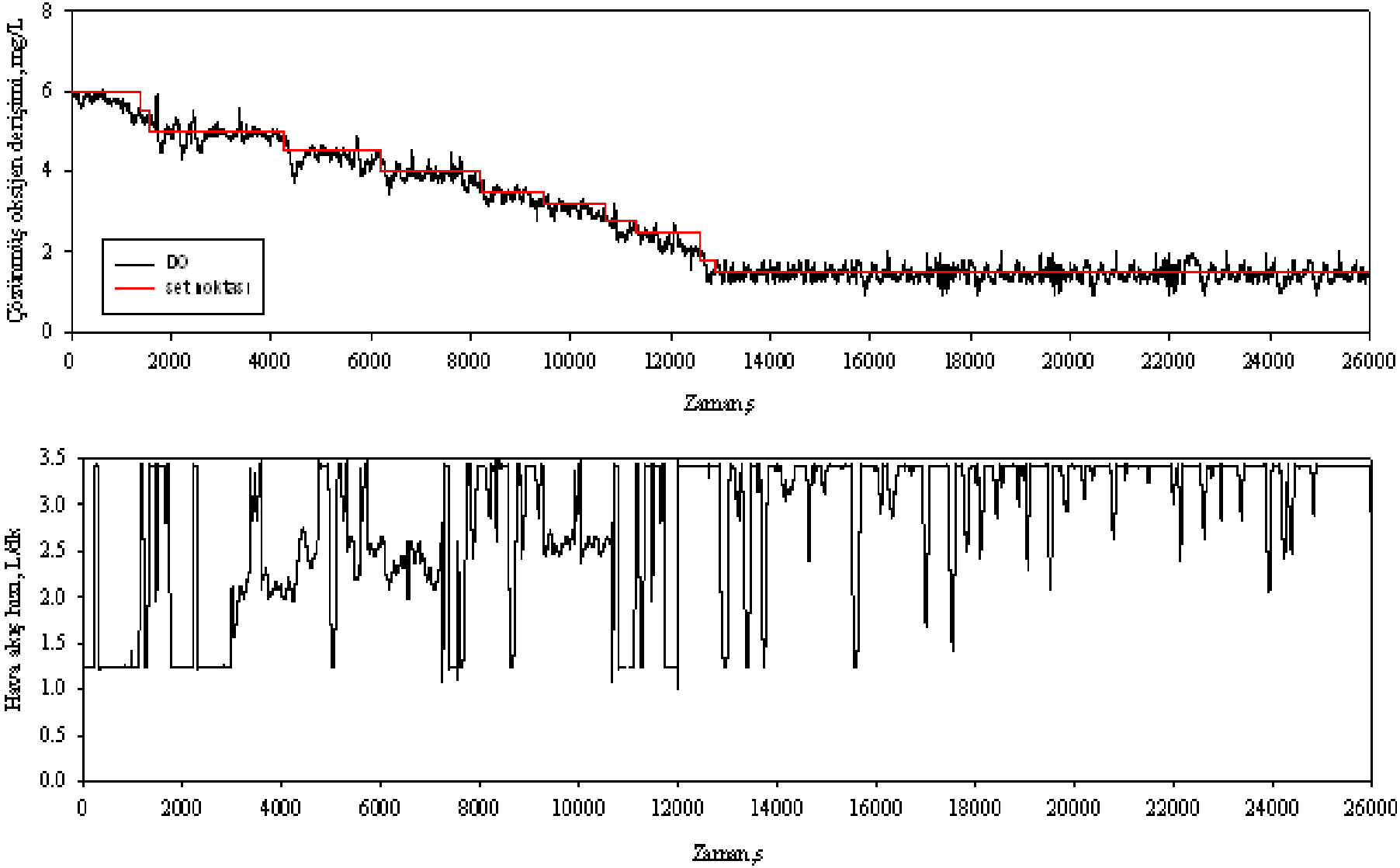
Sistem çizelge 9.9'da verilen işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra besi ortamına *S. cerevisiae* mikroorganizması aktarılmış ve çözünmüş oksijen derişiminin ve biyotepkime ortamı sıcaklığının eşanlı olarak kontrolu gerçekleştirilmiştir. Deney süresince pH, karıştırma hızı ve sisteme verilen ısı sabit tutulmuştur. Biyotepkime

[4]Biyoreaktör sıcaklığı ve çözünmüş oksijen derişiminin kontrol edilmediği koşullarda elde edilen mikroorganizma derişimi

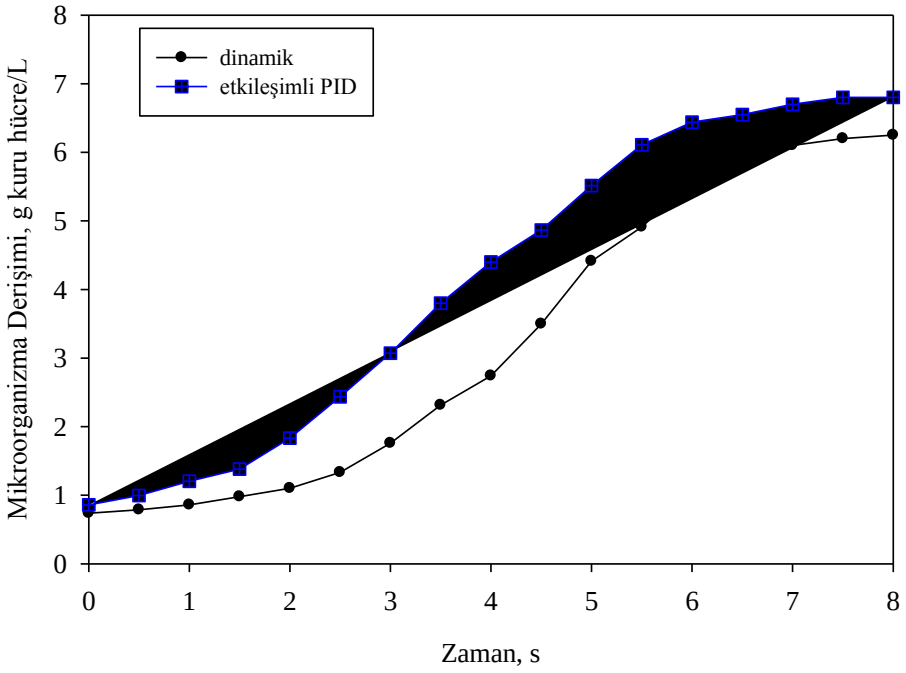
ortamı sıcaklığı, ekmek mayası için optimum çoğalma sıcaklığı olan 32 ^{o}C'de sabit set noktası seçilerek kontrolu gerçekleştirilirken, çözünmüş oksijen derişimi ise basamak halinde indirilerek en az 1 mg/L değerinde farklı set noktalarında kontrol edilmiştir. Şekil 9.27'den de görülebileceği gibi PID kontrol ediciler sistemi istenilen set noktalarında başarı ile tutabilmiştir. Biyotepkime süresince biyoreaktör sıcaklığının, etkileşim önleyici kullanılmadığı durumda gerçekleştirilen MIMO PID kontrol deneylerinde görülen geleneksel PID kontrol salınımlarının olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 9.24-Şekil 9.27). Çözünmüş oksijen derişiminin de biyotepkime süresince etkileşim önleyici kullanılmadığı duruma göre daha az salınımla set noktasını takip ettiği görülmektedir (Şekil 9.25-Şekil 9.28). Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği kontrolsüz durum ile üretilen mikroorganizma derişimi etkileşimli ve etkileşimsiz MIMO PID kontrolü sonucunda elde edilen karşılaştırıldığında (Şekil 9.26-Şekil 9.29) kontrolün gerekliliği açıkça görülmektedir. Etkileşim önleyici kullanıldığı durum ile kullanılmadığı durumda yapılan deneylerde biyotepkime süresince zamanla değişen mikroorganizma derişiminin değişiminde çok fazla bir değişim olmadığı şekil 9.30'de görülmektedir.



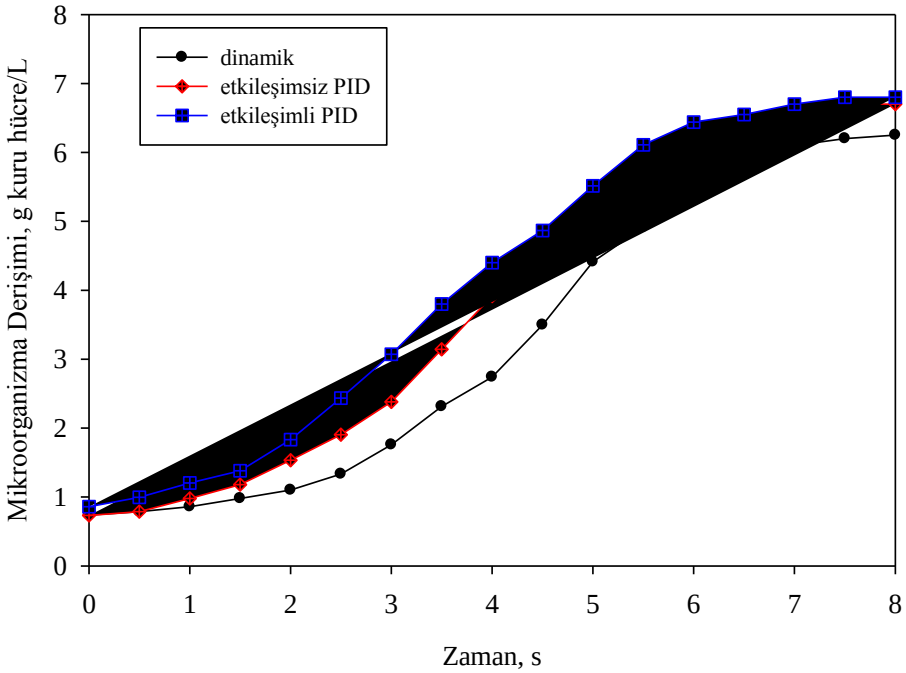
Şekil 9.27 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları a) Biyotepkime süresince biyoreaktör sıcaklığının ve soğutma suyu akış hızının zamanla değişimi



Şekil 9.28 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicili MIMO PID kontrol sonuçları:Biyotepkime süresince çözünmüş oksijen ve hava akış hızının zamanla değişimi



Şekil 9.29 Mikroorganizmalı ortamında gerçekleştirilen etkileşim önleyicisiz MIMO PID kontrol sonuçları:Biyotepkime süresince mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi ve dinamik deney[5] ile karşılaştırması



Şekil 9.30 MIMO PID kontrol deneylerinde biyotepkime süresince mikroorganizma (ekmek mayası) derişiminin zamanla değişiminin karşılaştırılması

[5]Biyoreaktör sıcaklığı ve çözünmüş oksijen derişiminin kontrol edilmediği koşullarda elde edilen mikroorganizma derişimi

9.2.2 GPC Kontrol Sonuçları

Doktora tezinin bu bölümünde, ekmek mayası üretilen kesikli bir biyoreaktörde ürün seçimliliği nedeniyle ve ürün verimliliğini arttırmak amacıyla biyotepkime süresince azalan çözünmüş oksijen derişimini ve artan sıcaklığı kontrol etmek amacıyla gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan GPC kontrol algoritması kullanılmıştır. GPC kontrol çalışmaları, teorik ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

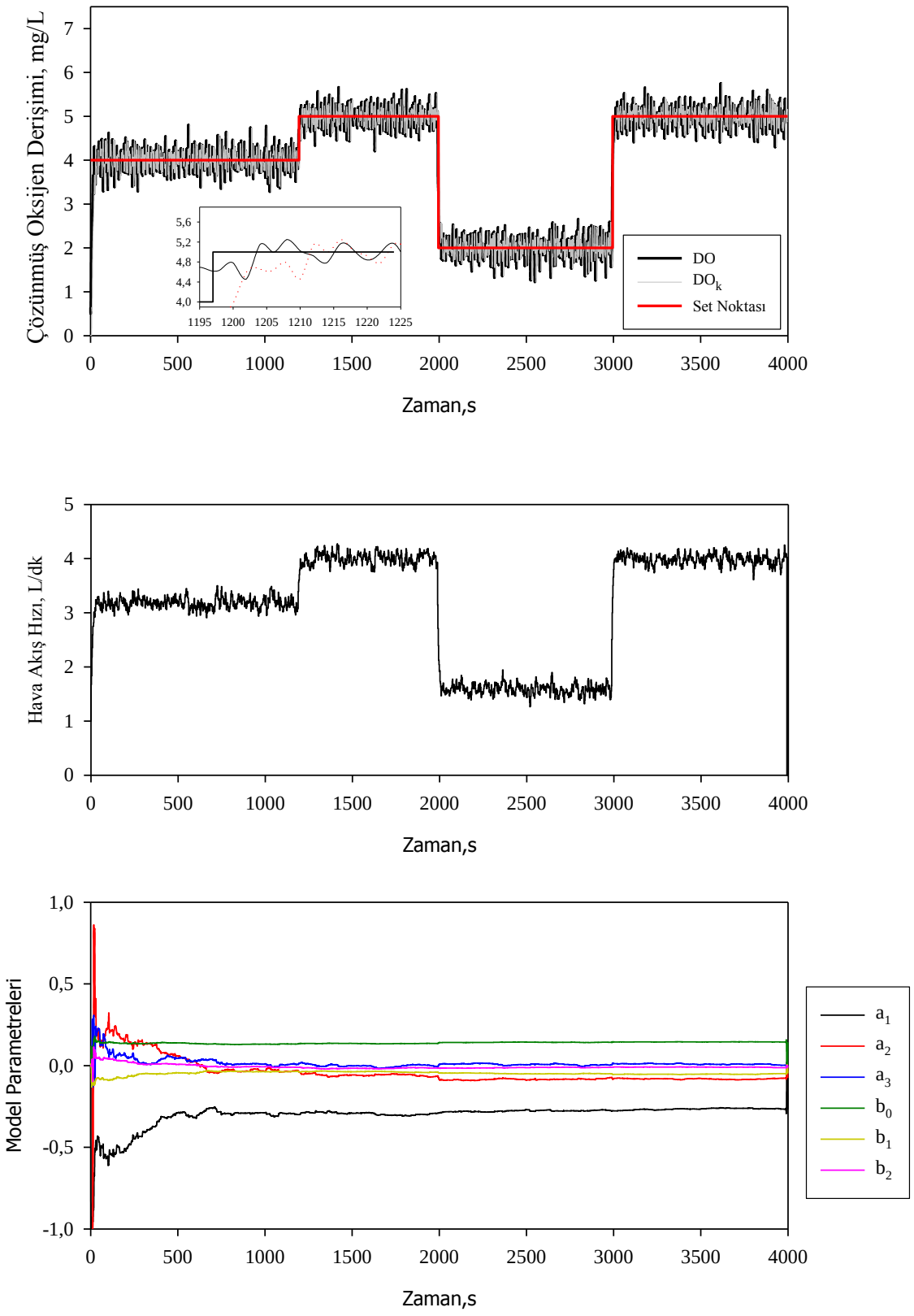
9.2.2.1 Teorik GPC kontrol sonuçları

Deneysel çalışmalarda kullanılacak GPC kontrol parametrelerini elde etmek amacıyla yapılan teorik GPC kontrol çalışmaları, çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu ve biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

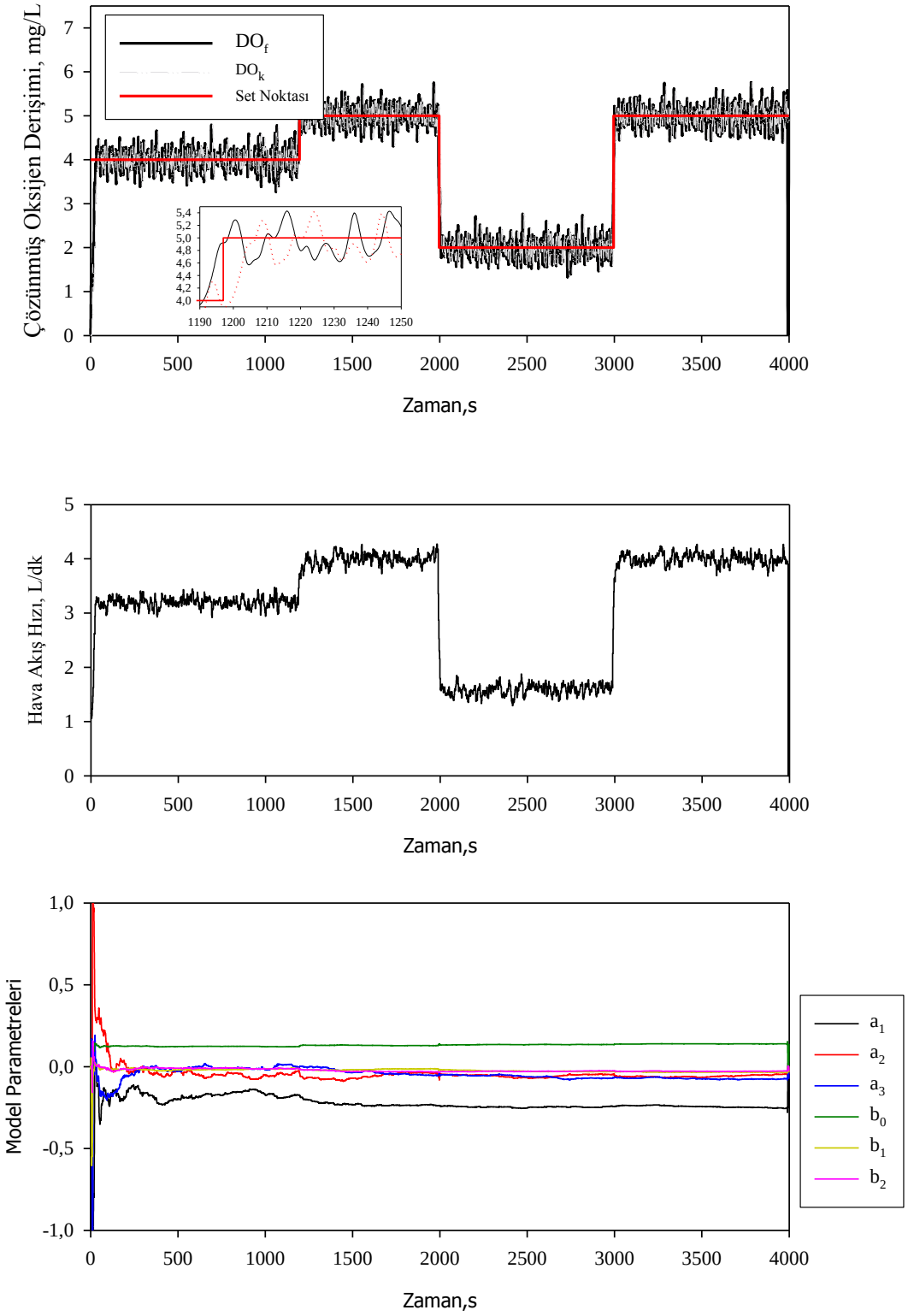
9.2.2.1. Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrol sonuçları

Bölüm 9.1.3.1'de çözünmüş oksijen derişiminin sistem tanımlama çalışmalarında elde edilen model parametreleri kullanılarak ekmek mayası üretilen kesikli bir biyoreaktörün teorik kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla MATLAB®'ta yazılan model parametreleri her bir örnekleme adımında yenilenen bir program kullanılmıştır.

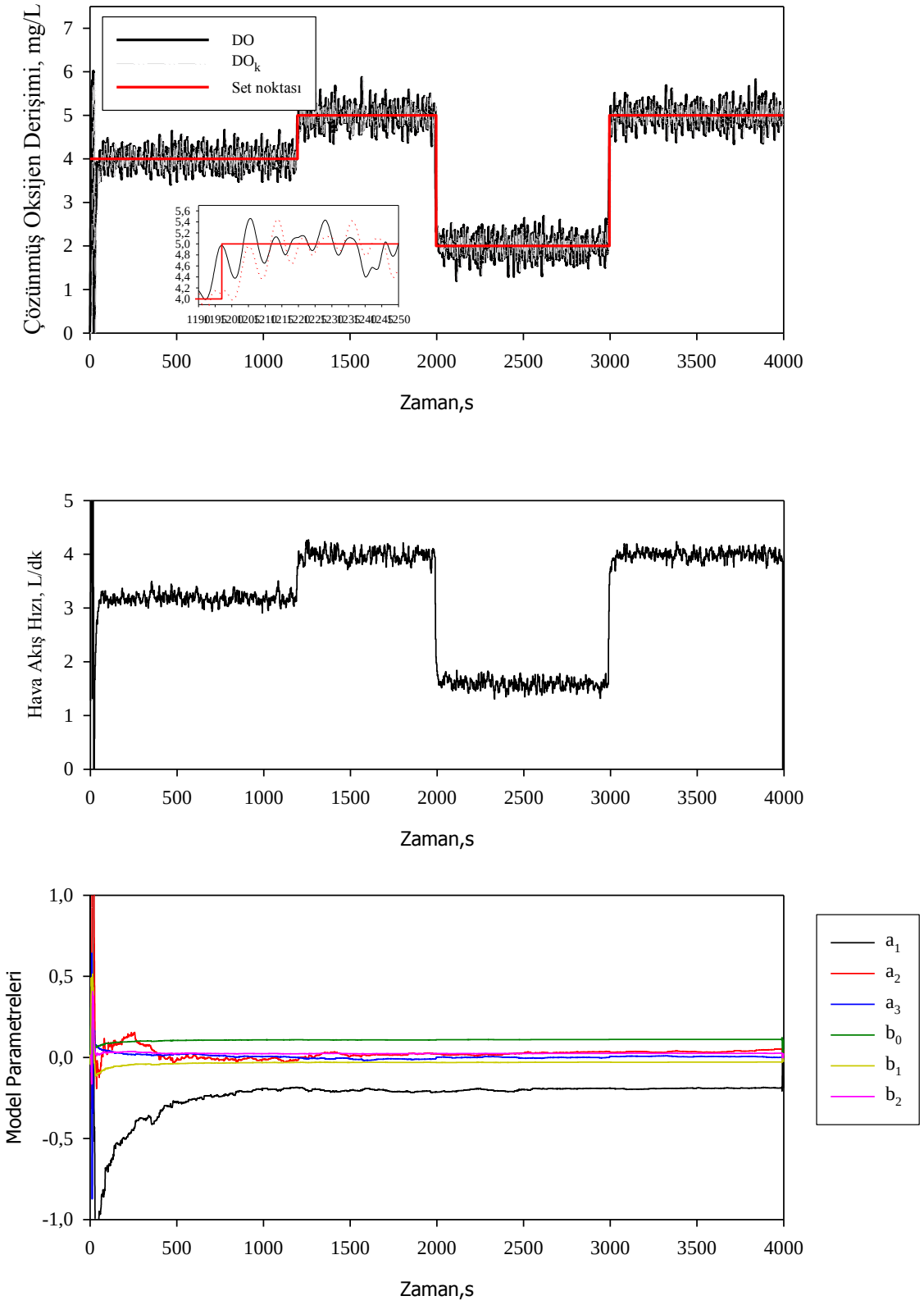
Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu için Bölüm 7'de ayrıntılı olarak anlatılan algoritma kullanılmıştır. En iyi kontrol performansını elde etmek amacıyla, farklı GPC kontrol tasarım parametrelerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalara ait grafikler Şekil 9.31-41'de verilmiştir.



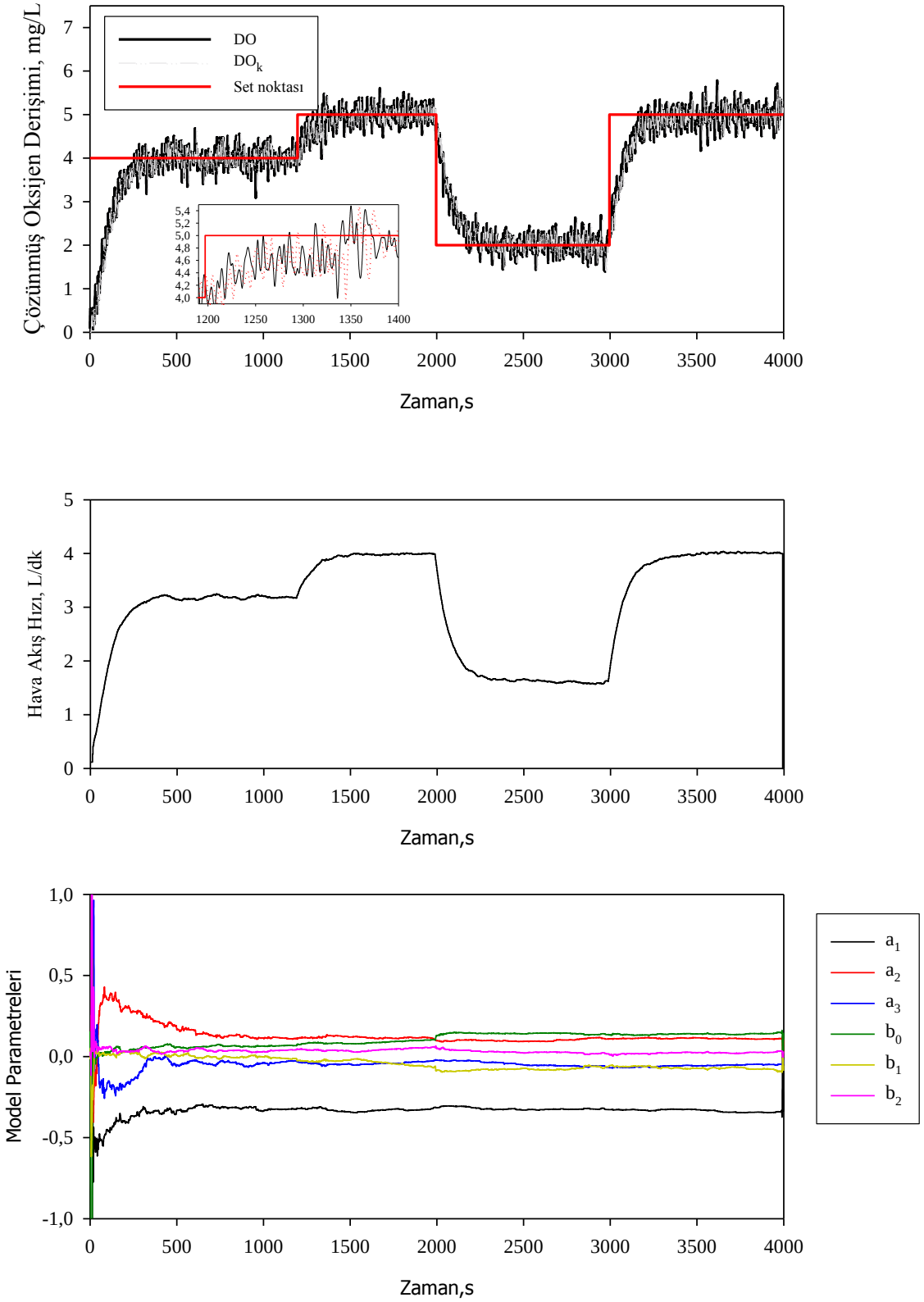
Şekil 9.31 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.001 e(t)=0.02)



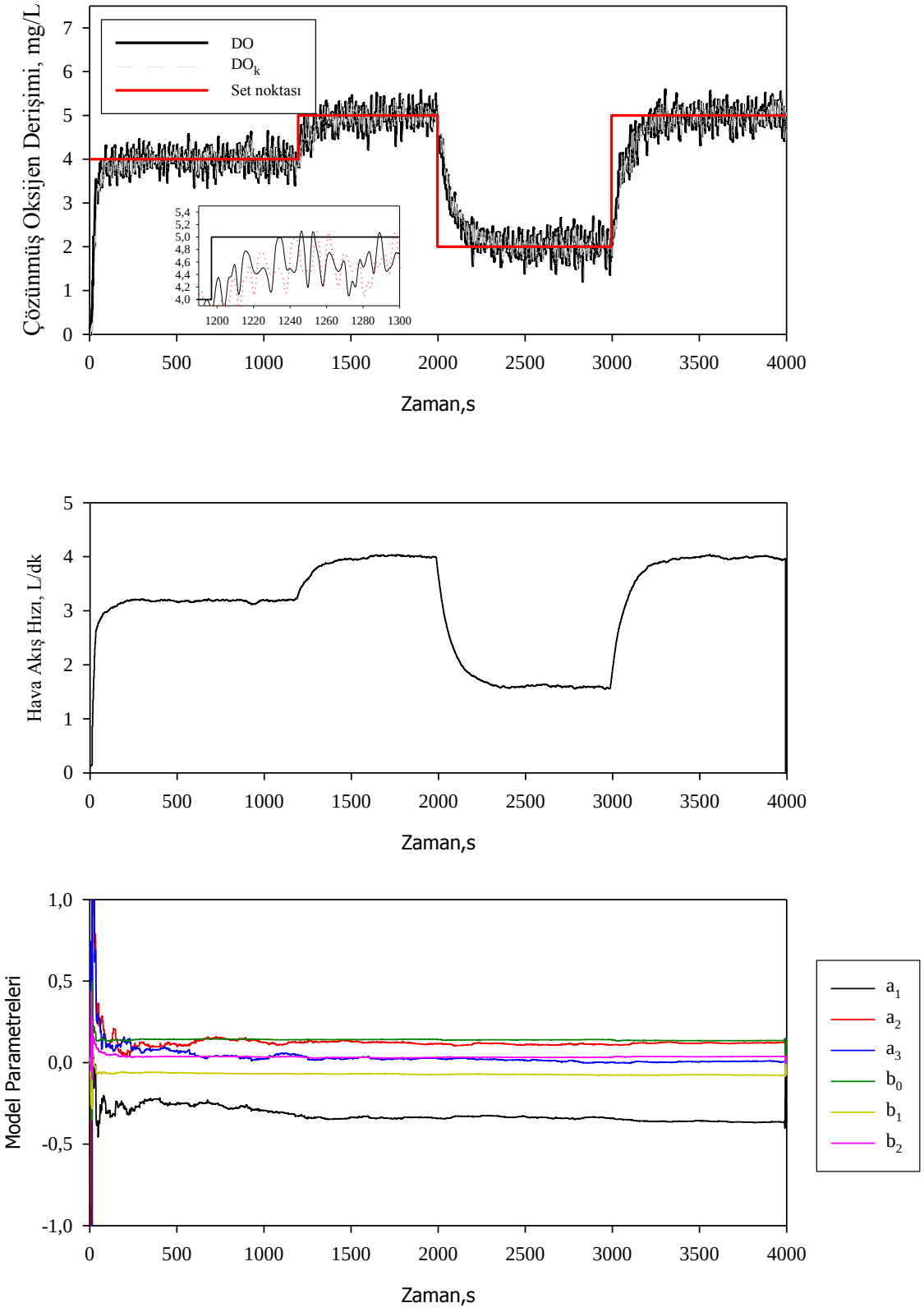
Şekil 9.32 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.002 e(t)=0.02)



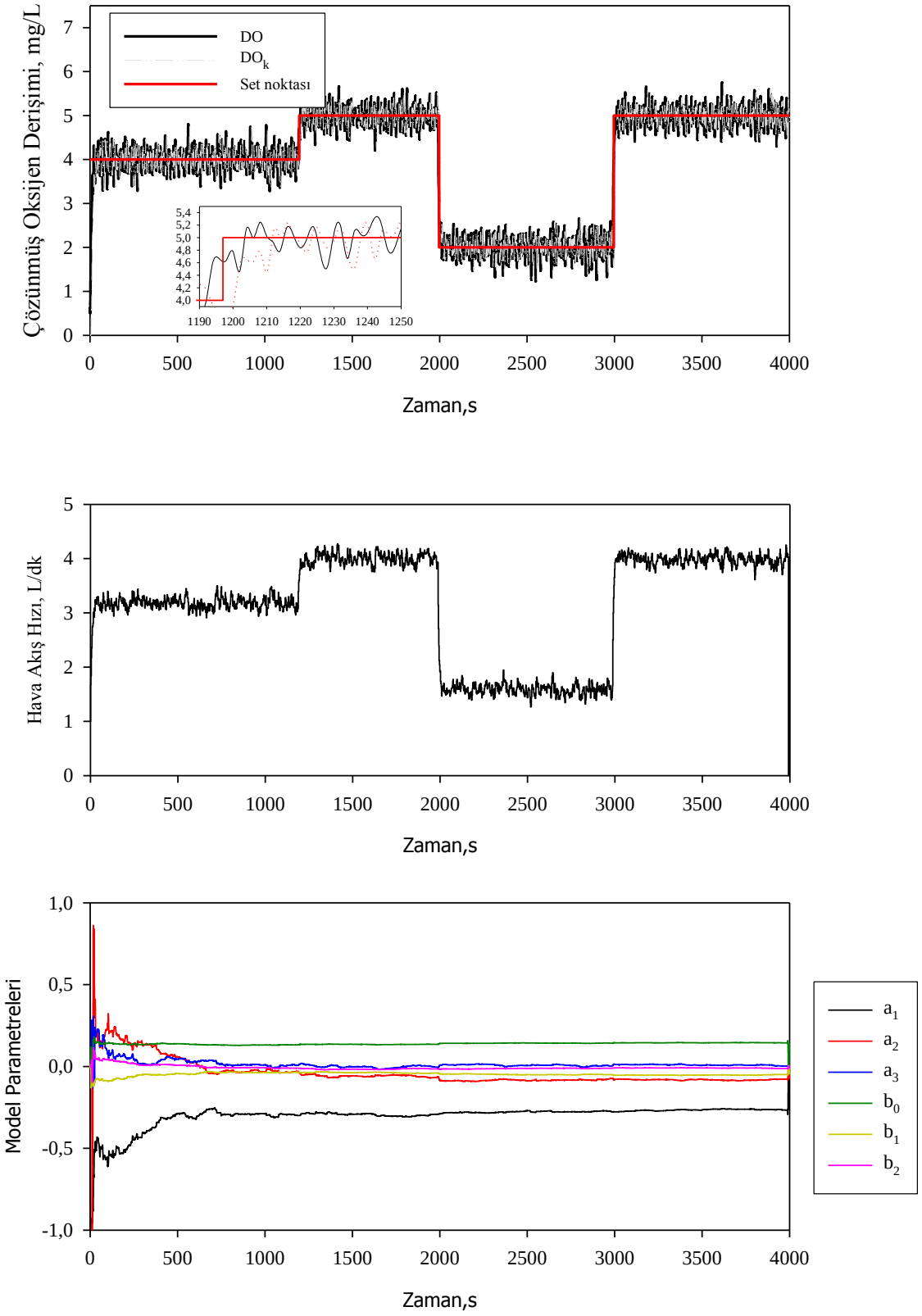
Şekil 9.29 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.0005 e(t)=0.02)



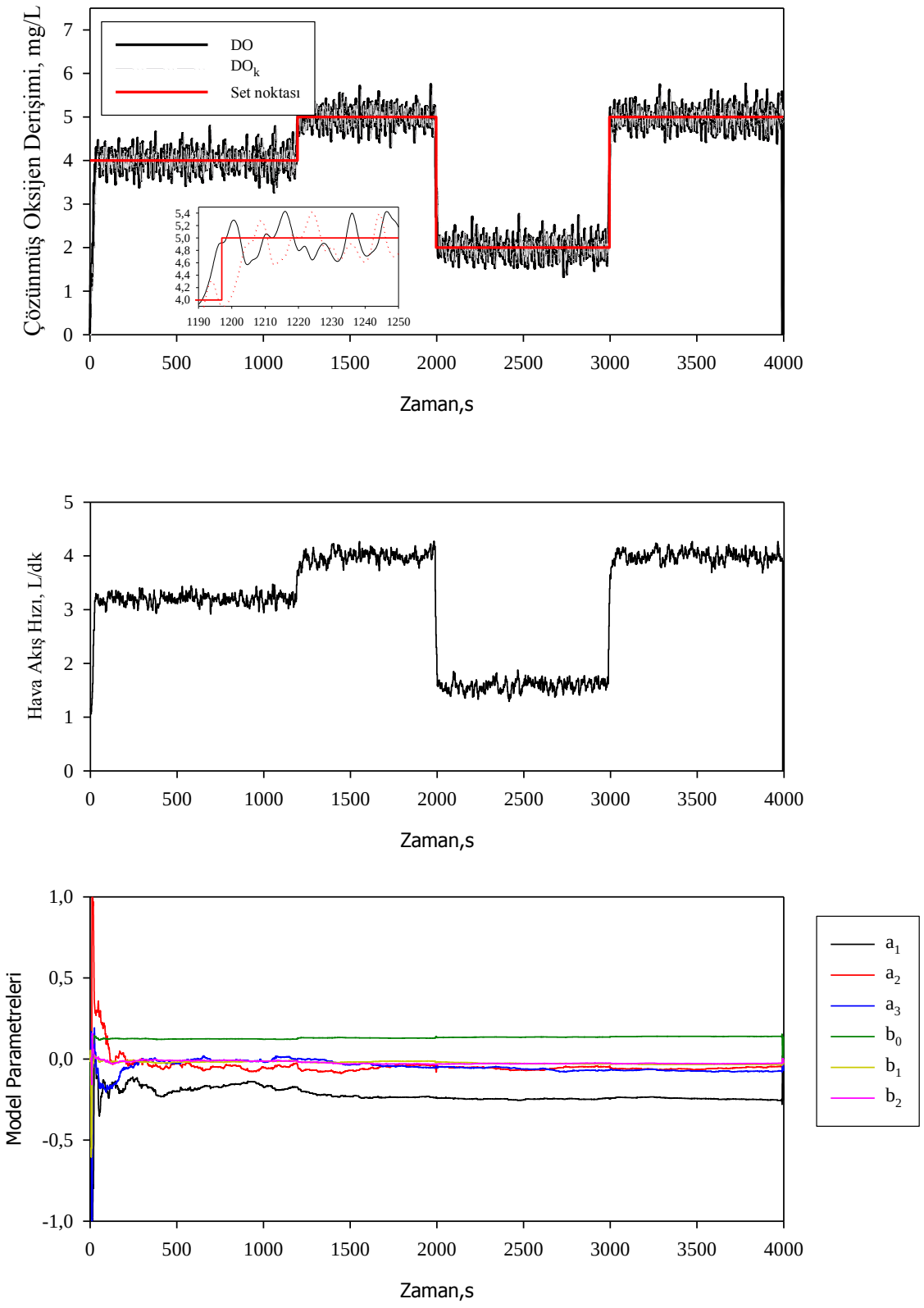
Şekil 9.34 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu(NU=1 N2=6 λ=0.002 e(t)=0.02)



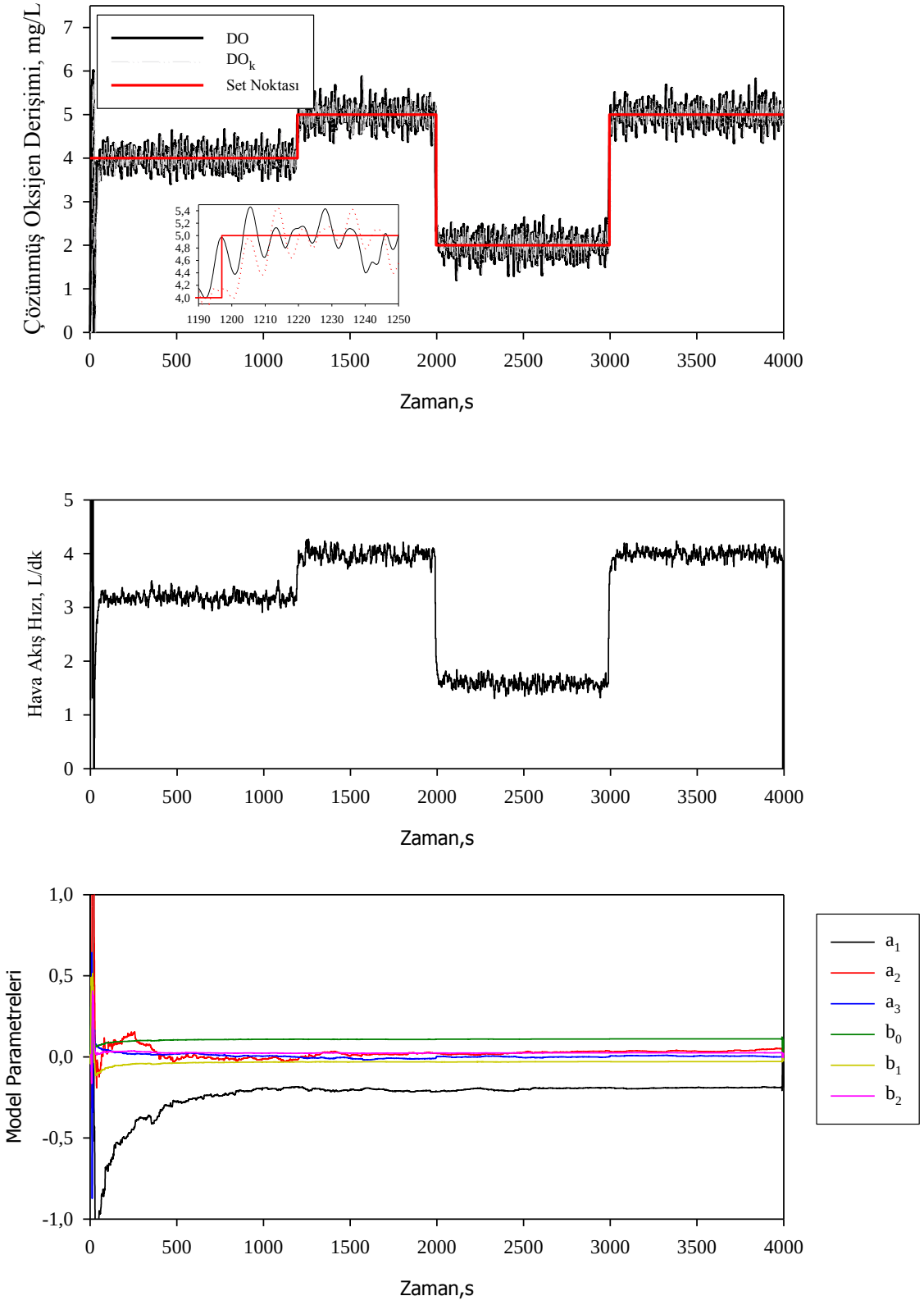
Şekil 9.35 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.001 e(t)=0.02)



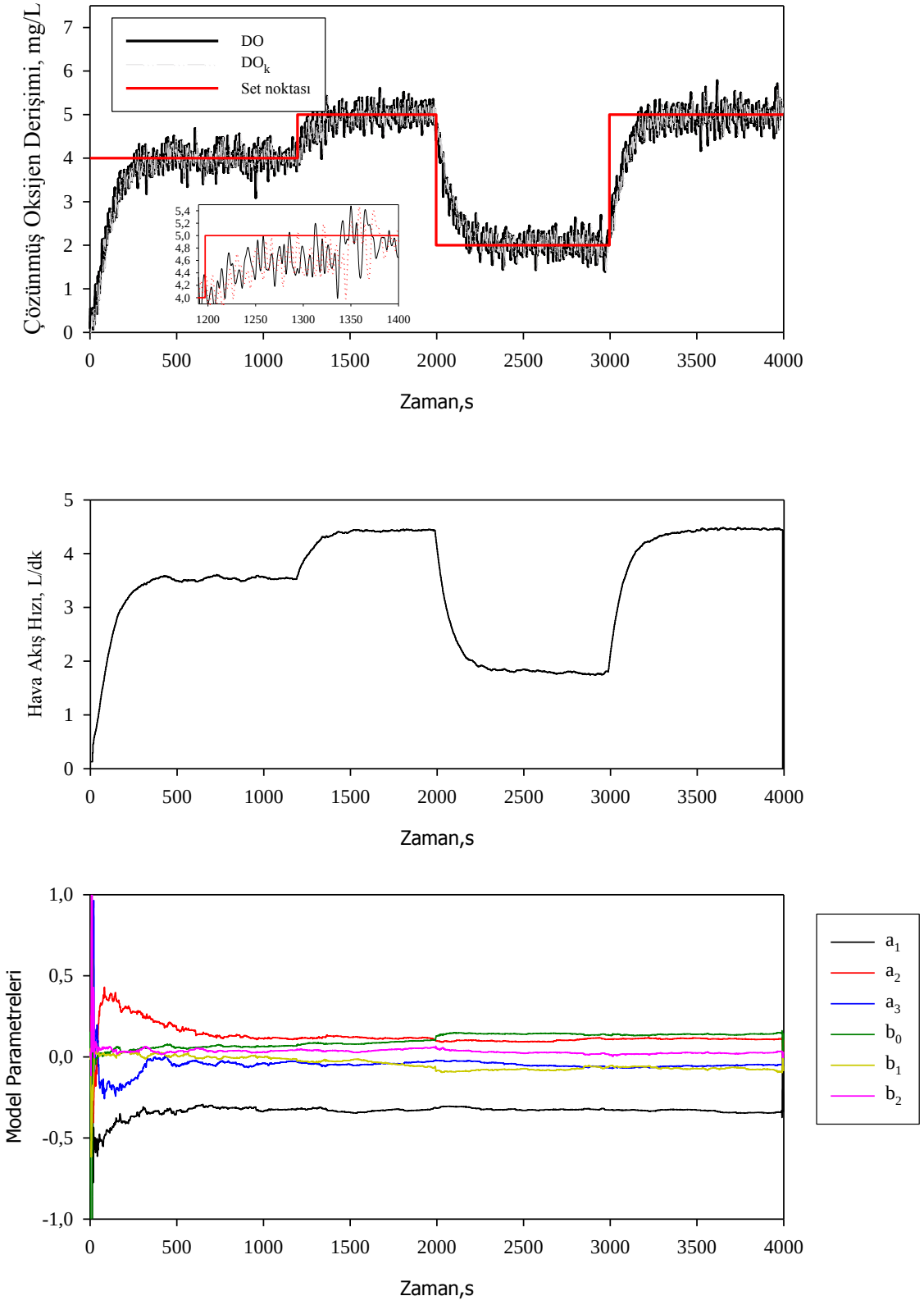
Şekil 9.36 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.001 e(t)=0.2)



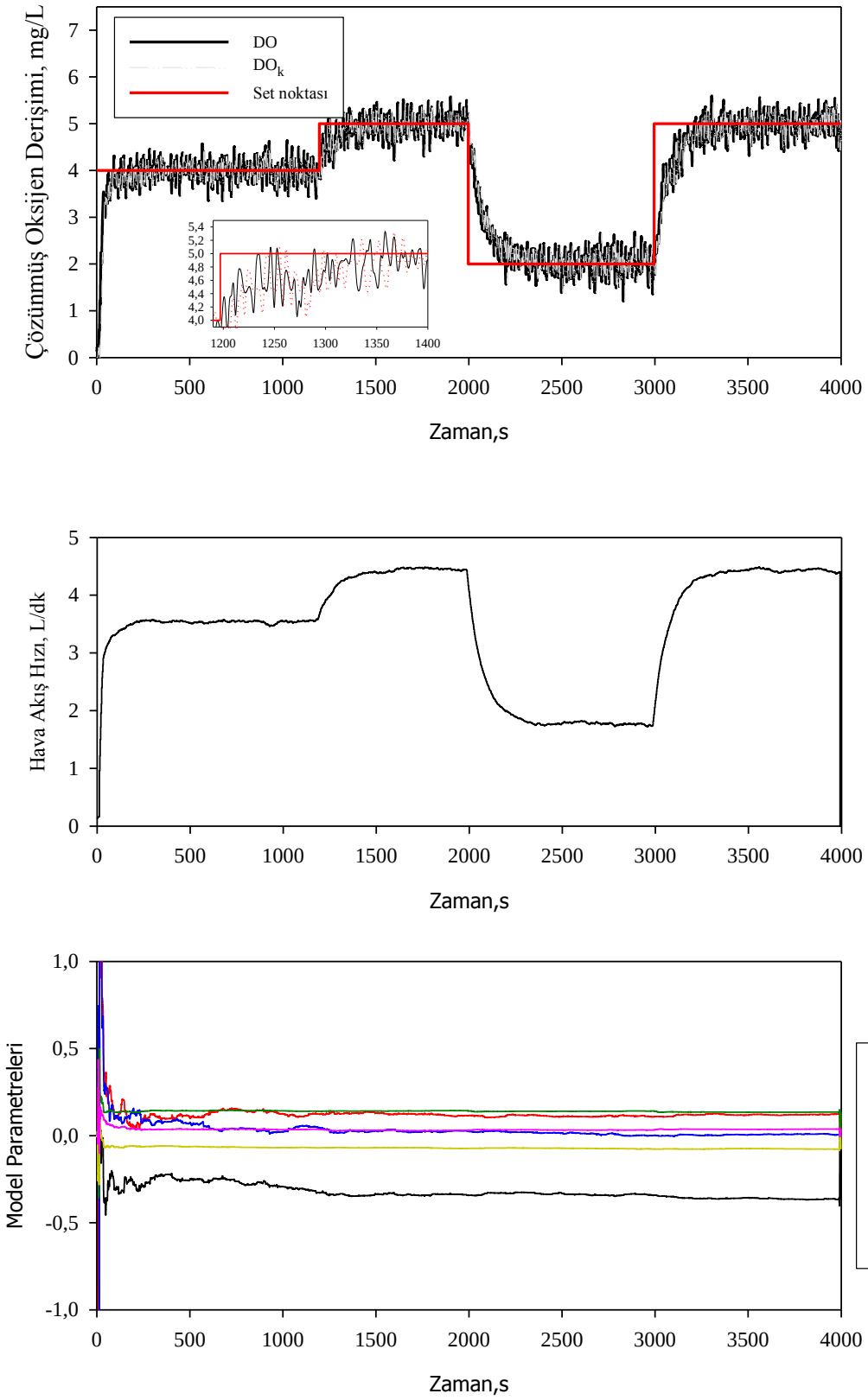
Şekil 9.37 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.002 e(t)=0.2)



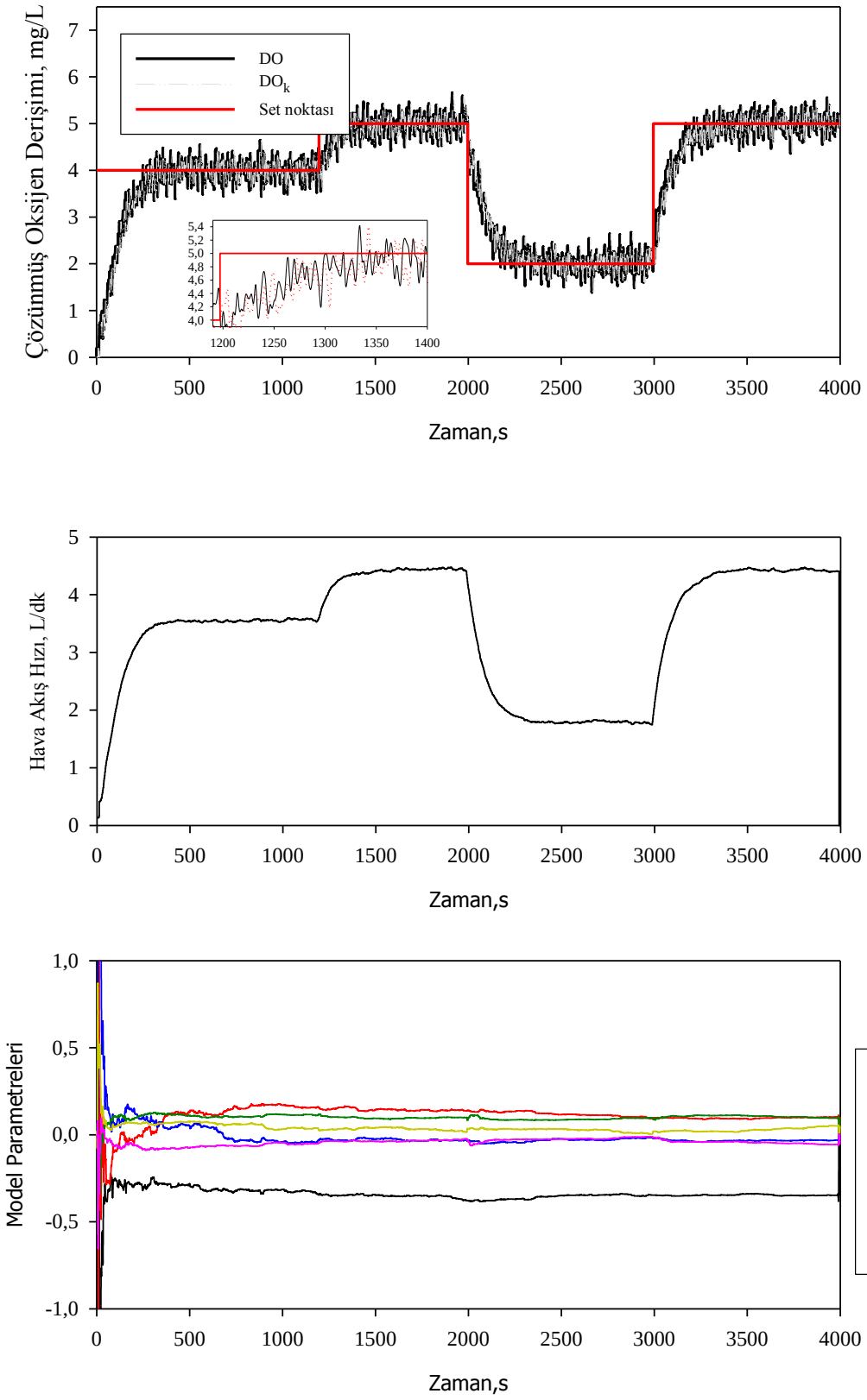
Şekil 9.38 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.0005 e(t)=0.2)



Şekil 9.39 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.002 e(t)=0.2)



Şekil 9.40 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.001 e(t)=0.2)



Şekil 9.41 Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.0005 e(t)=0.2)

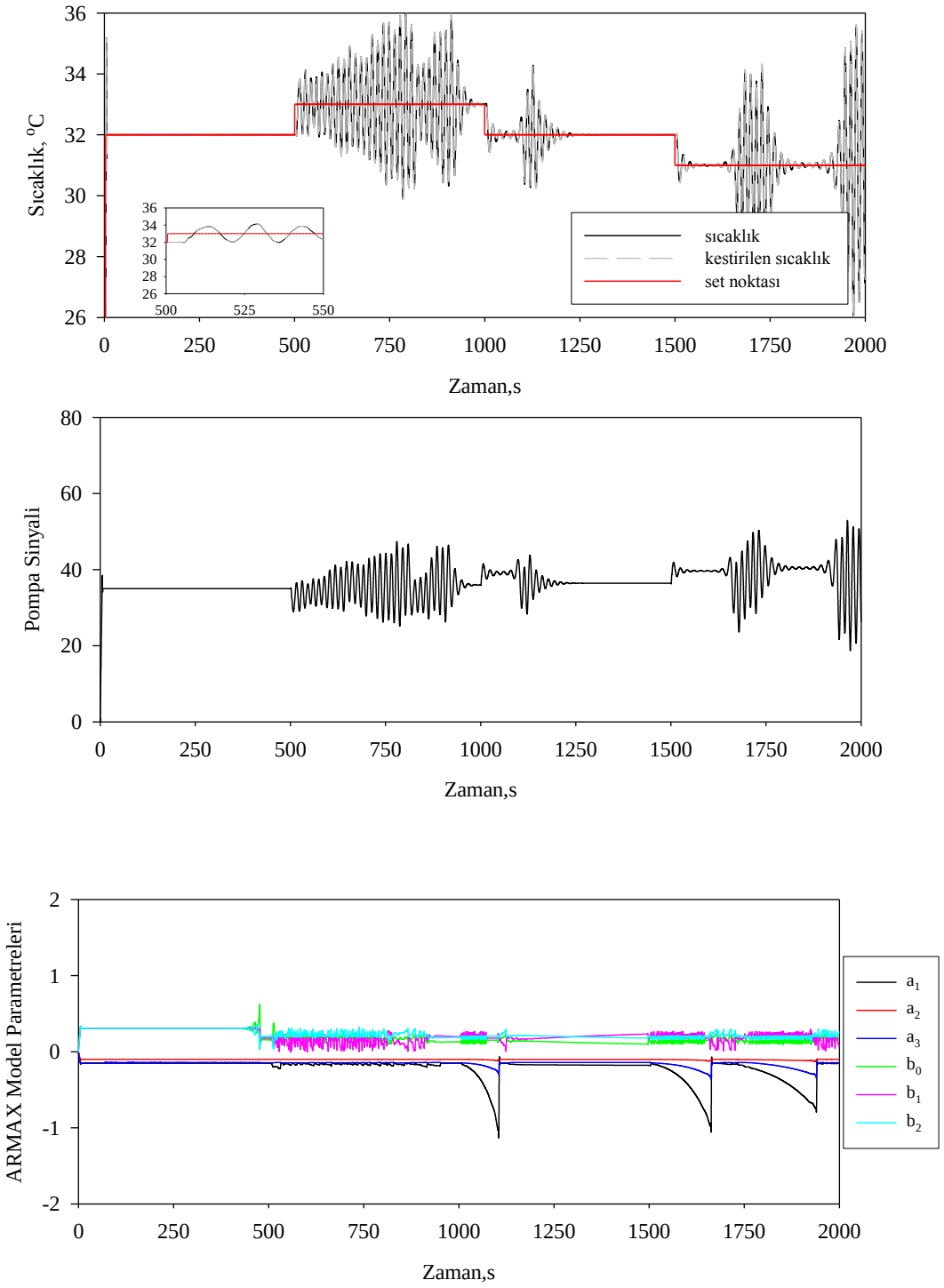
Çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu çalışmalarında, sistemin ölü zamanına uygun olarak örnekleme zamanı seçildiği için Minimum Tahmin Ufku (Minimum Prediction Horizon) , N_1=1, literatürde, basit sistemlerde ve genelde 1 seçildiğinde iyi sonuçlara ulaşıldığı bilinen Kontrol Ufku (Control Horizon), N_U =1 olarak seçilmiştir. Diğer kontrol tasarım parametreleri olan Kontrol Ağırlık Faktörü (Control Weighting), λ ile Maksimum Tahmin Ufku (Maximum Prediction Horizon), N_2'nin ve gürültünün farklı değerlerinde yapılan çalışmalar sonucunda (Şekil 9.31-9.41) elde edilen IAE ve ISE kontrol performans kriterleri çizelge 9.10' de verilmiştir.

Çizelge 9.10 Farklı kontrol tasarımı parametreleri ve gürültü altında çözünmüş oksijen derişiminin teorik GPC kontrolu performans kriterleri

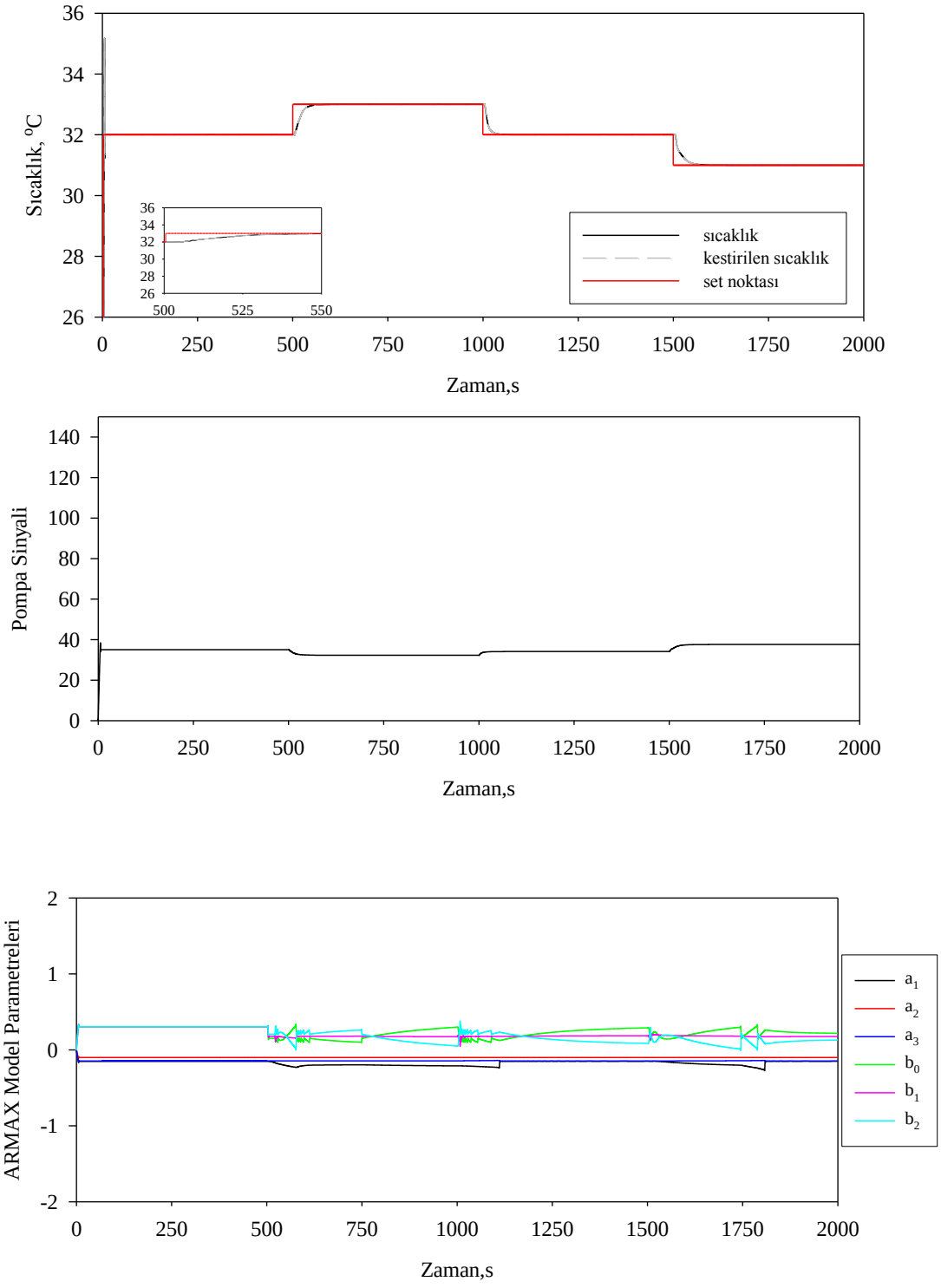
N_2	λ	e	ISE	IAE
2	0.0005	0.02	225.685	408.414
	0.001		**159.960**	**397.204**
	0.002		275.560	415.484
6	0.0005	0.02	984.712	758.123
	0.001		622.150	610.120
	0.002		956.875	741.445
2	0.0005	0.2	225.685	408.414
	0.001		**159.960**	**397.204**
	0.002		275.560	415.484
6	0.0005	0.2	984.712	758.123
	0.001		622.150	610.120
	0.002		956.875	741.445

9.2.2.2 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrol sonuçları

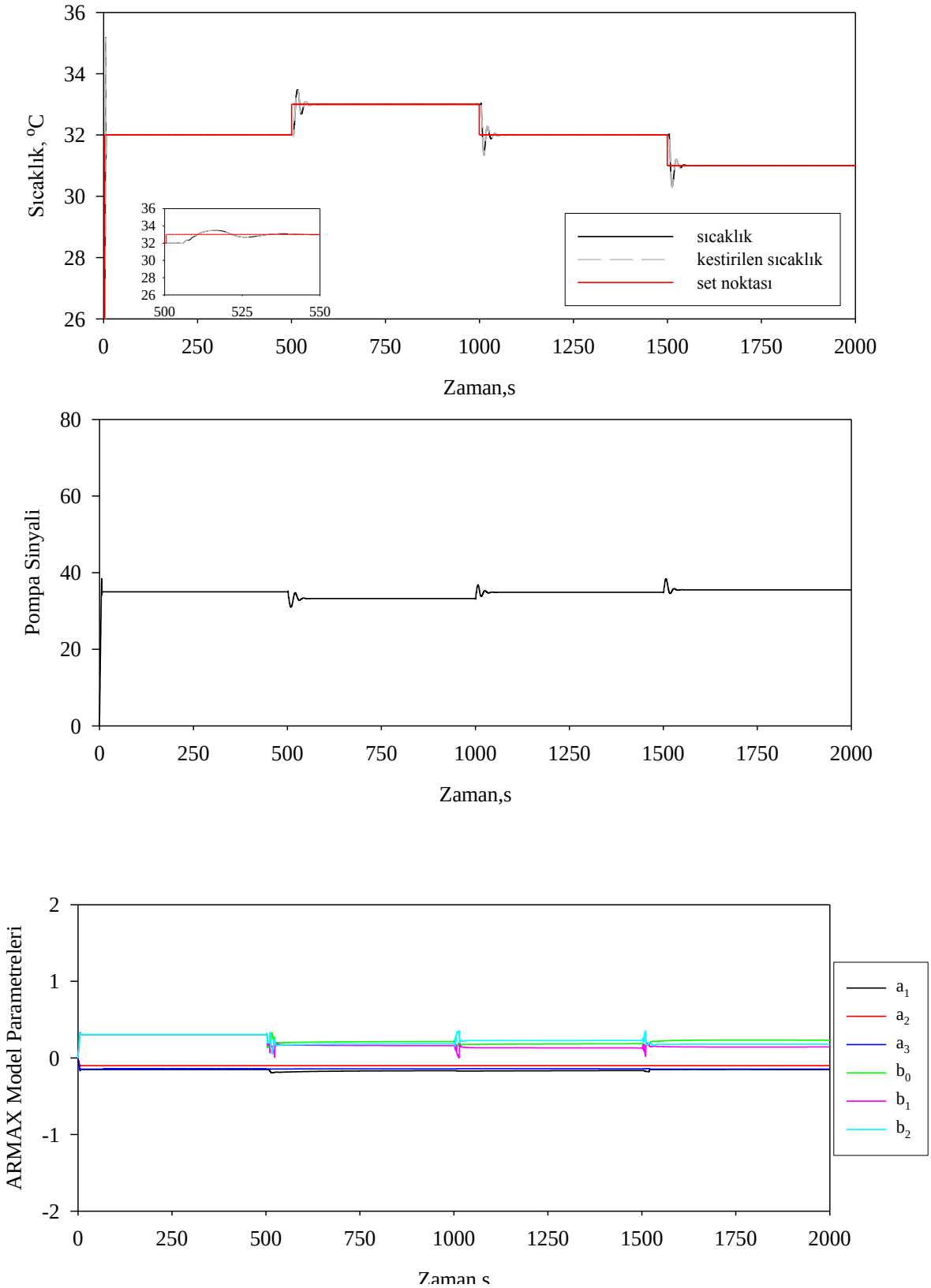
Bölüm 9.1.3.2'de biyoreaktör sıcaklığının sistem tanımlama çalışmalarında elde edilen model parametreleri kullanılarak ekmek mayası üretilen kesikli bir biyoreaktörün teorik sıcaklık kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Bölüm 7'de ayrıntılı olarak anlatılan GPC kontrol algoritmasının MATLAB®'ta yazılan ve model parametreleri her bir örnekleme adımında yenilenen bir program kullanılmıştır. Yapılan çalışmalara ait grafikler şekil 9.42-65'de verilmiştir.



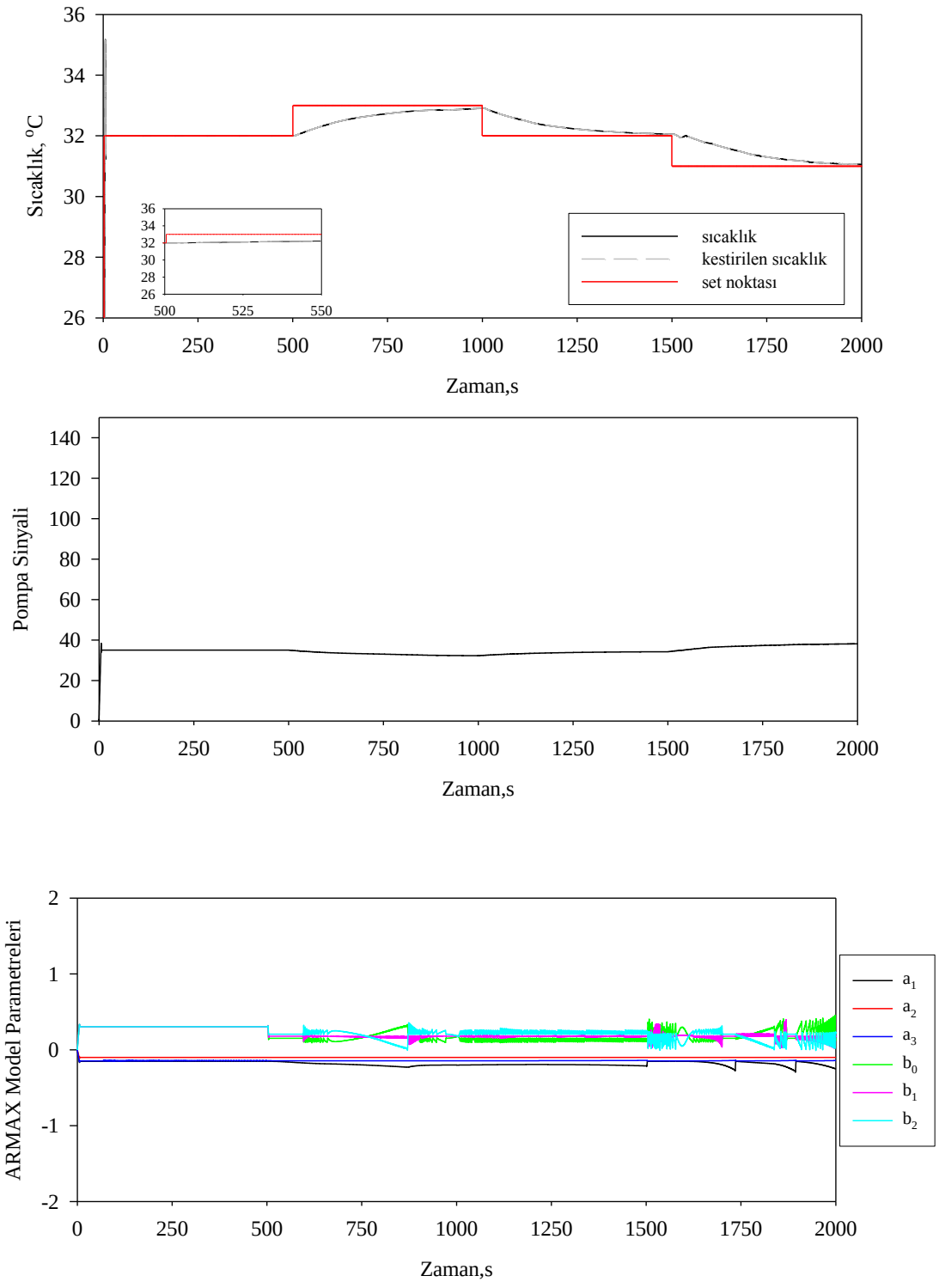
Şekil 9.42 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.05)



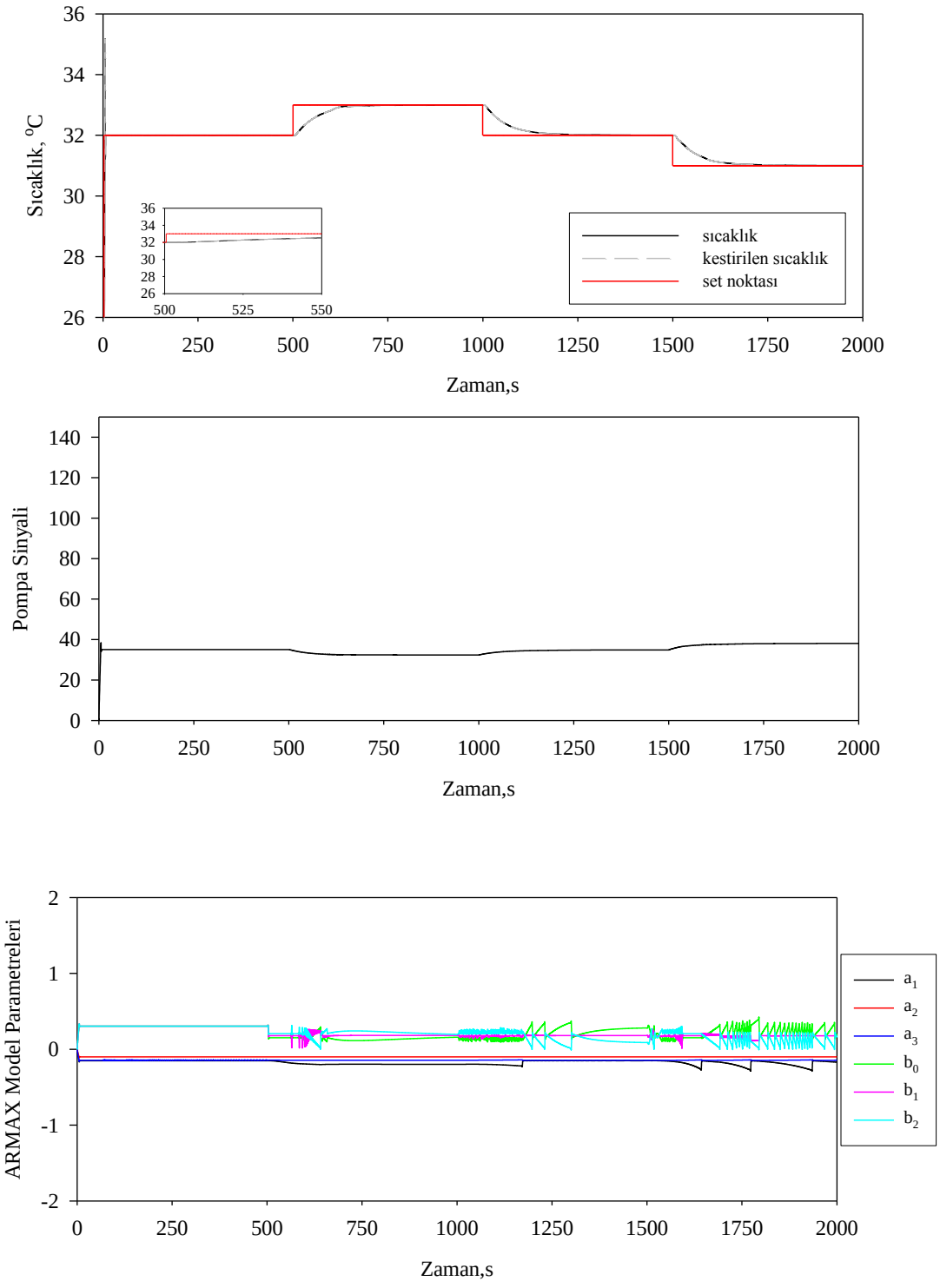
Şekil 9.43 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.5)



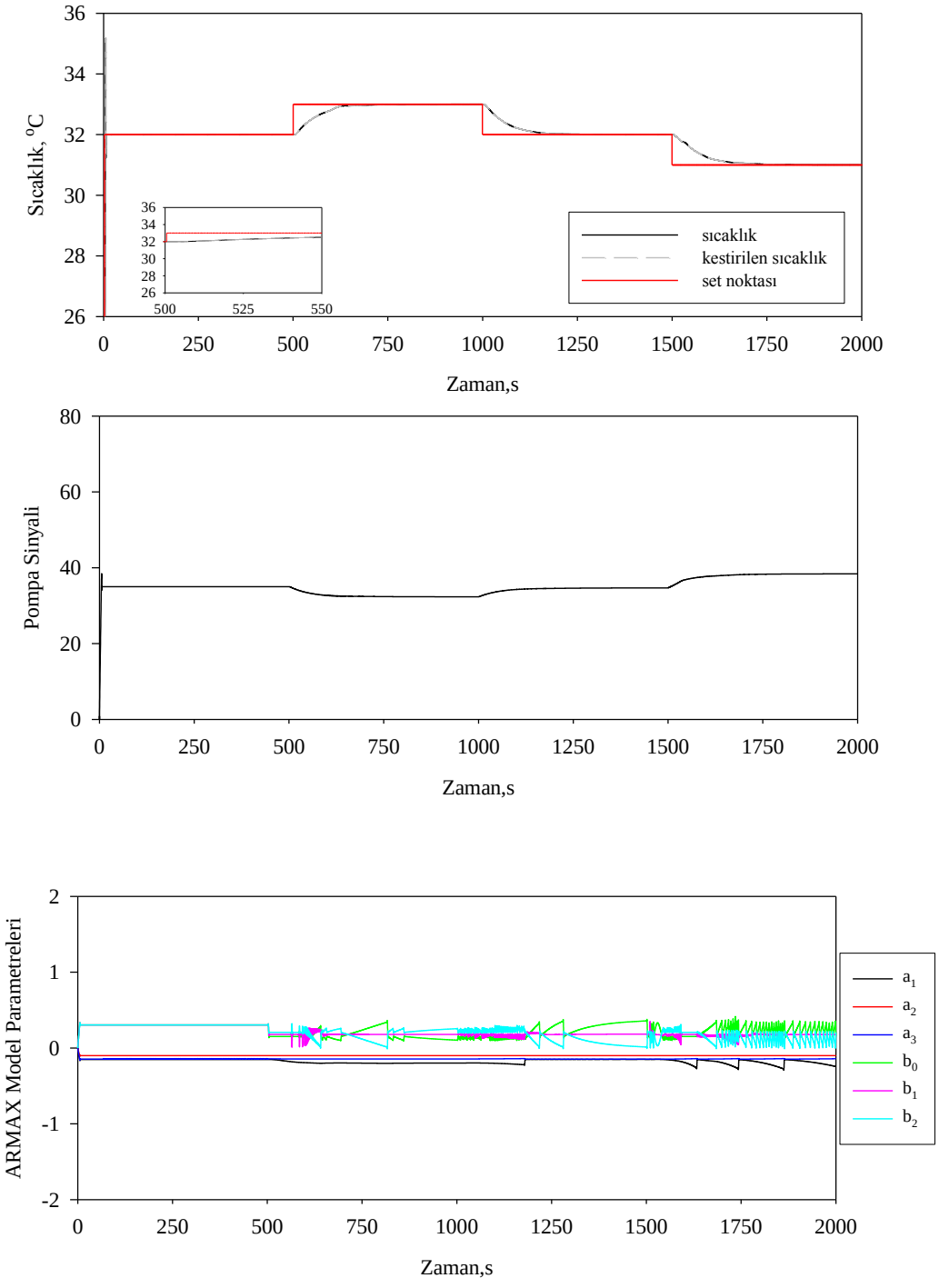
Şekil 9.44 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=0.1)



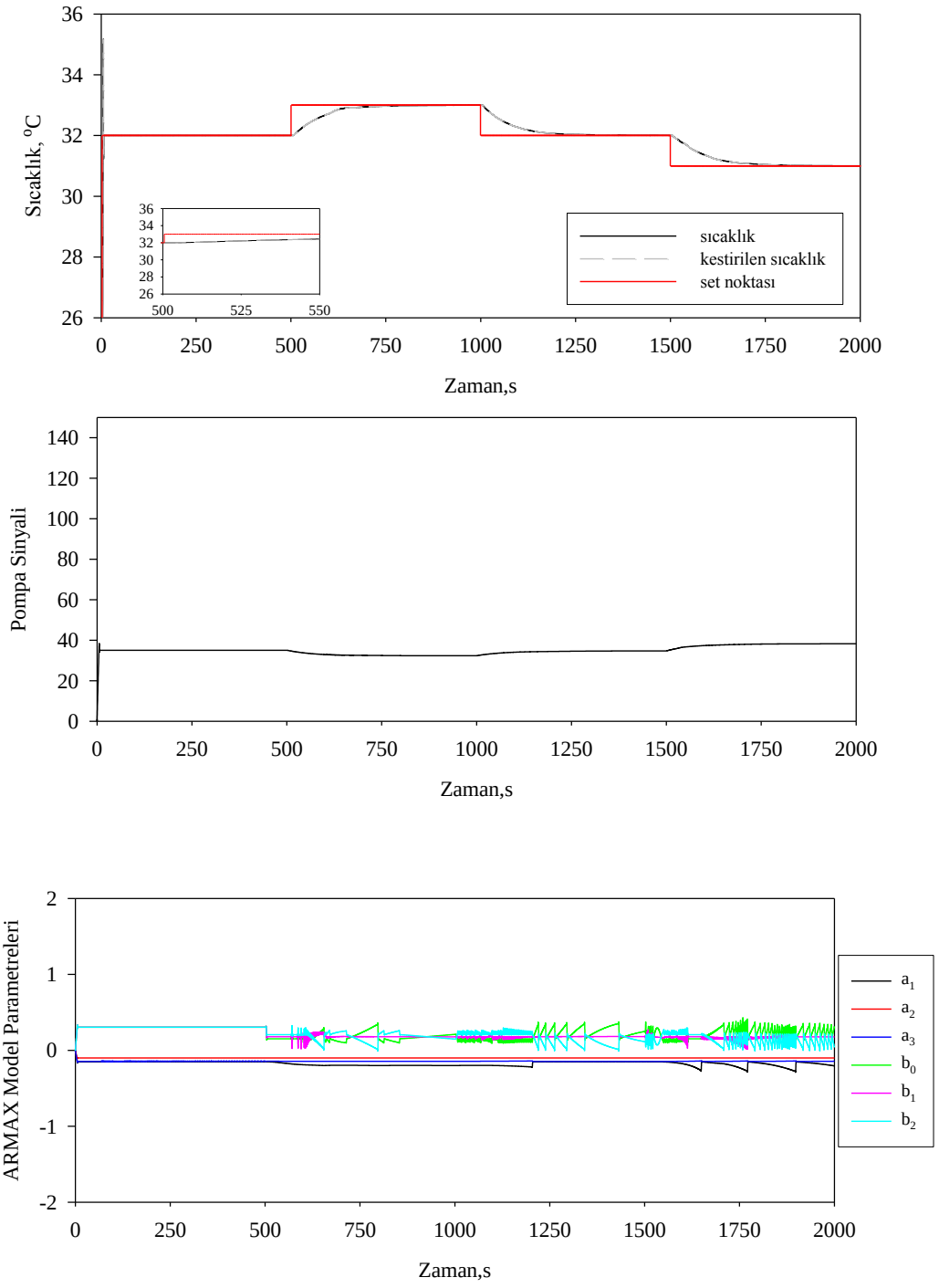
Şekil 9.45 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=2 λ=5)



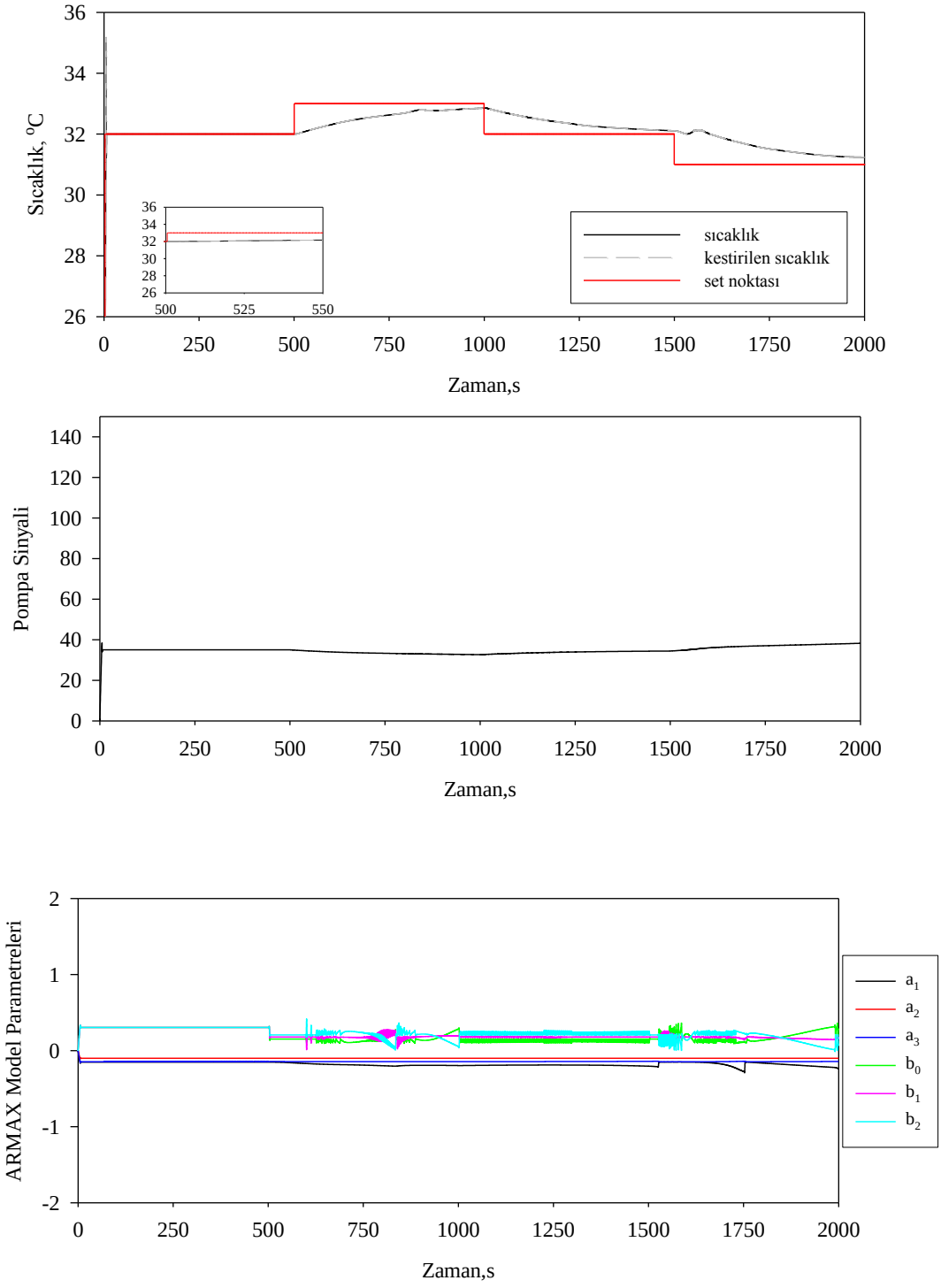
Şekil 9.46 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.005)



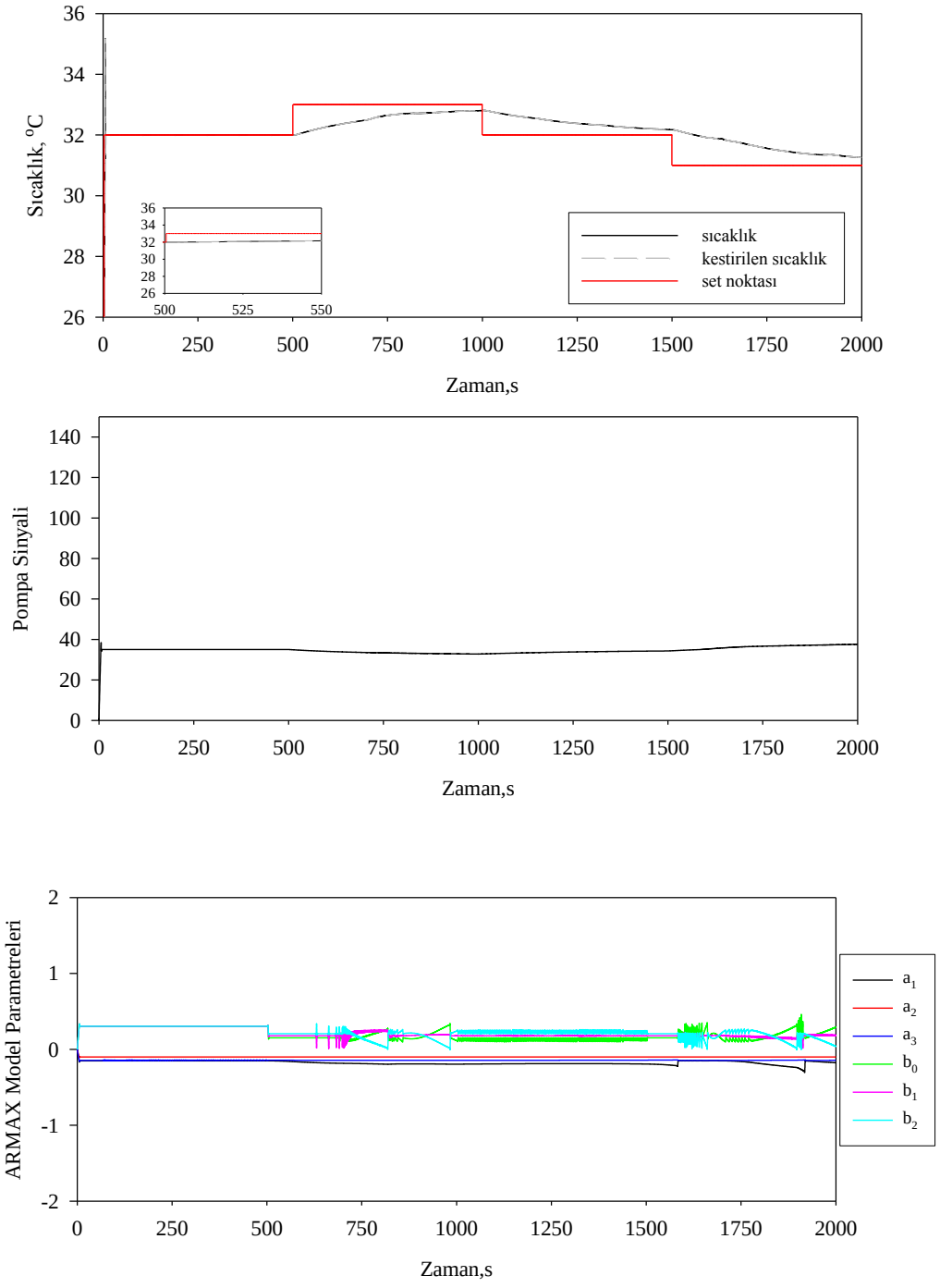
Şekil 9.47 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.05)



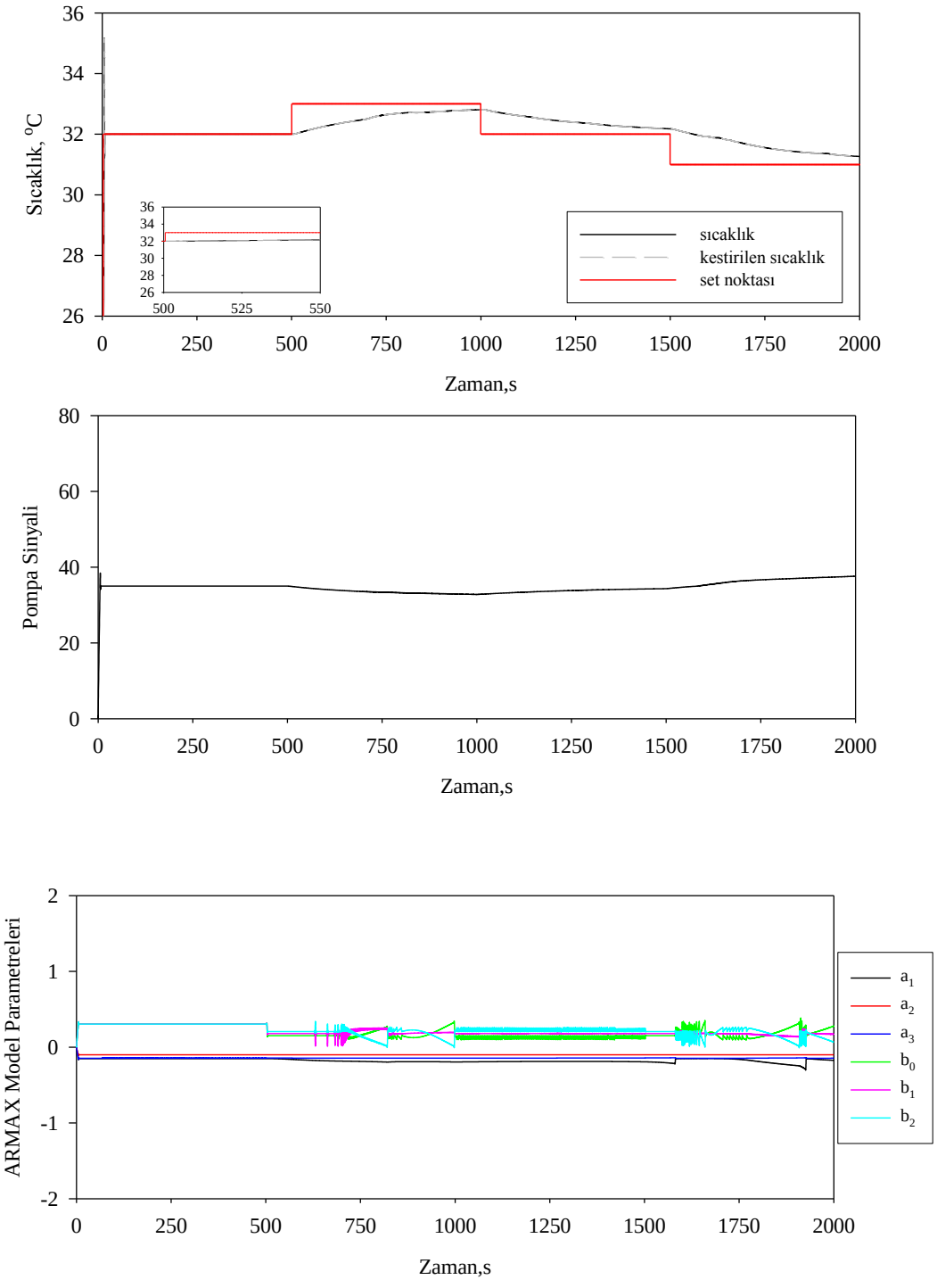
Şekil 9.48 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=0.5)



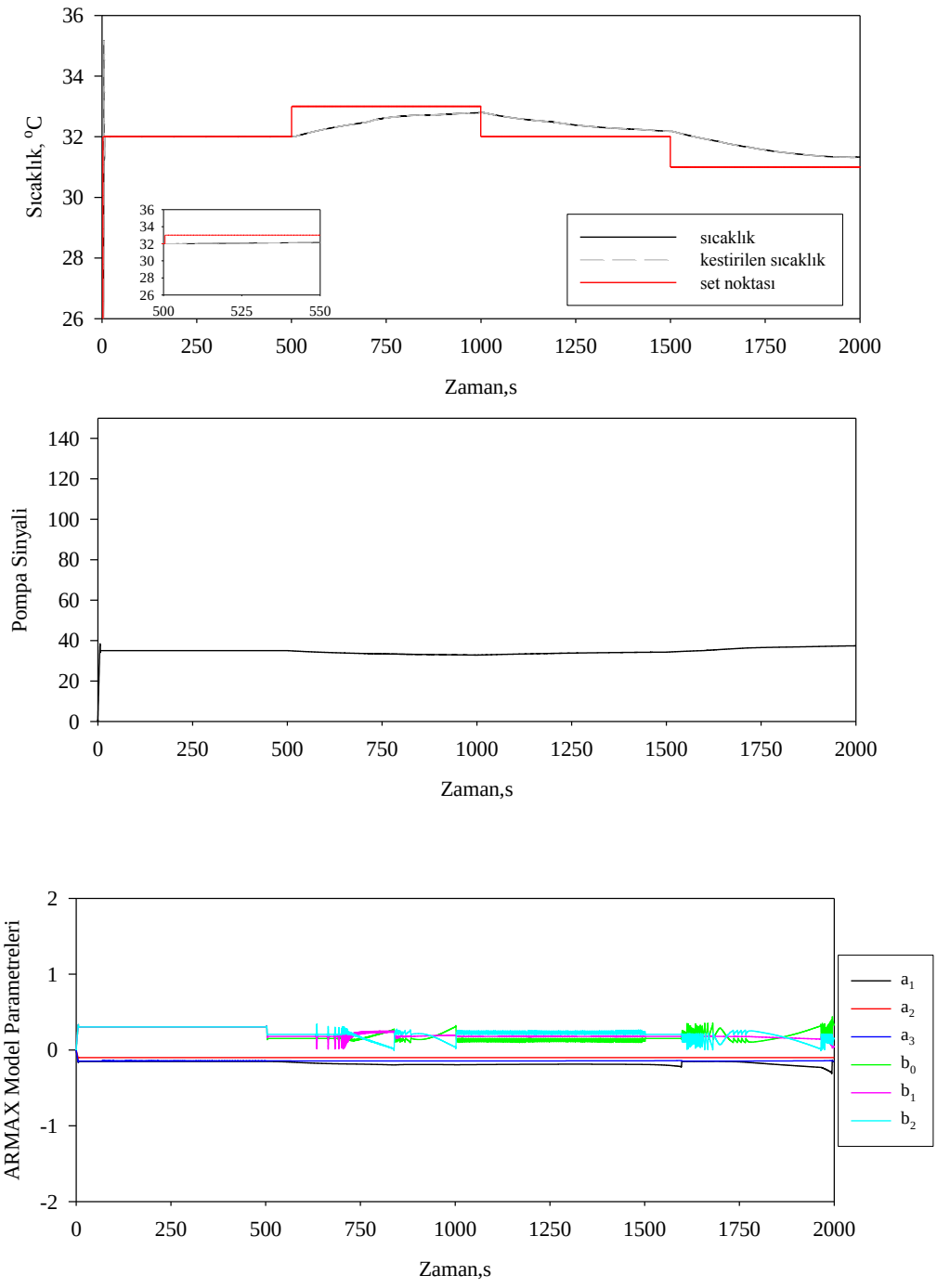
Şekil 9.49 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=6 λ=5)



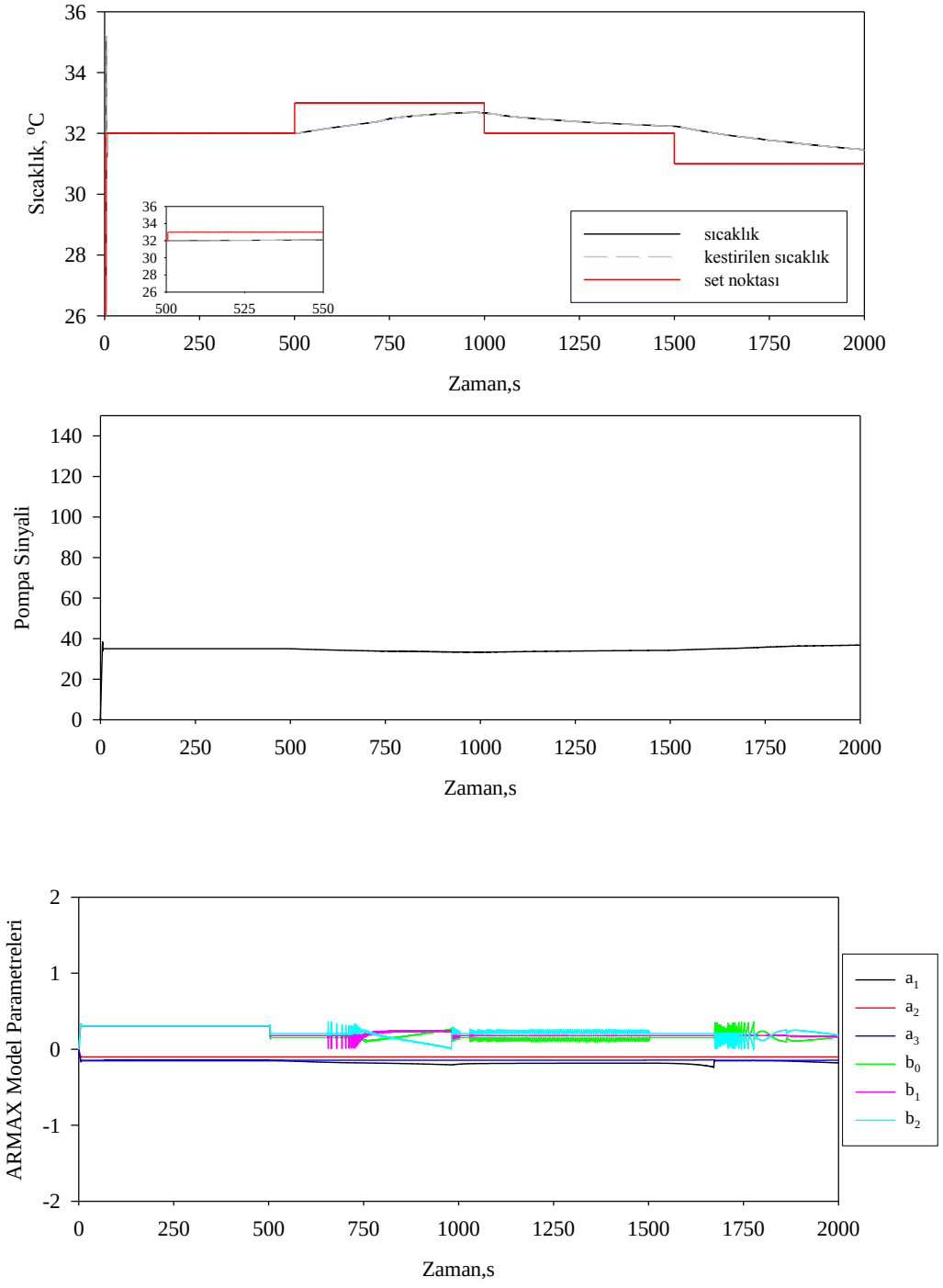
Şekil 9.50 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.005)



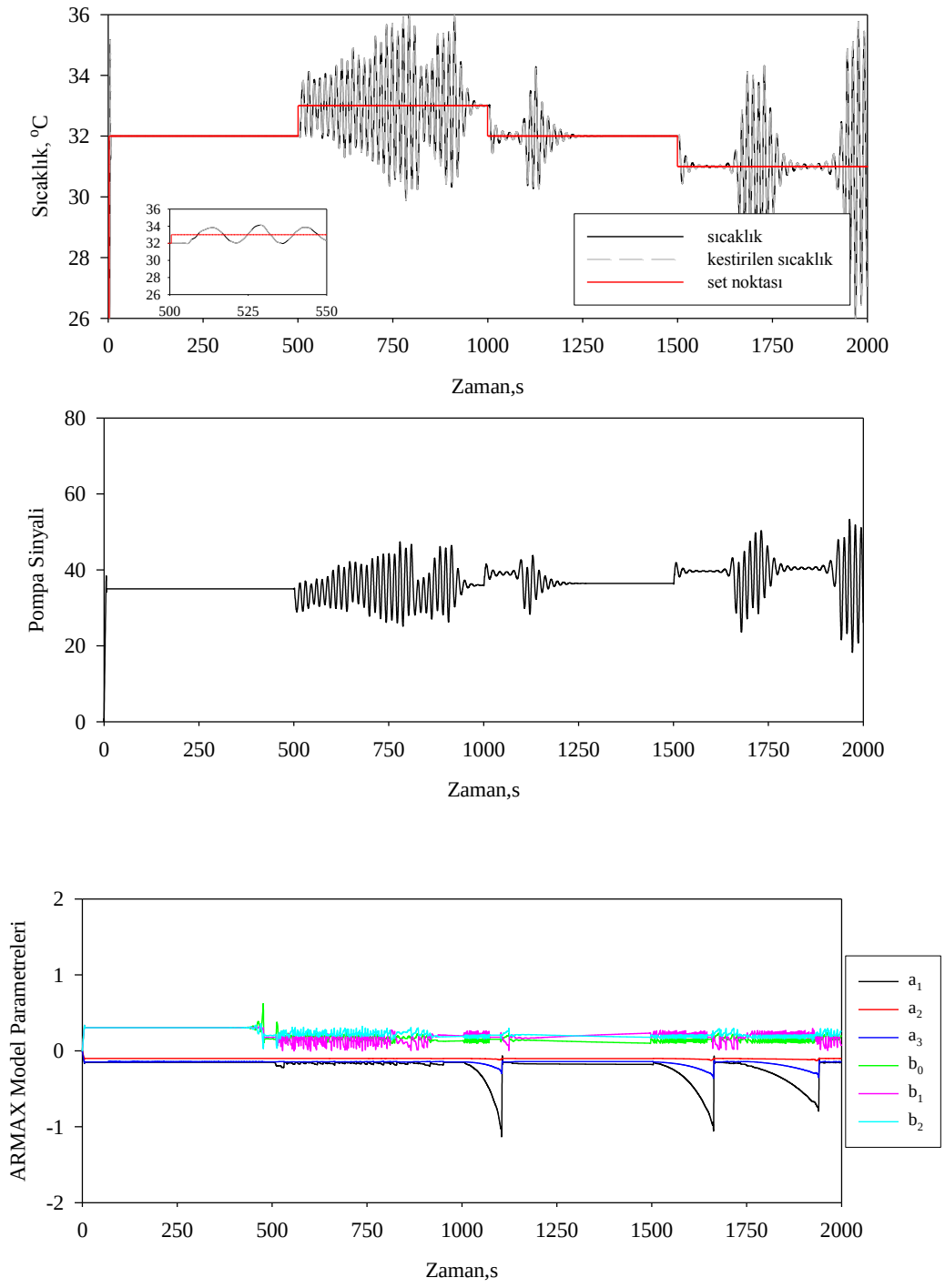
Şekil 9.51 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.05)



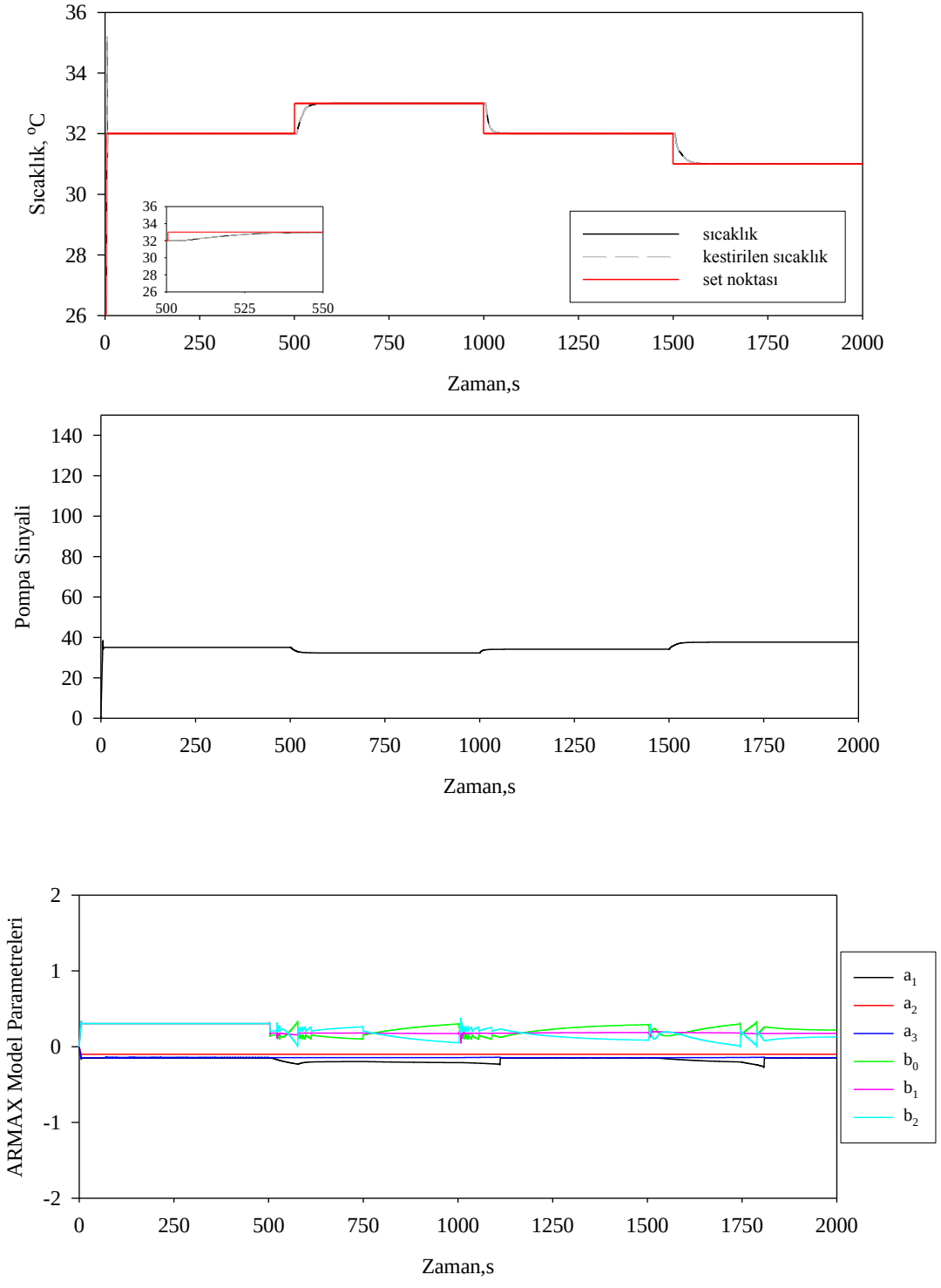
Şekil 9.52 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=0.5)



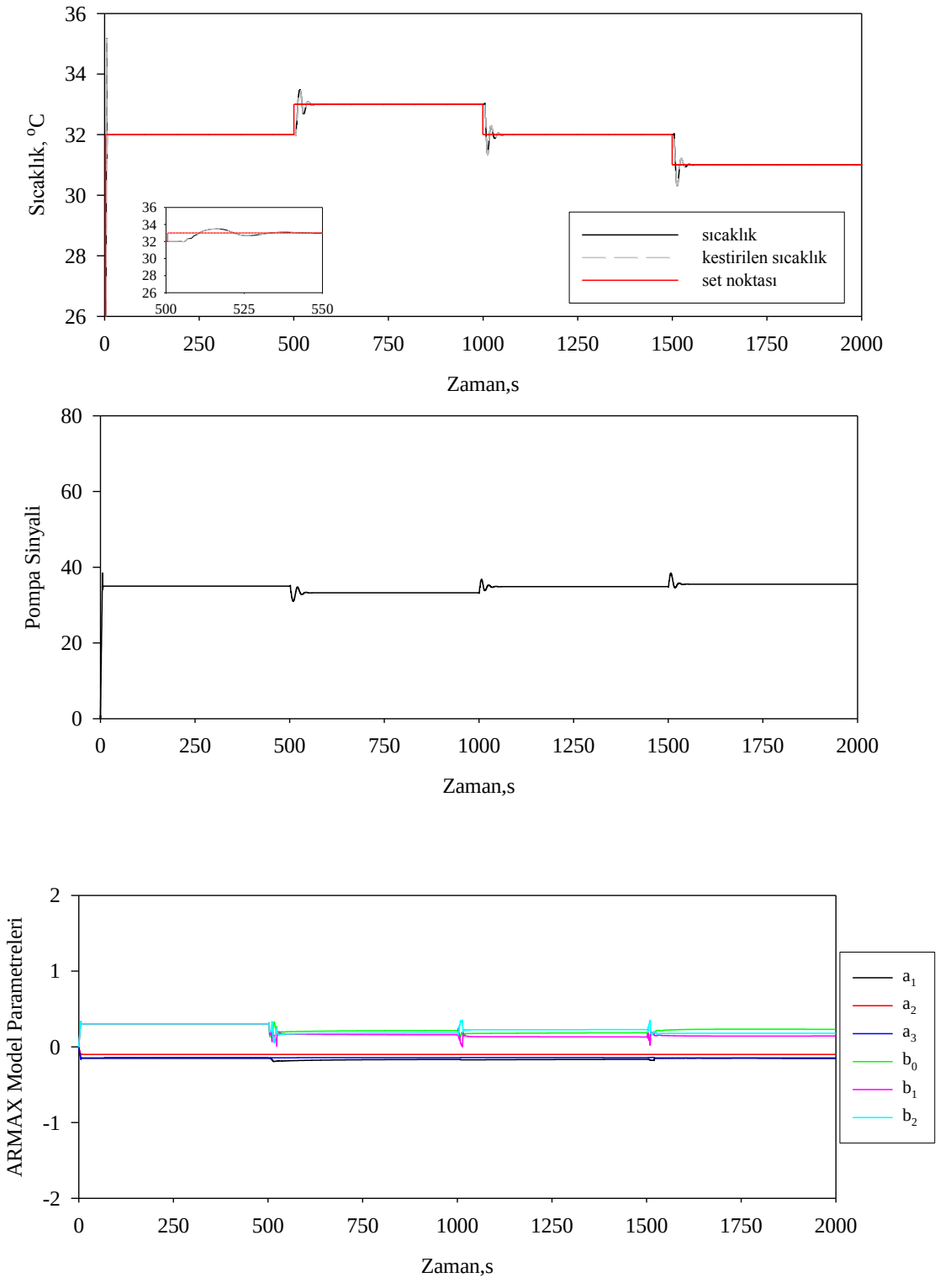
Şekil 9.53 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=1 N2=10 λ=5)



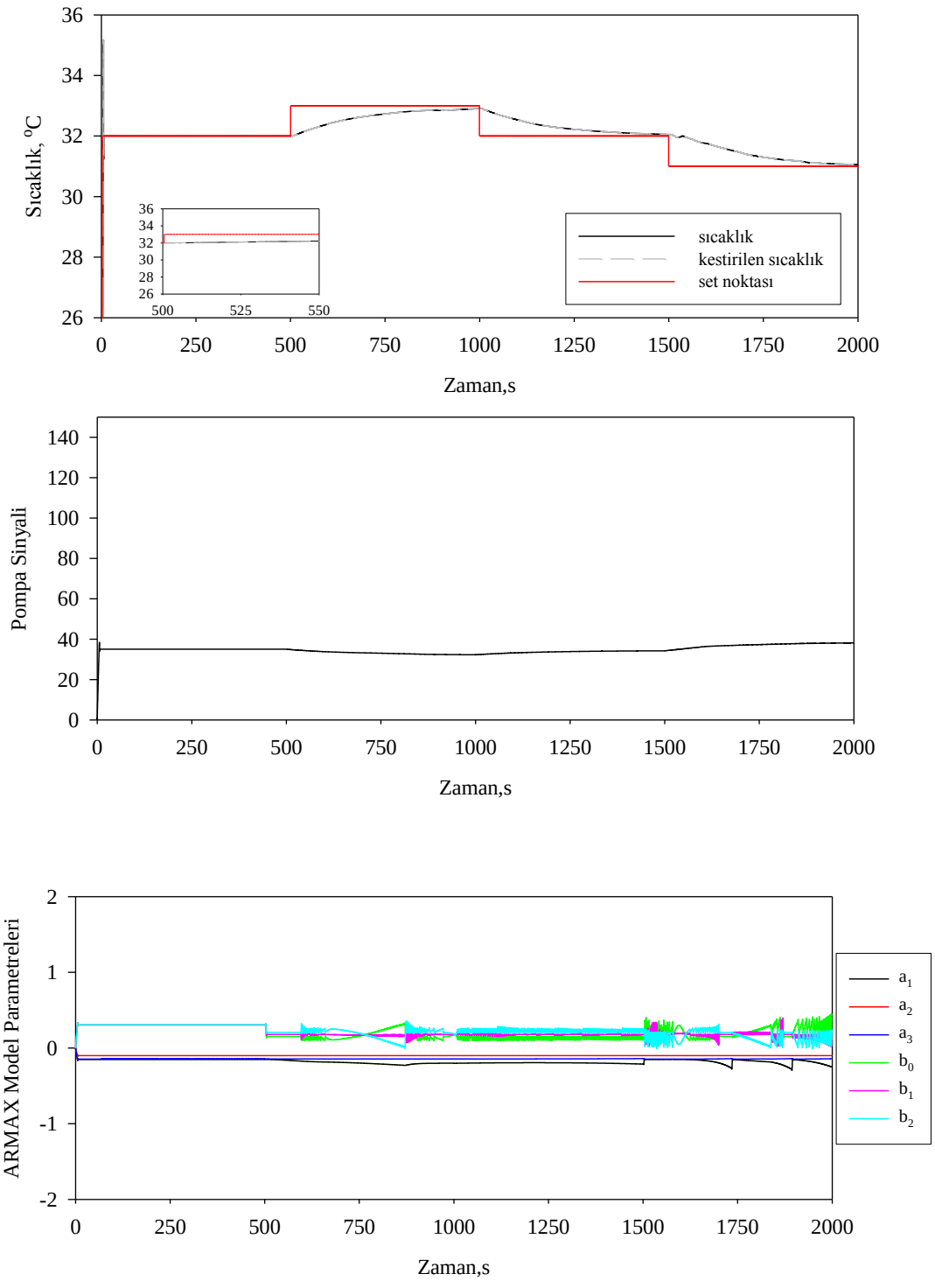
Şekil 9.54 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.05)



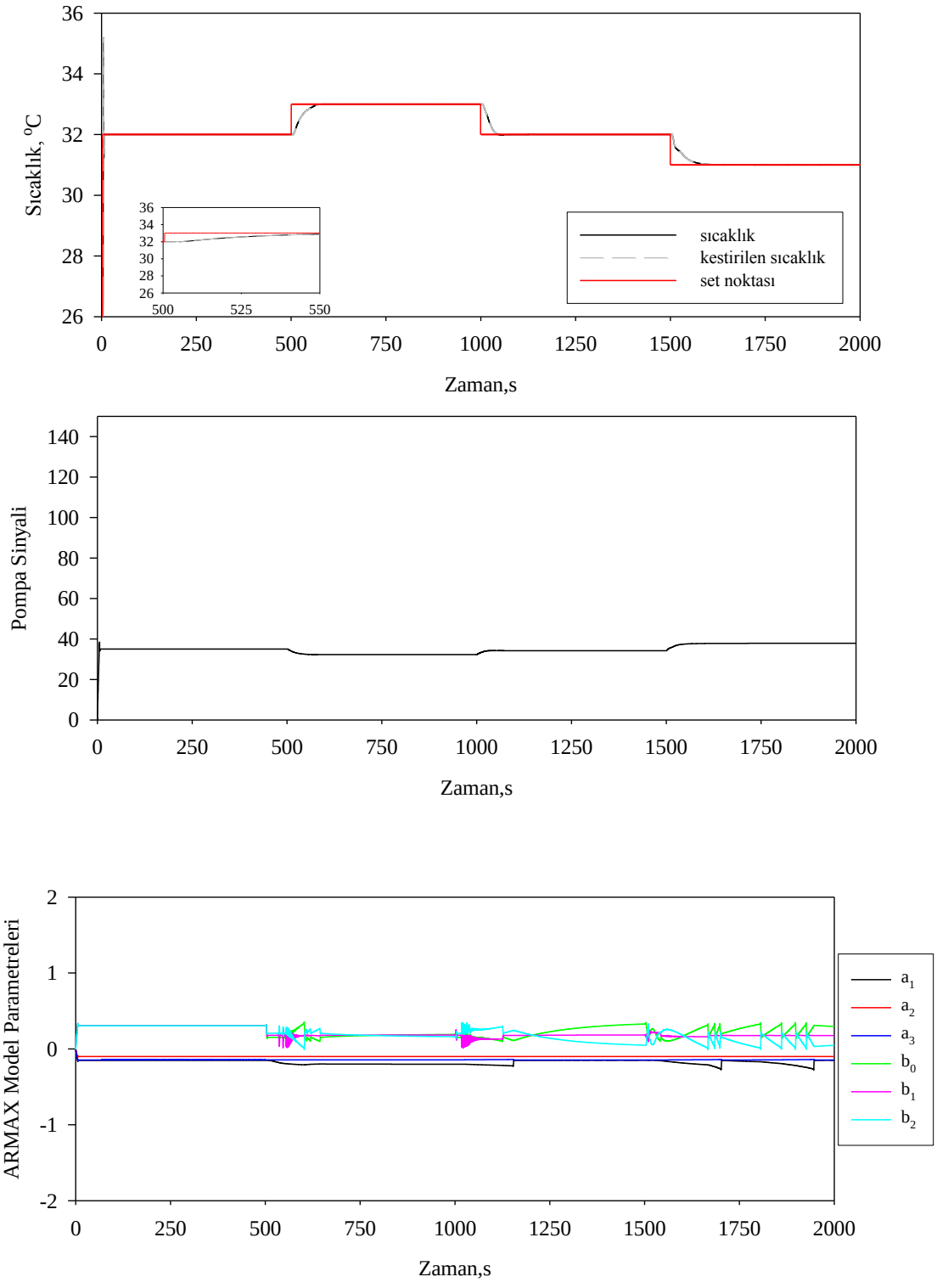
Şekil 9.55 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.5)



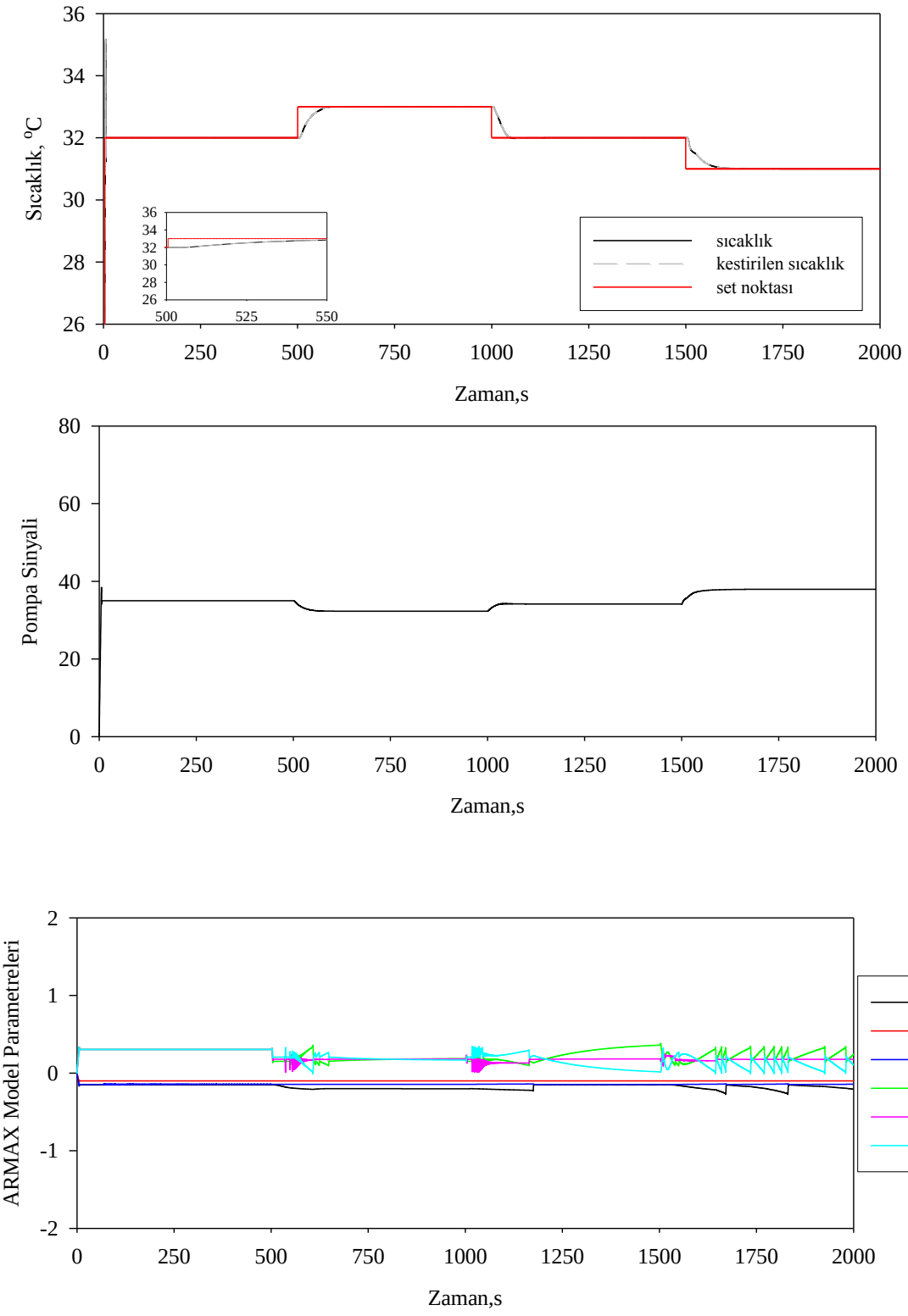
Şekil 9.56 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=0.1)



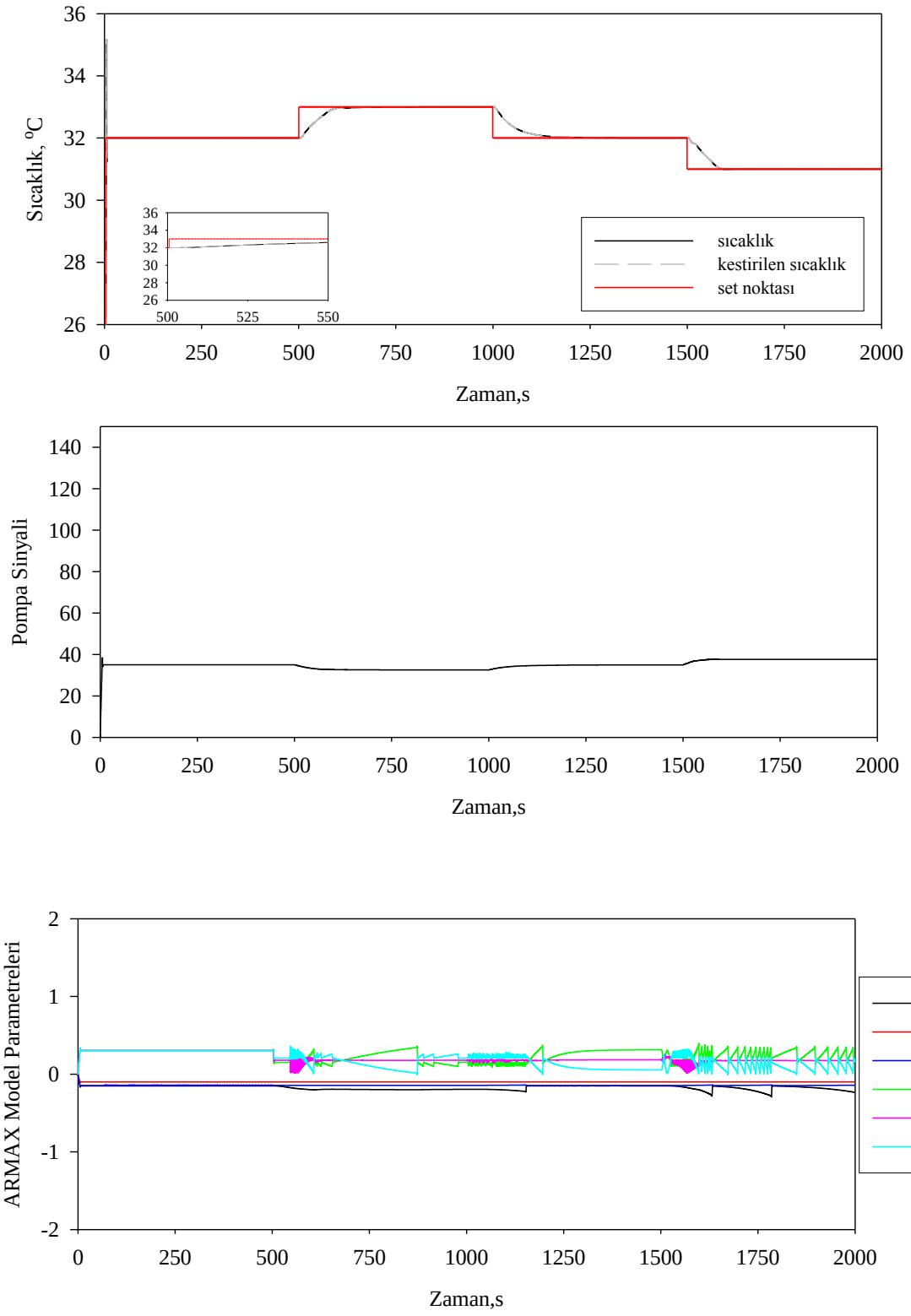
Şekil 9.57 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=2 λ=5)



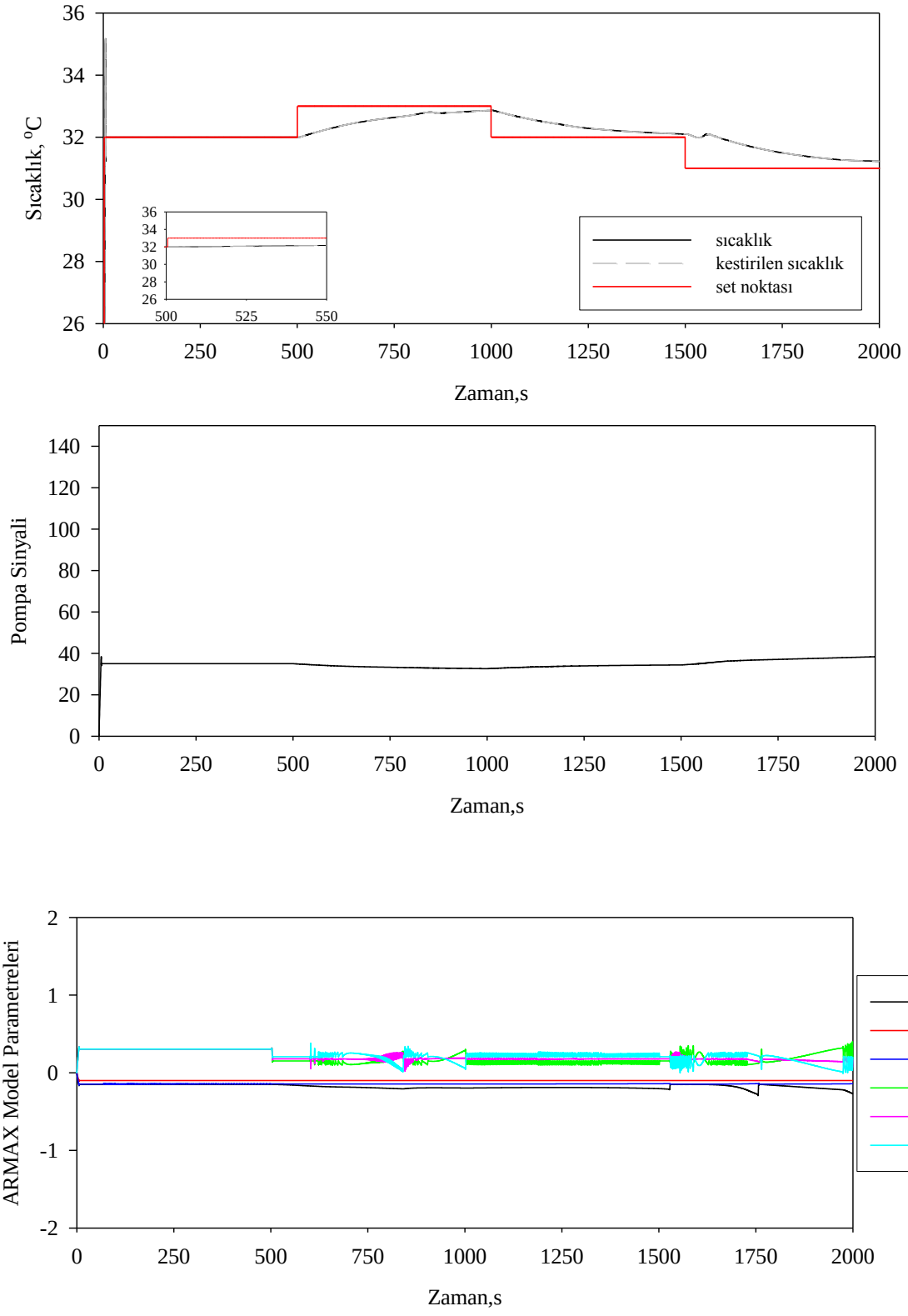
Şekil 9.58 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.005)



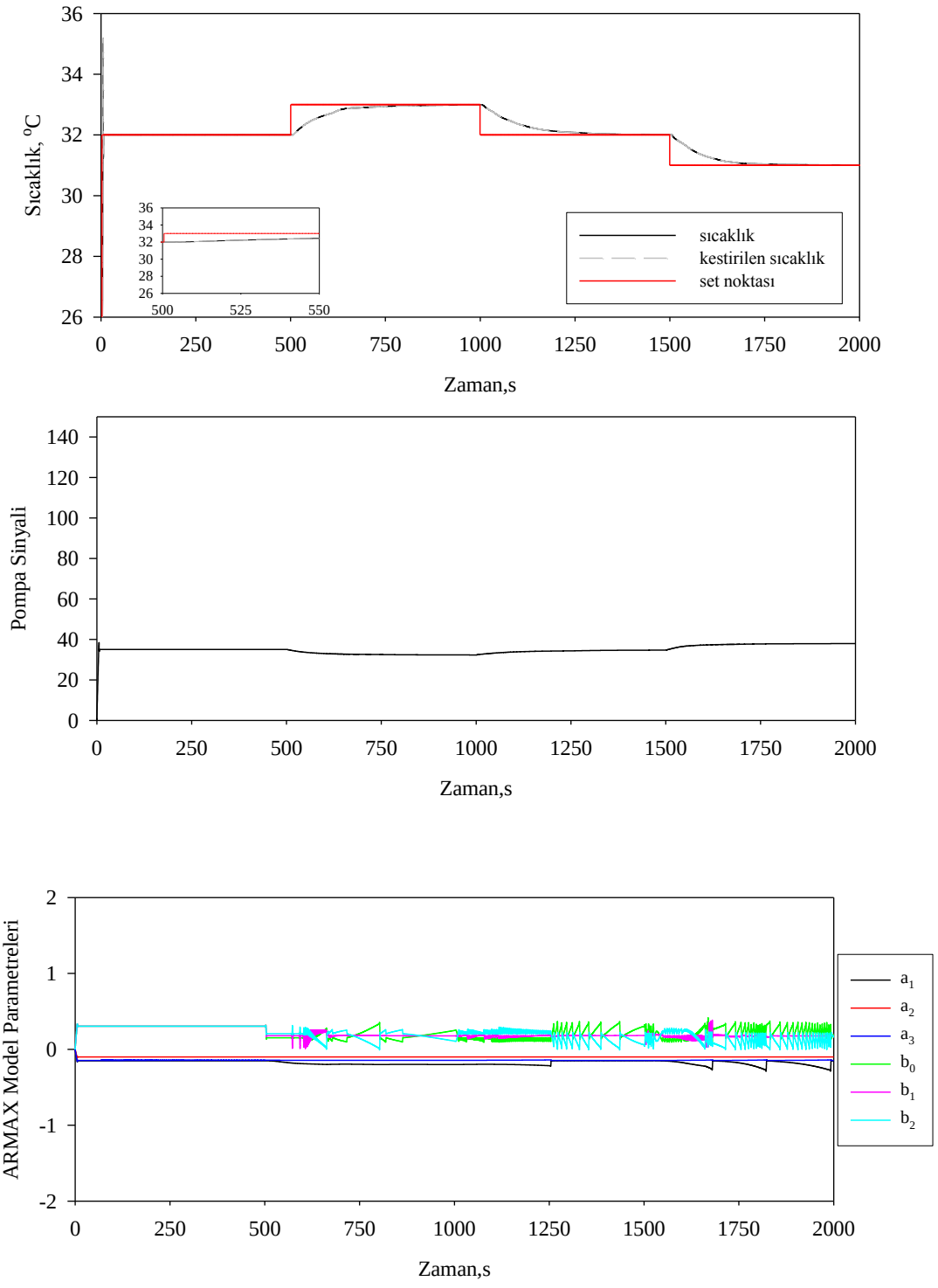
Şekil 9.59 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.05)



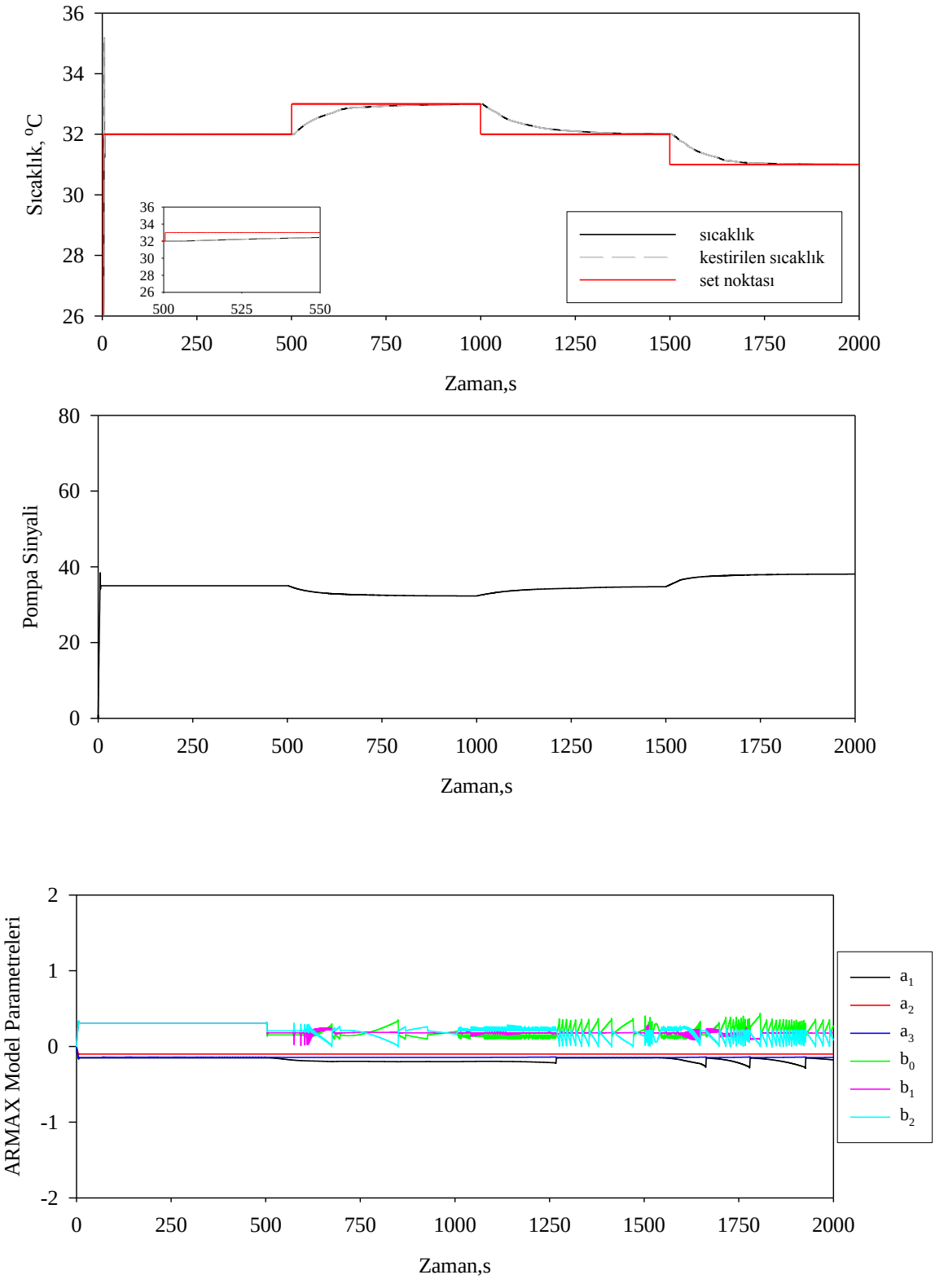
Şekil 9.60 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=0.5)



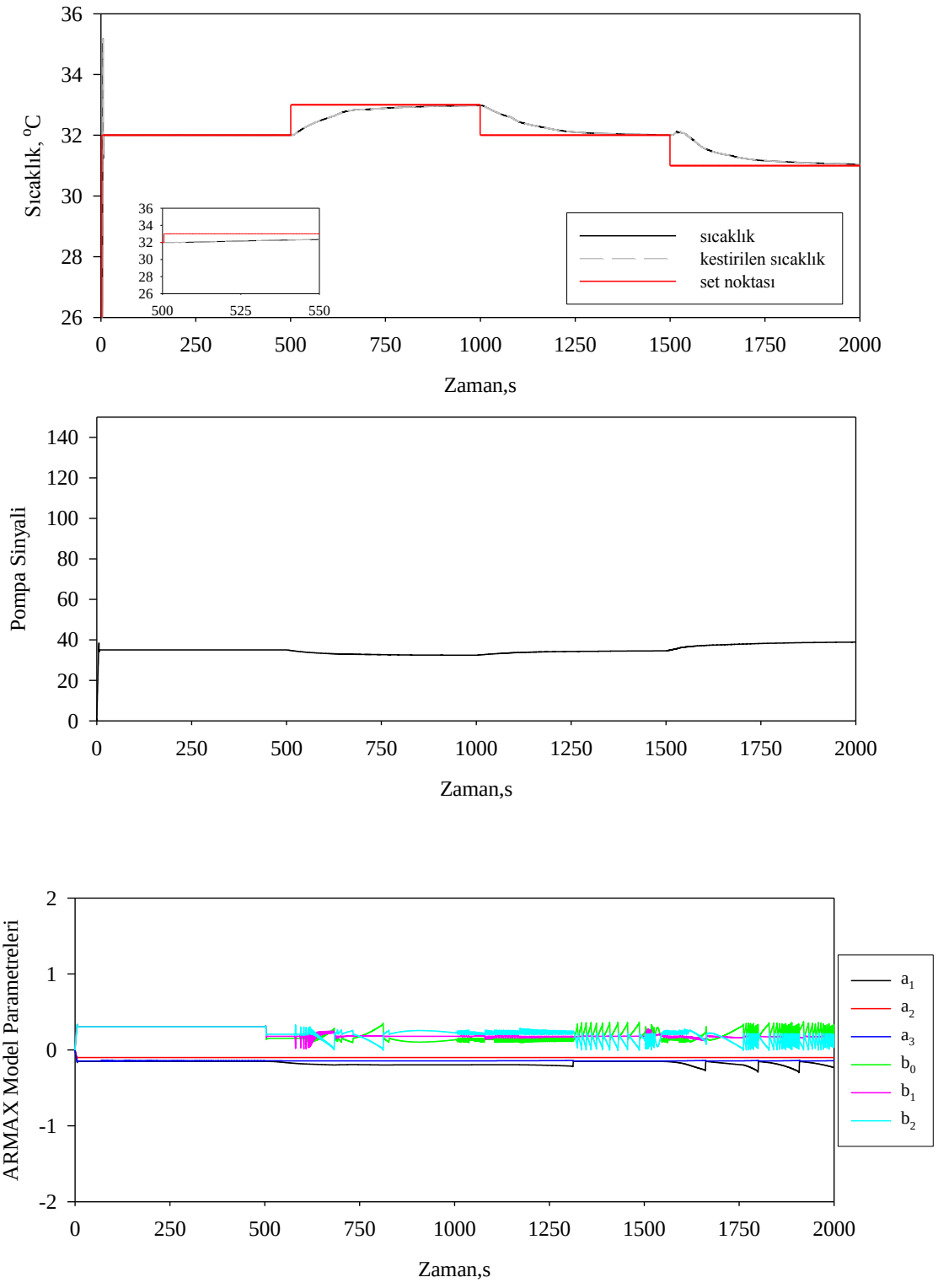
Şekil 9.61 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=6 λ=5)



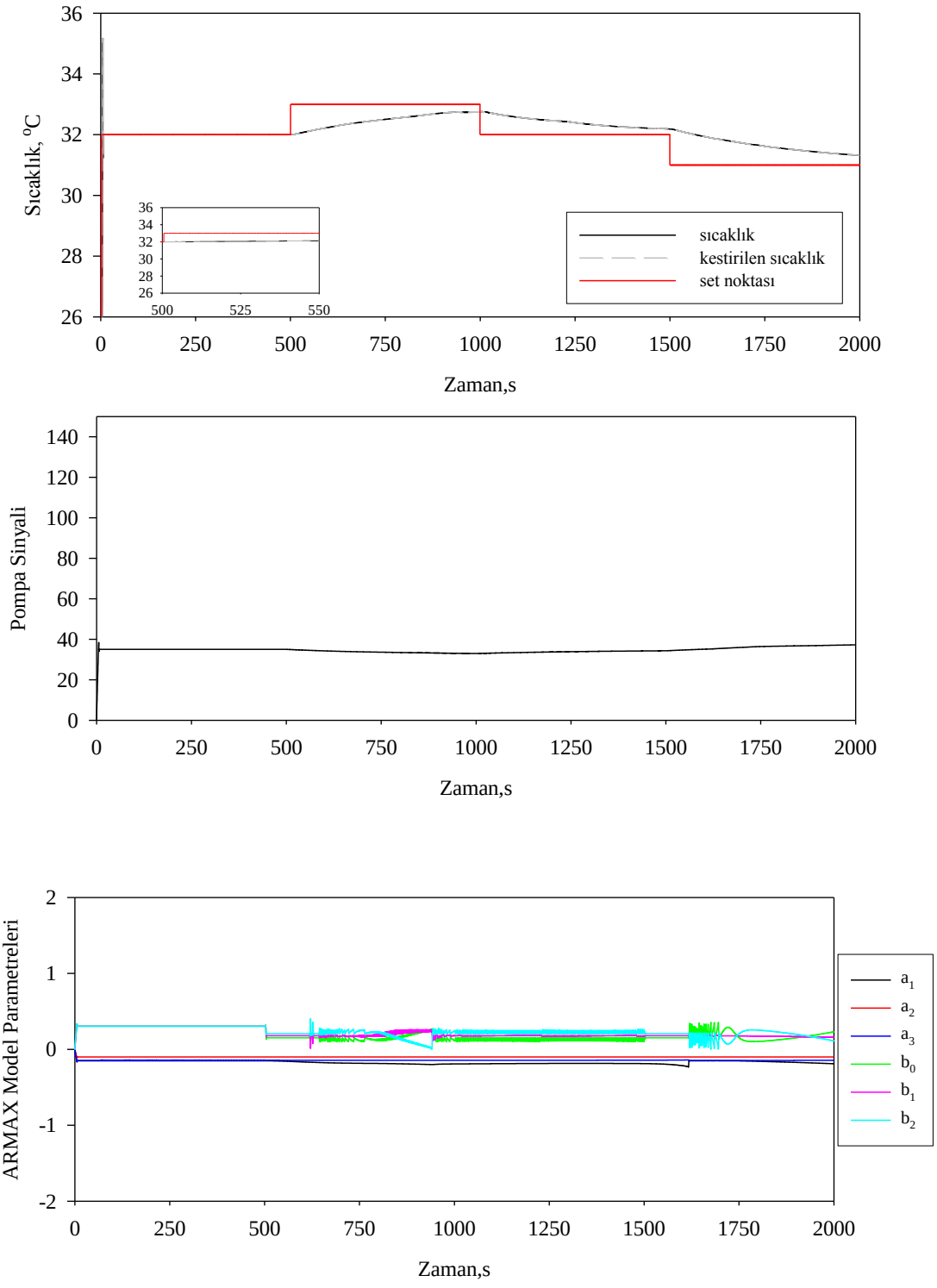
Şekil 9.62 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.005)



Şekil 9.63 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.05)



Şekil 9.64 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=0.5)



Şekil 9.65 Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu (NU=2 N2=10 λ=5)

Biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu çalışmalarında, sistemin ölü zamanına uygun olarak örnekleme zamanı seçildiği için Minimum Tahmin Ufku (Minimum Prediction Horizon), N_1=1, literatürde, basit sistemlerde ve genelde 1 seçildiğinde iyi sonuçlara ulaşıldığı bilinen Kontrol Ufku (Control Horizon), N_U =1 ile N_U =2 olarak seçilmiştir. Diğer kontrol tasarım parametreleri olan Kontrol Ağırlık Faktörü (Control Weighting), λ ve Maksimum Tahmin Ufku (Maximum Prediction Horizon), N_2'nin farklı değerlerinde yapılan çalışmalar sonucunda (Şekil 9.42-9.65) elde edilen IAE ve ISE kontrol performans kriterleri çizelge 9.11' de verilmiştir.

Çizelge 9.11 Farklı kontrol tasarımı parametreleri değerlerinde biyoreaktör sıcaklığının teorik GPC kontrolu performans kriterleri

N_u	N_2	λ	ISE	IAE
1	2	0.005	53371.426	8808.797
		0.05	1856.554	1002.156
		0.1	**27.388**	**42.344**
		0.5	34.908	54.316
		5	306.734	539.374
	6	0.005	103.815	187.333
		0.05	112.375	196.136
		0.5	132.672	239.877
		5	442.253	701.668
	10	0.005	473.296	753.074
		0.05	477.588	757.557
		0.5	479.548	764.459
		5	625.129	891.88
2	2	0.005	53371.426	8808.797
		0.05	1874.745	1004.757
		0.1	**27.388**	**42.344**
		0.5	34.908	54.316
		5	306.734	539.374
	6	0.005	49.414	77.311
		0.05	53.450	84.856
		0.5	88.119	143.581
		5	421.556	682.02
	10	0.005	141.523	267.062
		0.05	150.196	282.298
		0.5	224.568	389.251
		5	517.194	804.107

9.2.2.2 Deneysel GPC kontrol sonuçları

Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde artan biyoreaktör sıcaklığını optimum değerinde kontrol etmek ve azalan çözünmüş oksijen derişiminin kritik değerin üzerinde kontrol ederek; ürün seçimliliğini gerçekleştirmek ve verimliliğini arttırmak amacıyla gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan GPC kontrol algoritması deneysel çalışmalarda SISO ve MIMO kontrol olarak uygulanmıştır.

Teorik olarak, sisteme en uygun kontrol tasarım parametreleri bulunduktan sonra deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sıvı besi ortamında ve ekmek mayası üretilmek amacıyla mikroorganizmalı ortamlarda SISO ve MIMO deneyleri yapılmıştır.

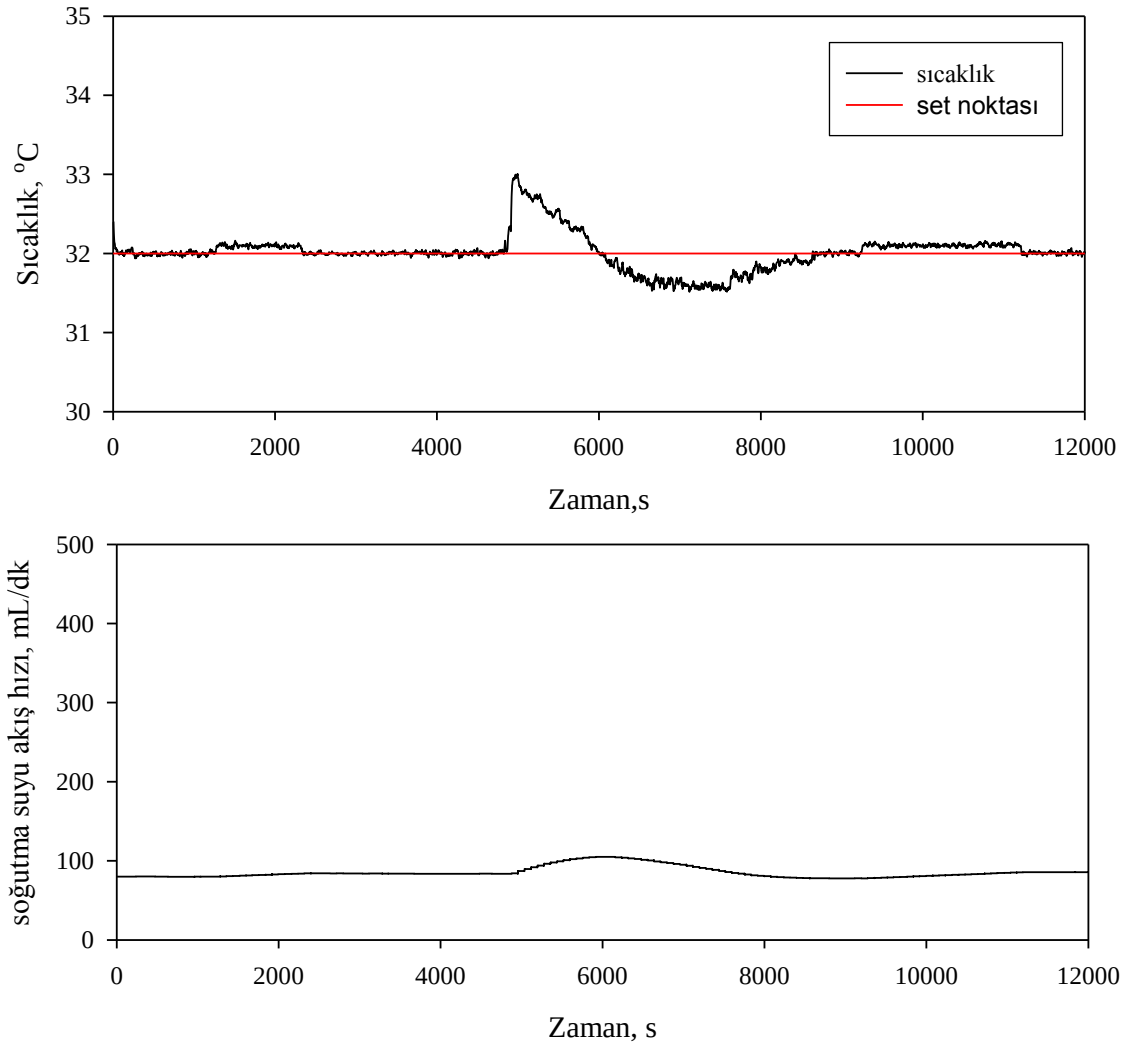
9.2.2.2.1 Tek girdili - tek çıktılı (SISO) deneysel GPC kontrol sonuçları

SISO GPC kontrol çalışmaları hem biyoreaktör sıcaklığı hem de çözünmüş oksijen derişimini kontrol etmek amacıyla sıvı besi ortamında gerçekleştirilmiştir. Farklı etkiler altında sistemin kontrol performansları incelenmiştir.

SISO GPC biyoreaktör sıcaklığı kontrolu deneyleri için sistem, Çizelge 9.12'de verilen işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra kapalı hatta alınmıştır. Ekmek mayası için optimum değer olan 32°C'de sabit set noktasında kontrol gerçekleştirildikten sonra sisteme 1°C'lik yük etkisi verilmiş ve GPC kontrol algoritmasının sistemi çok iyi kontrol ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu deneye ait sonuçlar Şekil 9.62'de verilmiştir.

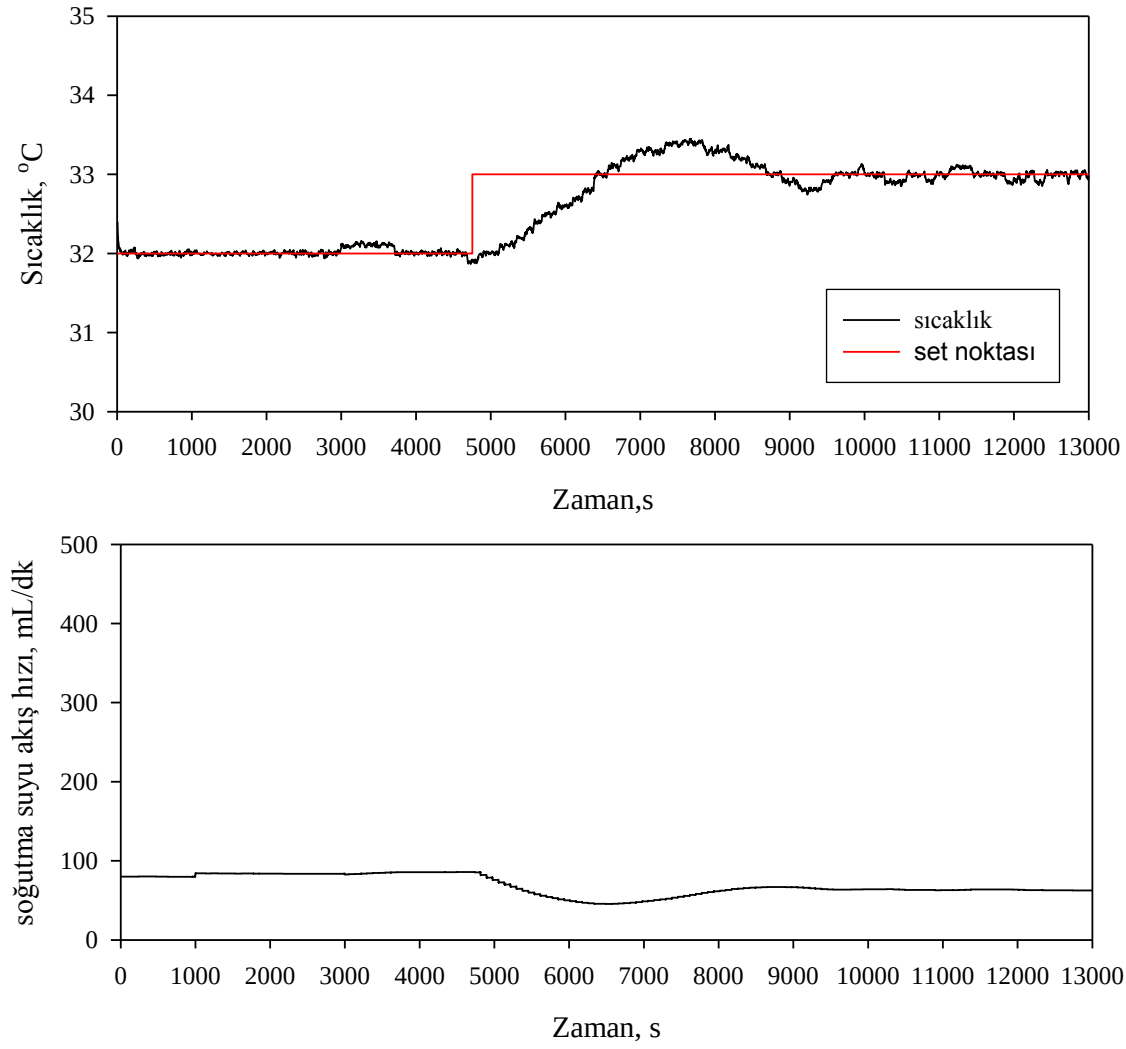
Çizelge 9.12 Sıvı besi ortamında sıcaklığın SISO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı,^{O}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Hava akış hızı,L/dk
26	600	5	178	1



Şekil 9.66 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen sıcaklığın sabit set noktasında kontrol edildiği SISO GPC kontrol sonuçları

Sıvı besi ortamında biyoreaktör sıcaklığının SISO GPC kontroluna ait ikinci çalışmada, sistem çizelge 9.12'deki işletim koşullarında yatışkın hale getirilmiş ve 32°C'de set noktasına 1°C'lik pozitif etki verilmiştir. GPC kontrol algoritması soğutma suyu akış hızını azaltarak sistemin yeni set noktasına gelmesini sağlamıştır. Bu çalışmaya ait sonuçlar şekil 9.67'de verilmiştir.

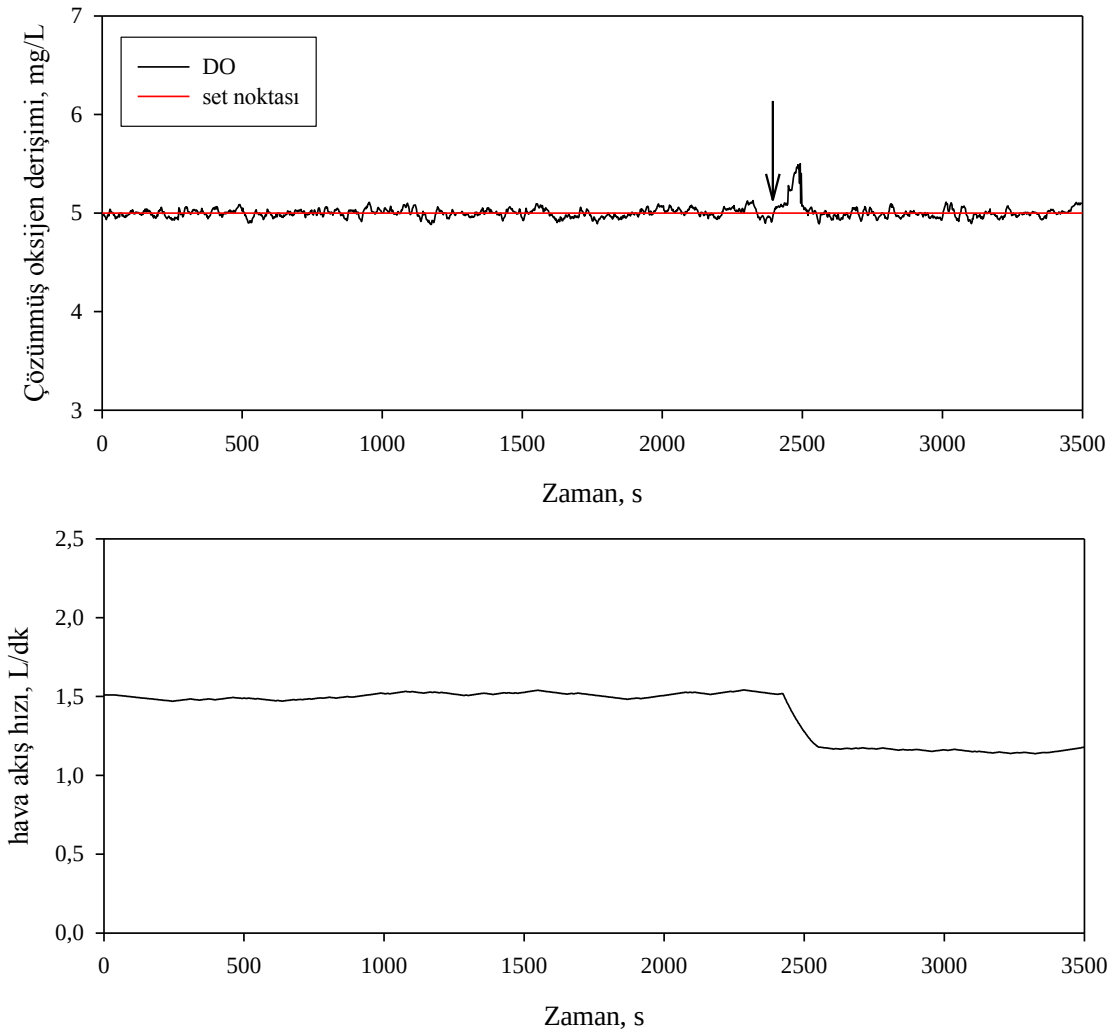


Şekil 9.67 Sıvı besi ortamında set noktasına basamak etki verildiğinde sıcaklığın SISO GPC kontrol sonuçları

Sıvı besi ortamında SISO GPC kontrol deneyleri tamamlandıktan sonra çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sistem, çizelge 9.13'deki işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra kontrol algoritması çalıştırılmıştır. GPC kontrol algoritmasının istenen set noktasında çözünmüş oksijen derişimini iyi bir şekilde kontrol ettiği gözlemlendikten sonra azot akış hızı azaltarak sisteme yük etkisi verilmiştir. Şekil 9.68'den de görülebileceği gibi sisteme online bağlı bilgisayardaki algoritma, ayarlanabilen değişken olan hava akış hızını azaltarak yük etkisi altında bile çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrolunu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

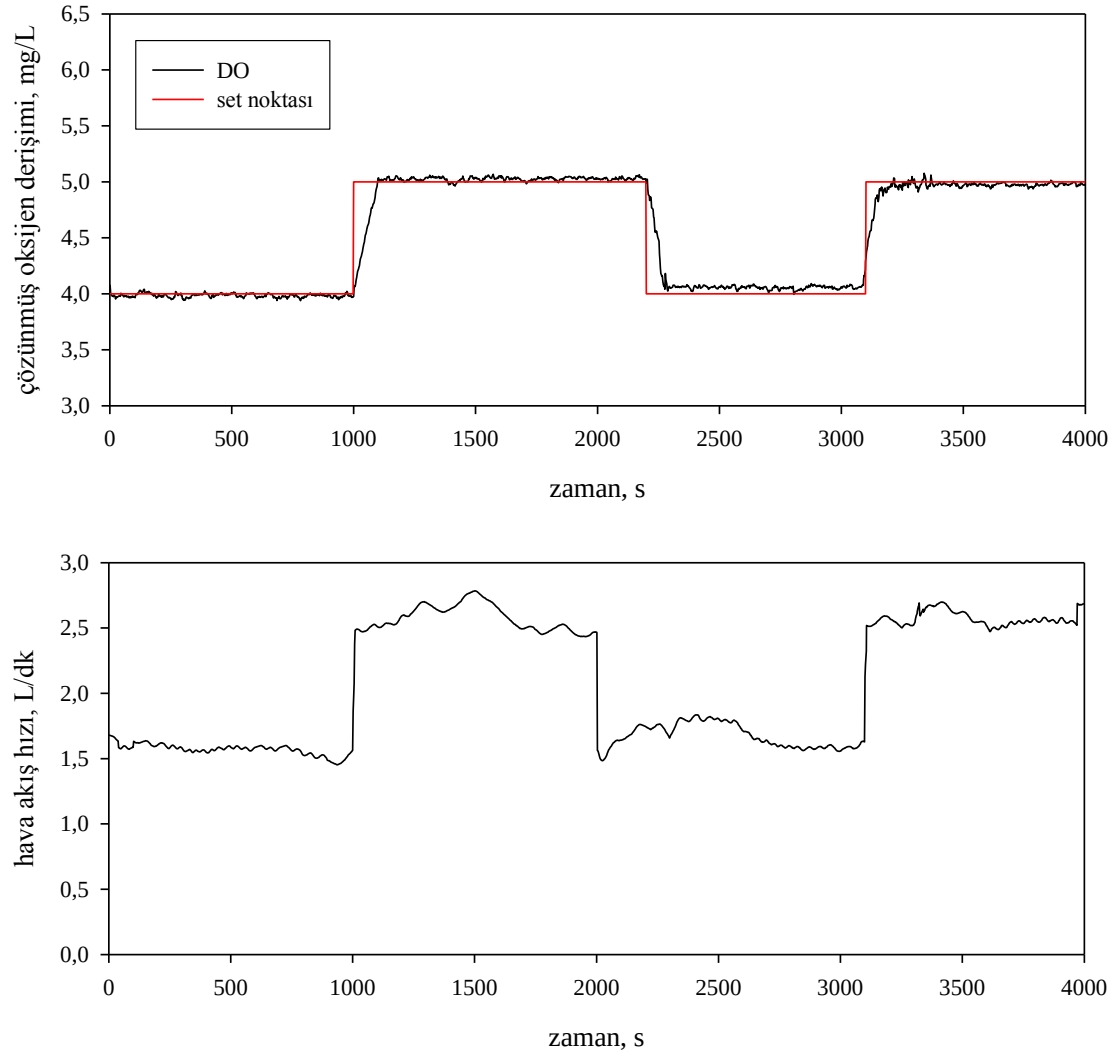
Çizelge 9.13 Sıvı besi ortamında çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı,^{O}C	Karıştırma hızı,devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Soğutma suyu akış hızı,mL/dk	N_2 akış hızı,L/dk
26	600	5	178	62	1.2



Şekil 9.68 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen çözünmüş oksijen derişiminin sabit set noktasında kontrol edildiği SISO GPC kontrol sonuçları

Çözünmüş oksijen derişiminin, yük etkisi altında bile olsa sabit set noktasında SISO GPC kontrolu başarıyla kontrol ettikten sonra set noktası değişimlerindeki performansını belirlemek için deney gerçekleştirilmiştir. Sistem çizelge 9.13'deki işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra kapalı hatta alınmıştır. Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen deneyde set noktasına kare dalga etki verilmiştir. Şekil 9.65'den de görülebileceği gibi, GPC kontrol algoritmasının set noktası değişimine göre ayarlanabilen değişken olan hava akış hızını arttırıp/azaltarak set noktalarını çok takip ederek çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrolu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9.69 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen set noktasına kare dalga etki verildiğinde çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrol sonuçları

9.2.2.2.2 Çok girdili - çok çıktılı (MIMO) deneysel GPC kontrol sonuçları

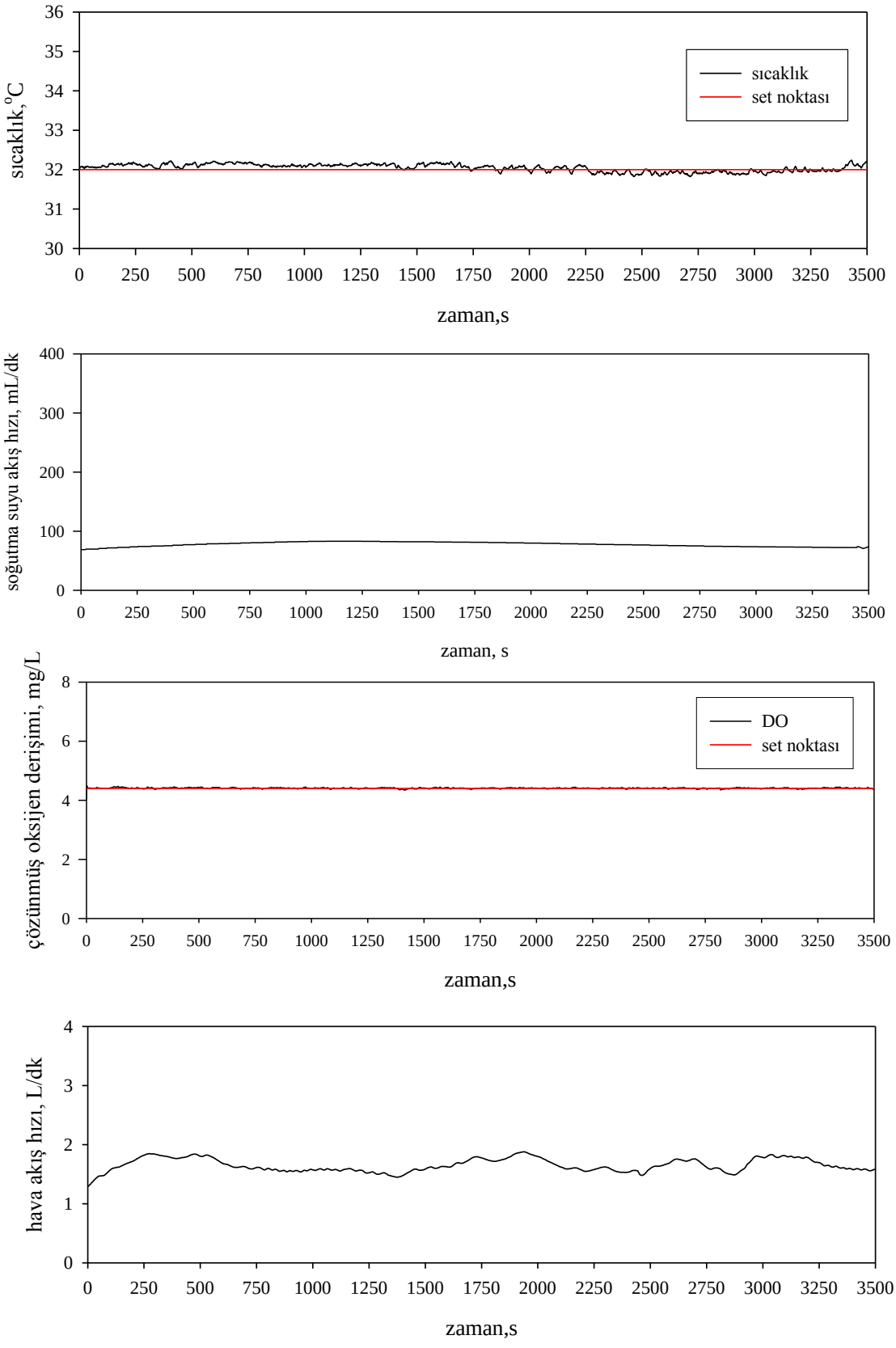
Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde ürün verimliliği nedeniyle biyotepkime ortamı sıcaklığının, ürün seçimliliği ve verimliliği nedeniyle de çözünmüş oksijen derişiminin kontrolunu gerçekleştirmek olan doktora tezinin bu bölümünde, GPC kontrol algoritması kullanılarak hem sıcaklığın hem de çözünmüş oksijen derişiminin kontrolu gerçekleştirilmiştir.

Önceki bölümlerde anlatılan bilgiler ışığında, yapılan teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak MIMO GPC kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalara ilk olarak sıvı besi ortamında yapılan MIMO GPC kontrol çalışmaları ile başlanmıştır. Sistem, çizelge 9.14'de verilen işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra kapalı hatta alınmıştır.

Çizelge 9.14 Sıvı besi ortamında MIMO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları

Soğutma suyu sıcaklığı,^{o}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	N_2 akış hızı,L/dk
26	600	5	178	1.2

Şekil 9.70'den de görülebileceği gibi soğutma suyu akış hızı ile sıcaklığın, hava akış hızı ile çözünmüş oksijen derişiminin sıvı besi ortamında MIMO GPC kontrolu çok başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi MIMO GPC deneylerinde MIMO PID deneylerinden farklı olarak etkileşim önleyici kullanmaya gerek kalmamıştır.



Şekil 9.70 Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen MIMO GPC kontrol sonuçları

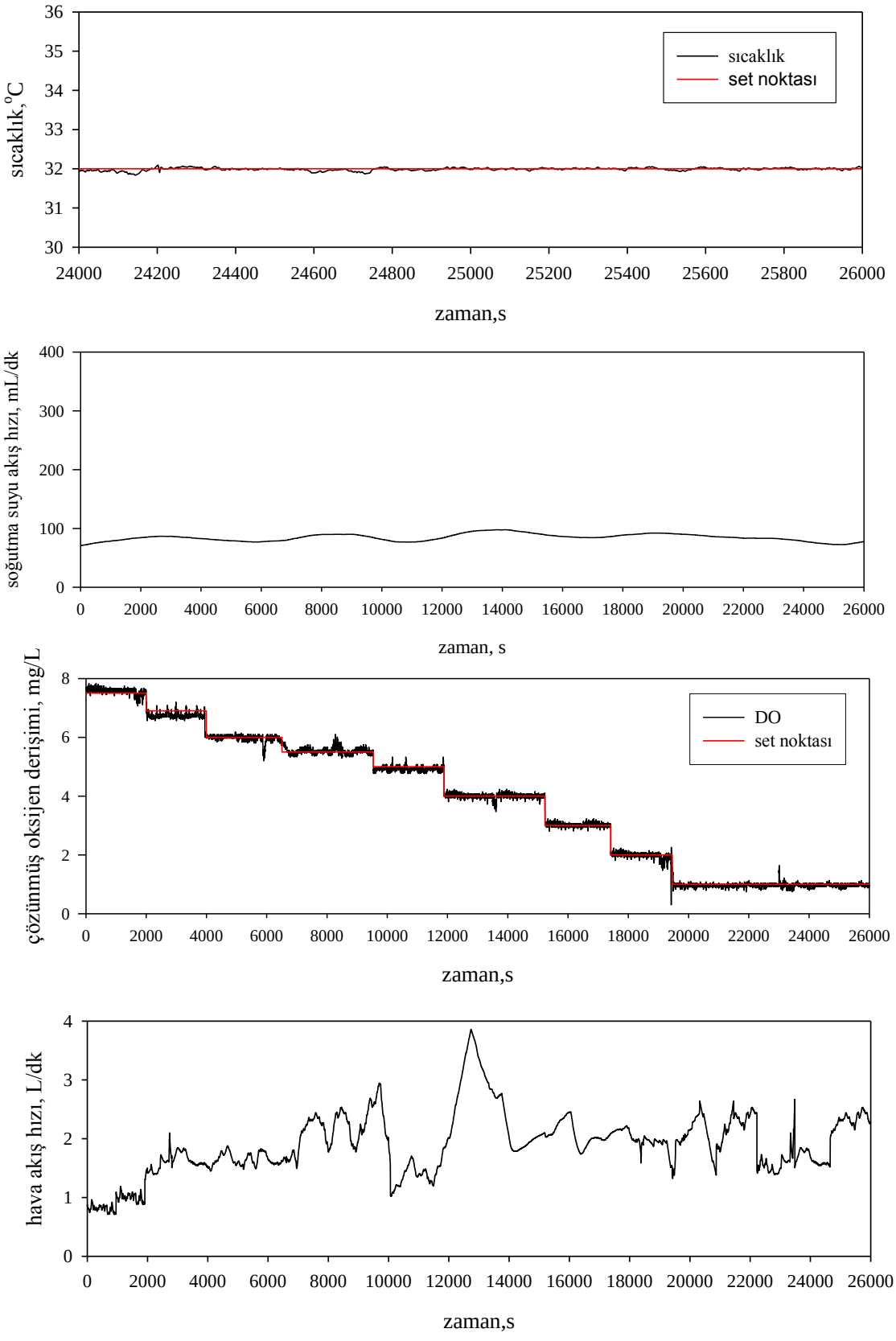
Doktora tezinin son çalışması olarak ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO GPC kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamaya kadar yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda sisteme uygun kontrol tasarım parametreleri ve işletim koşulları belirlenmiştir. Ekmek mayası üretilmek amacıyla yapılan MIMO GPC kontrol deneylerinde çizelge 9.15'de işletim koşullarında sistem yatışkın hale getirilmiştir. *S. cerevisiae* mikroorganizması ölçek büyütmenin son basamağı olan biyoreaktöre aktarıldıktan sonra sistem kapalı hatta alınmıştır. Biyoreaktör sıcaklığı, ekmek mayası için optimum sıcaklık olan 32°C'de, çözünmüş oksijen derişimi de kritik değer olan 1 mg/L üzerinde kontrol edilmiştir. Çözünmüş oksijen derişimi biyotepkime süresince basamak halinde verilen set noktasını başarılı bir şekilde takip etmiştir.

Çizelge 9.15 Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği mikroorganizmalı ortamda MIMO GPC kontrol deneylerinin işletim koşulları

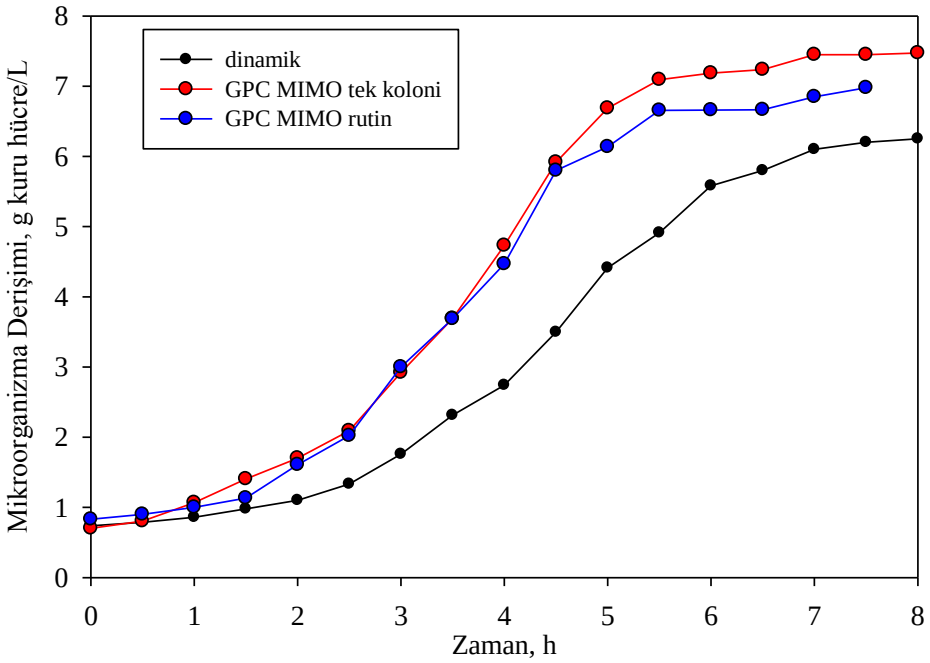
Soğutma suyu sıcaklığı,^{o}C	Karıştırma hızı, devir/dk	pH	Sisteme verilen ısı, cal/s	Optimum çoğalma sıcaklığı, ^{o}C
26	600	5	178	32

Ekmek mayası üretilen sıcaklığın ve çözünmüş oksijen derişiminin MIMO GPC kontrolunun gerçekleştirildiği deneylerde şekil 9.71'den de görüldüğü gibi etkileşim önleyiciye gerek duyulmamıştır. Biyotepkime süresinde biyoreaktörden örnekler alınmış ve UV spektrofotometrede ölçülmüş ve EK 5'te anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. MIMO GPC kontrol deneyinde mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi şekil 9.72'de verilmiştir.

Deneyler sonunda istenmeyen yan ürün olan etanol derişimi etanol ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve EK 8'de verilen kalibrasyon doğrusu kullanılarak etanol derişimleri ölçülmüştür. MIMO GPC kontrol deneylerinin sonunda elde edilen etanol derişimleri %1,083 (en az) -%1,35(en çok) v/v olarak ölçülmüştür.



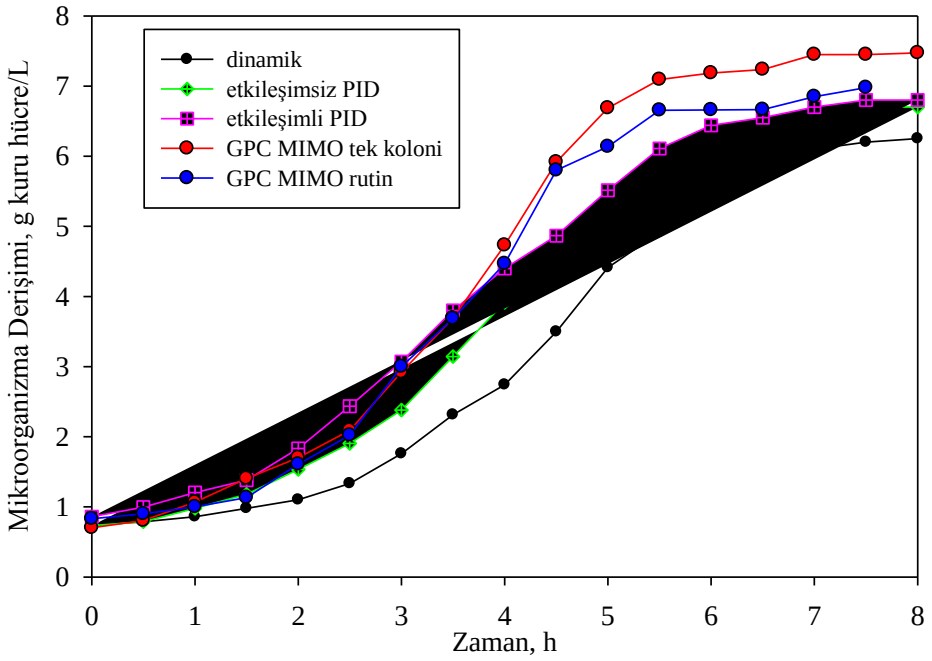
Şekil 9.71 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO GPC kontrol sonuçları



Şekil 9.72 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO GPC kontrol uygulandığında mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi

Şekil 9.72'den görülebileceği gibi biyotepkime ortamının sıcaklığının ve çözünmüş oksijen derişiminin eşanlı kontrol edilmesi ürün verimliliğini arttırmaktadır. Biyoreaktörde ekmek mayası üretimi yapılmak istenildiğinde ölçek büyütme basamaklarına geçmeden önce tek koloni ekimi (bkz Bölüm 8) yapılması ürün verimini arttırdığı şekil 9.72'den görülmektedir.

Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde, ürün verimliliği ve seçimliliği açısından önemli işletim parametreleri olan sıcaklık ve çözünmüş oksijen derişiminin çok girdili-çok çıktılı kontrolunun hem PID kontrol hem de GPC kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirildiği deneyler sonucunda elde edilen mikroorganizma derişimleri şekil 9.73'de verilmiştir.



Şekil 9.73 Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde MIMO PID ve MIMO GPC kontrol uygulandığında mikroorganizma derişiminin zamanla değişimi

10. TARTIŞMA YORUM

Ekmek mayası olarak da bilinen *S. cerevisiae* mikroorganizmasının çoğalması üzerinde sıcaklığın ve çözünmüş oksijen derişiminin önemi büyüktür. *S. cerevisiae* üretimi sırasında ekzotermik olarak gerçekleşen tepkime yüzünden açığa çıkan ısı, çoğalma ortamı sıcaklığının artmasına yol açar. Bu sıcaklık artışı küçük olmasına rağmen, biyoreaktörde mikroorganizmanın ürün veriminin ve üretim hızının düşmesine yol açar. Ayrıca havalı koşullarda, çoğalma süresince mikroorganizmaların artması nedeniyle ortamdaki çözünmüş oksijen derişimi kritik değerin altına düşmektedir. Bu düşüş fakültatif bir mikroorganizma olan ekmek mayasının ürün seçimliliğini etkilemektedir. Çözünmüş oksijen derişiminin kritik değerinin altına düşmesi ortamda maya hücreleri yerine etanol üretilmeye başlanması anlamına gelmektedir. Amaç ekmek mayası üretimi olduğu için bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenlerden dolayı biyotepkime ortamının sıcaklığının ve çözünmüş oksijen derişiminin kontrolu gereklidir.

Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörde, biyotepkime ortamının artan sıcaklığını ve azalan çözünmüş oksijen derişimini kontrol ederek ürün verimliliğini ve seçimliliğini arttırmak amacıyla hem dinamik hem de kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bir sistemi kontrol edebilmek için o sistemin giriş değişkenlerini, çıkış değişkenlerini, giriş ve çıkış değişkenlerinin birbirleri ile etkileşimlerinin çok iyi tanınması gerektiği için çalışmalara ilk olarak dinamik (açık hat) çalışmalarla başlanmıştır. Dinamik çalışmalara, kontrol performansı üzerinde etkisi çok fazla olan giriş değişkenlerinin doğru okunması amacıyla yapılan giriş ve çıkış değişkenlerinin kalibrasyonu ve filtre çalışmaları ile başlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda sistemde gürültünün fazla olduğu ve deneyler sırasında, sistemin yer aldığı laboratuvarda herhangi bir cihazın (bu bir bilgisayar da olabilmektedir) çalıştırılması veya kapatılması nedeniyle oluşan elektriksel değişikliklerin sistemi çok fazla olumsuz etkilediğinin tespit edilmiştir. Bu nedenle çözünmüş oksijen derişimin filtre çalışmalarında, birinci mertebeden bir filtrenin kullanımı gürültüleri yok etmek için yeterli olmuştur. Deneysel filtre çalışmaları sonucunda çözünmüş oksijen derişimin hareketini daha iyi görmek amacıyla birinci mertebe filtre katsayısı olarak 10 kullanılmasına karar verilmiştir.

Çok girdili-çok çıktılı kontrol sırasında giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleri üzerindeki etkileri kontrol performansını etkileyebilmektedir. Sistemin ayar değişkeni olarak seçilen giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu ve aralarındaki ilişkileri bulmak amacıyla Bağıl Kazanç Analizi (RGA) gerçekleştirilmiştir. Sistem farklı işletim koşullarında yatışkın hale getirilerek giriş değişkenleri olan hava akış hızının ve soğutma suyu akış hızının çıkış değişkenleri olan çözünmüş oksijen derişimin ve sıcaklığın üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bilindiği üzere giriş değişkenlerinden biri olan soğutma suyu akış hızı ile çıkış değişkenlerinden biri olan sıcaklık, diğer giriş değişkeni olan hava akış hızı ile diğer çıkış değişkeni olan çözünmüş oksijen derişimi arasında doğrudan etkilerken dolaylı olarak da diğer çıkış değişkeni üzerine etki etmektedir. Örneğin; hava akış hızı arttıkça havanın sıcaklığı nedeniyle biyotepkime ortamı sıcaklığı arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda iki giriş değişkenin de iki çıkış değişkeni üzerine etkileri olduğu gözlemlenmiş ve her bir etkinin kazançları hesaplanmıştır. RGA analizi ile bulunan kazanç değerleri kullanılarak deneysel olarak etkileşim önleyici (decoupler) katsayıları D1=0.2 ve D2= 6.3 olarak bulunmuştur.

Soğutma suyu akış hızı-biyoreaktör sıcaklığı dinamik deneylerinde basamak etki deneyleriyle sistemin proses reaksiyon eğrisi çizilmiş ve soğutma suyu akış hızı-sıcaklık etkileşiminde sistemin ölü zamanının 300s, yükselme zamanının 2000s olduğu ve hava akış hızı-çözünmüş oksijen derişimi sistemine göre prosesin daha yavaş olduğu bulunmuştur.

Bir sistemdeki kontrol performansı ile sistemin tanımlanması arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle hava akış hızı ile çözünmüş oksijen derişimi ve soğutma suyu akış hızı ile sıcaklık arasındaki sistem modelleri belirlemek amacıyla teorik ve deneysel olarak sistem tanımlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistem tanımlama için teorik çalışmalarda MATLAB'ta, deneysel çalışmalarda Visual Basic'te yazılan YEKK yöntemini kullanan program kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sistemin giriş değişkeni hava akış hızı, çıkış değişkeni çözünmüş oksijen derişimi olmak üzere sistemin ARMAX model parametrelerinin, A ve B polinomlarının derecesinin sırası ile 3. ve 2. mertebeden modele uyduğu bulunmuştur. Yapılan sistem tanımlama

çalışmalarında kestirilen değer ile gerçek değerin neredeyse birbirine eşit olacak şekilde bulunması tespit edilen modelin sistemi ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesidir. Benzer çalışma diğer giriş değişkeni soğutma suyu akış hızı ile çıkış değişkeni biyoreaktör sıcaklığı olmak üzere ARMAX modelin A ve B polinomlarına göre ikinci dereceden bir modele uyduğu bulunmuştur. Soğutma suyu akış hızına verilen farklı etkiler sonucunda sistemin model parametreleri bulunmuştur. Pompa akış hızına kare dalga etki verilmesi durumunda ARMAX model parametreleri; a_1= -0.1578, a_2= -0.1458, b_0=0.1865, b_1=0.2195, b_2=0.2401 ve a_1= -0.1568, a_2=-0.1449, b_0=0.1851, b_1=0.2182, b_2=0.2387, pompa akış hızına ternary etki verilmesi durumunda da a_1=-0.1833, a_2=-0.2160, b_0=0.2233, b_1=0.24680, b_2=0.3065 olarak bulunmuştur. Sistemin çıkış değişkeni olan biyoreaktör sıcaklığı ile ARMAX modelden çıkan kestirilen sıcaklık değerlerinin neredeyse aynı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Dinamik çalışmalar sonucunda sistemin özellikleri belirlendikten sonra kontrol (kapalı hat) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çözünmüş oksijen derişimini kontrol etmek için ayarlanabilen değişken olarak hava akış hızı, biyotepkime ortamı sıcaklığının kontrolu için de soğutma suyu akış hızı ayarlanabilen değişken olarak seçilmiştir. Yapılan dinamik çalışmalar sonucunda çözünmüş oksijen derişimi-hava akış hızı ve biyotepkime sıcaklığı-soğutma suyu akış hızı için PID Kontrol parametreleri Cohen-Coon parametre ayarlama yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. PID kontrol yöntemi, sıvı besi ortamı ile ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği mikroorganizmalı ortamı olmak üzere iki farklı durumda SISO kontrol ve MIMO kontrol olarak sisteme uygulanmıştır.

Sıvı besi ortamında sistem sıcaklık kontrolü deneylerine uygun olarak yatışkın hale getirildikten sonra sabit set noktasında, yük etkisi altında ve set noktasına etki verilerek ekmek mayası için optimum çoğalma sıcaklığı olan 32°C'de kontrol edilmiştir. Sabit set noktasında yapılan sıcaklığın SISO PID kontrol deneyinde sistem klasik PID hareketini yaptıktan yaklaşık 5000 s sonra; 1°C'lik yük etkisi verilmiş ve yaklaşık 3000 s sonra set noktasına oturabilmiştir. Set noktasına basamak etki verilerek yapılan deneyde ise sistemin ikinci etkiden sonra salınımlı olarak kontrolu gerçekleştirebilmiştir. Bunun nedeni PID kontrol parametrelerinin 32°C'ye göre hesaplanmış olması olarak gösterilebilir.

SISO PID kontrol çalışmalarının ikinci bölümünde sıvı besi ortamında sistem çözünmüş oksijen için yatışkın hale getirildikten sonra sabit set noktasında, yük etkisi altında ve set noktasına etki verilerek gerçekleştirilmiştir. Ekmek mayası üretimi sırasında çözünmüş oksijen derişimi 7 mg/L'den 0 mg/L'ye kadar zamanla değiştiği için deneyler 4 ve 5 mg/L set noktalarında gerçekleştirilmiştir. Sabit set noktasında azot akış hızını azaltarak verilen yük etkisi altında ve set noktasına kare etki verilmesi durumlarında, PID kontrol edici hava akış hızını arttırıp/azaltarak çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrolunu başarıyla sağlamıştır.

PID kontrol parametrelerinin uygunluğu SISO deneyleri ile belirlendikten sonra sıvı besi ortamında MIMO PID kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sistem belirlenen işletim koşullarında yatışkın hale getirildikten sonra kapalı hatta alınmış ve sıcaklık 32 ^{o}C'de, çözünmüş oksijen derişiminin 4 mg/L olduğu set noktalarında kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan MIMO PID kontrol deneylerinde sistem, çözünmüş oksijen derişimini başarıyla kontrol edebilmişken biyoreaktör sıcaklığını ancak yaklaşık 0.5^{o}C ofset vererek kontrol edebilmiştir. Bu nedenle etkileşim önleyici kullanımına karar verilmiştir.

Sıvı besi ortamında yapılan MIMO PID kontrol deneyleri ile PID parametrelerinin uygunluğu ve etkileşim önleyici katsayıları tespit edildikten sonra ekmek mayası üretmek amacıyla mikroorganizmalı MIMO PID kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikroorganizmalı PID kontrol deneyleri hem etkileşim önleyici katsayıları kullanılarak hem de kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Etkileşim önleyici katsayıları kullanıldığı durumda kontrol edilen değişkenlerin özellikle biyotepkime ortamı sıcaklığının daha az salınımlı olduğu gözlemlenmiştir. Ürün verimliliği olarak sonuçlar değerlendirilecek olursa; etkileşim önleyici katsayıları kullanıldığı ve kullanılmadığı durumda mikroorganizma çoğalmasında çok fazla fark olmasa da dinamik deney ile karşılaştırıldıklarında kontrolun ne kadar gerekli olduğu açıkça görülmektedir.

Ekmek mayası üretiminin gerçekleştirildiği kesikli biyoreaktörde sıcaklığın ve çözünmüş oksijen derişiminin kontrolu amacıyla yapılan SISO ve MIMO PID kontrol

deneylerinden sonra gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan GPC kontrol yönteminin teorik ve deneysel olmak üzere SISO ve MIMO kontrolu yapılmıştır. Teorik SISO GPC kontrol çalışmaları, model parametreleri her bir iterasyonda tekrar hesaplayan bir program ile gerçekleştirilmiştir. En iyi kontrol performansını elde etmek amacıyla farklı kontrol tasarım parametreleri denenmiştir.

Çözünmüş oksijen derişiminin teorik SISO GPC kontrolu çalışmalarında, ölü zamanına uygun olarak iterasyon adımı belirlendiği için Minimum Tahmin Ufku (Minimum Prediction Horizon) N_1=1, genelde literatürde 1 seçildiğinde iyi sonuçlara ulaşıldığı bilinen Kontrol Ufku (Control Horizon), N_U=1 olarak seçilmiştir. GPC kontrol yönteminin diğer kontrol tasarım parametreleri olan Kontrol Ağırlık Faktörü (Control Weighting), λ ile Maksimum Tahmin Ufku (Maximum Prediction Horizon), N_2'nin ve gürültünün farklı değerlerinde yapılan çalışmalar sonucunda en iyi tasarım parametreleri bulunmuştur. Daha önce sistem tanımlama ile belirlenen ARMAX model parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda en iyi kontrol performansı sağlayan GPC kontrol parametrelerinin N_1=1, N_U=1, N_2=2 ve λ=0.001 olduğu belirlenmiştir. Gerçek sistemde, gürültünün fazla olması nedeniyle çözünmüş oksijen derişiminin teorik SISO GPC kontrol benzetiminde de gürültü kullanılmıştır. En iyi kontrol performansı elde edildiği durumda kontrol performans kriterleri ISE=159.960 ve IAE=397.204 olarak hesaplanmıştır.

Biyoreaktör sıcaklığının teorik SISO GPC kontrolu çalışmalarında, N_1=1 seçilmiştir. Sıcaklık prosesi yavaş bir proses olduğu için N_U'nun iki farklı değerinde, N_2'nin üç farklı değerinde ve λ'nın beş farklı değerinde denemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda performans kriterlerine bakıldığında en iyi kontrolün N_1=1, N_U=1, N_2=2 ve λ=0.1 ile N_1=1, N_U=1, N_2=2 ve λ=0.5 olduğu belirlenmiştir. Bu seçimlerdeki performans kriterleri sırasıyla ISE=27.388 ve IAE=42.344, ISE=34.908 ve IAE= 54.316 olarak hesaplanmıştır. Teorik SISO GPC sıcaklık çalışmaları sonucunda farklı kombinasyonların deneysel çalışma açısından uygun olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Teorik SISO GPC kontrol çalışmaları sonucunda, kontrol performasının en iyi olduğu kontrol tasarım parametrelerini deneysel SISO GPC kontrol deneylerinde kullanarak çalışmalara başlanmıştır. Sıvı besi ortamında gerçekleştirilen biyoreaktör sıcaklığının SISO GPC kontrolunda ekmek mayası için optimum çoğalma sıcaklığı olan 32°C'de sabit set noktası ile yük etkisi altında ve set noktasına basamak etki verilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda ayarlanabilen değişken olan soğutma suyu akış hızı ile biyoreaktör sıcaklığının deneysel SISO GPC kontrolu başarılı şekilde yapılmıştır.

Sıvı besi ortamında çözünmüş oksijen derişiminin SISO GPC kontrolu çalışmalarında teorik SISO GPC kontrol çalışmalarında bulunan kontrol tasarım parametreleri ile başlanmıştır. Deneysel SISO GPC kontrol çalışmaları, çözünmüş oksijen derişiminin 5 mg/L sabit set noktası ile yük etkisi altında ve set noktasına basamak etki verilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan SISO GPC kontrol deneylerinde, ayarlanabilen değişken olarak seçilen hava akış hızı ile çözünmüş oksijen derişiminin kontrolu başarılı olarak tamamlanmıştır.

Teorik ve deneysel SISO GPC kontrol çalışmalarından sonra MIMO GPC kontrol çalışmaları deneysel olarak sıvı besi ortamında ve ekmek mayası üretilen mikroorganizmalı ortamda yapılmıştır. Sıvı besi ortamında MIMO GPC kontrolu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sistemin işletim koşulları ve GPC kontrol tasarım parametrelerinin uygunlukları teorik ve deneysel çalışmalarla belirlendikten sonra ekmek mayası üretilmek üzere mikroorganizmalı ortamda MIMO GPC kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, *S. cerevisiae* mikroorganizmasının çoğalması sırasında; açığa çıkan ısıdan kaynaklanan sıcaklık artışı ve tüketilen çözünmüş oksijen derişimi, ayarlanabilen değişkenler olan soğutma suyu akış hızı ve hava akış hızı ile istenilen set noktalarında başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir.

Doktora tezi kapsamında yapılan PID kontrol ve GPC kontrol performansları karşılaştırıldığında gelişmiş kontrol yöntemlerinden sistem modeline dayalı olan GPC kontrol yönteminin hem kontrol edilen değişkenlerin set noktasını takip etmesi hem

ayarlanabilen değişkenlerin değişimi hem de ürün derişimi olarak bakıldığında daha iyi olduğu görülmüştür.

Ekmek mayası üretilen mikroorganizmalı MIMO kontrol deneylerinde, ürün verimliliğinin kontrol yapılmayan deneylere göre daha fazla olduğu görülmektedir. MIMO PID ve MIMO GPC deneylerinde kendi aralarında karşılaştırıldığında elde edilen mikroorganizma derişimleri arasında çok fazla fark olmasa da, MIMO PID ve MIMO GPC kontrol ile elde edilen mikroorganizma derişimleri arasında az da olsa fark görülmektedir.

MIMO GPC kontrol deneylerinde ölçek büyütme basamaklarından önce mikroorganizmayı tek koloni ekimi yaparak aktivitesini arttırılması durumunda ürün verimliliğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Ekmek mayası üretiminde çözünmüş oksijen ve sıcaklık kontrollerinin önemi açıkça görülmektedir. Boyacıoğlu' nun 2002 yılında yaptığı çözünmüş oksijen derişiminin SISO PID kontrol sonuçları ile karşılaştırıldığında; MIMO PID kontrol çalışmalarıyla arasında yaklaşık %24 (en az)-%33 (en çok) verim artışı, MIMO GPC kontrol çalışmalarıyla da %37(en az)-%48(en çok) verim artışı sağlanmıştır.

"Çok Girdili-Çok Çıktılı Kontrolun Ekmek Mayası Üretimine Uygulanması" başlıklı bu doktora tezi çalışması kapsamında yapılan kontrolsüz ve kontrollu deneyler sonucunda; bir sistemin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi için ölçüm elemanlarının kalibrasyonunun, gerekirse filtre edilmesinin, sistem tanımlanma yapılmasının son olarak da havalı koşullarda çoğaltılan, ekmek mayası olarak da adlandırılan *S. cerevisiae* mikroorganizmasının çoğalma ortamı sıcaklığının ve çözünmüş oksijen derişiminin kontrolunun ürün verimliliği ve seçimliliği açısından ne kadar önemli olduğu, biyotepkime ortamının işletim parametrelerinin kontrol edilmesi hatta mümkünse birden fazla parametrenin MIMO olarak kontrol edilmesinin ürün verimliliğini arttırdığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akbulut N. ve Kesenkaş, H., Genel Mikrobiyoloji Ders Notlar, (http://agr.ege.edu.tr/sutteknolojisi , 2011) Erişim Tarihi:16.07.2011.

Akçalı, İ.D. 2001. Otomatik Kontrol, Nobel Kitabevi, Adana

Alexander, C.W. and Jr. Trahan, R.E.2001. A comparison of traditional and adaptive control strategies for systems with time delay. ISA Transactions, 40, 353-368.

Alkan, R. ve Yılmaz, C. 2010. Ekmek mayası *Saccaharomyces cerevisiae*'dan β-glukan eldesi. 20. Ulusal Biyoloji Kongresi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Alpbaz, M., Hapoğlu ve Akay B. 2011. Proses Kontrol, Gazi Kitapevi, Ankara.

Alpbaz, M., Bursalı N., Ertunç S. and Akay, B. 1997. Application of a statistical technique to the production of Saccharomyces cerevisiae (Baker's yeast), Biotechnology and Applied Biochemistry, Vol 26, 91-96.

Anand, D.K. 1984. Introduction to Control Systems. 2nd Edition, Pergamon Pres, England.

Anonymous. 2004. PLC Programlama, Endüstriyel Otomasyon ve Proses Kontrol Sistemleri Websitesi.http://www.plcprogramlama.com Erişim Tarihi:22.09.2004.

Ashoori A., Moshiri B., Sedigh A.K. and Bakhtiari M.R. 2009. Optimal control of a nonlinear fed-batch fermentation process using model predictive approach. Journal of Process Control, 19,1162-1173.

Atkinson, B. and Mavituna, F. 1983. Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook, Macmillan. Inc., New York.

Bailey, J.E. and Ollis, D.F., 1986. Biochemical Engineering Fundamentals, 2nd Edition, Mc Graw Hill, New York.

Bateson R.N. 1996. Introduction to Control System Technology, 5th Edition, Prentice Hall

Berry, D.R. 1988. Products of primary metabolic pathways.In Physiology of Industrial Fungi. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Biotol. 1992. Bioreactor Design and Product Yield. Butterworth Heinemann, Oxford.

Boubaker,O., Babary, J.P. and Enit, L. 1999. On SISO and MIMO sliding control of a distributed parameter biological process. Systems, Man, and Cybernetics, IEEE SMC '99 Conference Proceedings.1,50-55.

Bouhenchir H., Cabassud M., Le Lann M.V. and Casamatta G. 2001.A General Simulation model and a heating/cooling strategy to improve controlability of batch reactors. Trans IChemE, 79, Part A, 641-654.

Boyacıoğlu, H. 2002. Kesikli Biyoreaktörde Çözünmüş Oksijen Derişiminin Genelleştirilmiş Minimum Varyans Kontrolu. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Boyacıoğlu, H., Akay B., Ertunç S., Hapoğlu H. and Alpbaz M., 2004. Ekmek Mayası Üretilen Kesikli Bir Biyoreaktörde Kütle Aktarım Katsayısının Belirlenmesi, Altıncı Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye

Chen T.Y. 2002. Application of adaptive predictive control to a flor heating system with large thermal lag., Energy and Buildings, 34,45-51.

Chen, J., Cheng,Y.C. and Yea,Y. 2005.Multiloop PID controller design using partial least squares decoupling structure. Korean J.Chem. Eng., 22 (2), 173-183.

Clarke D.W., Mohtadi, C. and Tuffs P.S., 1987. Generalized predictive control- Part I: the basic algorithm. Automatica 23(2), 137-148.

Clarke D.W., Mohtadi, C. and Tuffs P.S. 1987. Generalized predictive control- Part II: Extensions and interpretations. Automatica, 23(2), 149-160.

Coelho J.P., Oliveira P.B.M. and Cunha J. B. 2005. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm. Computers and electronics in Agriculture, 49, 330-344.

Cooney, C.L., Wang, H.Y. and Wang, D.,I.,C. 1977. Computer-Aided Material Balancing for Prediction of Fermentation Parameters. Biotech. Bioeng., 19,55.

Costa A.C., Meleiro L.A.C. and Filho R. M. 2002. Non-linear predictive control of an extractive alcoholic fermentation process. Process Biochemistry, 38, 743-750.

Cutler, C.R. and Ramaker, B.L. 1980.Dynamic Matrix control: a computer control algorithm, in:Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco,CA,

Demircioglu, H. and Karasu, E., 2000. Generalized Predictive Control-A practical application and comparison of discrete- and continuous-time versions.IEEE Contr. Syst. Mag., 20(5), 36-47.

Deng M., Inoue A., Okazaki S. and Ueki N. 2006. Continuous-Time Anti-Windup Generalized Predictive Control of an MIMO Boiler System. Proceedings of the 6th World Congress on Intellegent Control and Automation, China.

Denli, M. and Okan, F. 2002. Etlik Piliç yemlerinde *Saccaharomyces cerevisiae* katkısının kronik dozlardaki T-2 toksininin olumsuz etkilerini gidermedeki rolü ve besi performansına etkileri. Hayvansal Üretim, 43(2), 1-8.

Dickinson J.R. and Schaweizer M. 2004. The metabolism and molecular physiology of *Saccaharomyces cerevisiae*. 2nd Edition, CRC Press

Doran, P.M. 1995.Bioprocess Engineering Principles, Academic Pres, San Diego.

Dong, D., Meng, X. and Liang F. 2011. Decoupling control of double-level dynamic vacuum system based on neural networks and prediction principle. Vacuum, 86, 218-225.

Durmuş, B. ve Temurtaş H. 2010. Öngörülü Kontrol ile Altı Eklemli Bir Robot Kolunun Eklem Esaslı Yörünge Kontrolu. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22, 23-32.

Ertunç, S. 2003. Sürekli - zaman genelleştirilmiş öngörmeli kontrolün (CGPC) bir biyoreaktöre uygulanması. Doktora Tezi,Ankara Üniversitesi, Ankara.

Fikar, M.1999. Predictive Control, Technical Report KAMF9801. Department of Process Control Faculty of Chemical Technology Slovak University of Technology in Bratislava.

Furukawa, K., Heinzle, E. and Dunn, I.J. 1983. Influence of Oxygen on the Growth of *Saccharomyces cerevisiae* in Continuous Culture. Biotechnology and Bioengineering, 25, 2293-2317.

Gunnarson, S., Collignon, V. and Rousseaux,O. 2003.Tuning of decoupling controller for a 2x2 system using iterative feedback tuning. Control Engineering Practice, 11, 1035-1041.

Hansen M.E.C. 1883. Undersogelser over alkoholgjaersvampenes fysiologi og morfologi. II. Om askosporedannelsen hos slaegten Saccharomyces. Medd Carlsberg Lab, 2, 29-86.

Hapoğlu, H., 1993. Self -Tunning Control of Packed Distillation Colums, Ph. D. Thesis, University of Wales, s.1-308.

Jana, A.K. 2008. Chemical Process Modelling and Computer Simulation.Prentice Hall, New Delhi.

Johnson-Green, Perry. 2002. Introduction To Food Biotechnology. CRC Press

Kennel, R., Linder, A. and Linke, M. 2001. Generalized Predictive Control (GPC)-Ready for Use Drive Applications?. Power Electronics Specialists Conference, 32nd Annual, 4, 1839-1844.

Kesim, M., Şahin, İ., Kılıç, O., Kurdal, E., Başoğlu, F., Çopur, Ö. U., Ünal, S., Kundakçı, A. ve Yücel, A. 1995. Gıda Teknolojisi, Anadolu Üniversitesi,Eskişehir.

Kurtzman, C.P. and Fell J.M. 2000. The Yeasts a Taxonomic Study Fourth Revised and Enlarge Edition, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Netherlands.

Kuo, B.C. 2009. Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayıncılık, 4:Baskı, İstanbul.

Leao, C.P. and Soares, 2004. Heuristic Sensitivity Analysis for Baker's Yeast Model Parameters, Investigaçao Operacional, 24, 247-263.

Lee J.H. 2005. Synthesis of Hantsch 1,4-dihydropyridines by Fermenting Baker's Yeast, Tetrahedron Letters, 46, 7329-7330.

Li-Juan, L., Hong-Ye, S. and Jian, C. 2007. Generalized Predictive Control with Online Least Squares Support Vector Machines. 33(11)1182-1188.

Ljung, L. 1987. System Identification: Theory for the User, Prentice Hall, New Jersey.

Mahfouf, M., Linkens, D.A. and Xue, D. 2002. A new generic approach to model reduction for complex physiologically based drug models. Control Engineering Practice, 10,, 67-81.

Montague, G., 1997. Monitoring and Control of Fermenters. Galliard (Printers)Ltd, Great Yarmouth.

Moon S.M., Clark R.L. and Cole D.G., The recursive generalized predictive feedback control: theory and experiments. 2005. Journal of Sound and Vibration, 279 171-199.

Moo-Young, M. and Blanch,H.W.1981. Design of Biochemical Reactors:Mass Transfer Criteria for Simple and Complex Systems. Advances in Biochemical Engineering, Fiechter, A. (Ed.), Vol 19, Springer-Verlag, Berlin, s 1-69.

Na, M.G. and Upadhyaya, B.R., 2006. Application of model predictive control strategy based on fuzzy identification to an SP-100 space reactor. Annals Nuclear Energy. 33,17-18, 1467-1478.

Neshasteriz, A.R., Sedigh, A. K. and Sadjadian H. 2010. Generalized Predictive control and tuning of industrial processes with second order plus dead time models. Journal of Process Control. 20, 63-72.

Özata, A., Kutlu, M., Kılıç, A.Y., Türk, A., Kıvanç, M., Güven, K., Türe, C., Tanatmış, M., Yamaç, E., Candan, M., Özkütük, R.S., Sivas, H., Tüylü, B., Yücel, E. ve Demissoy, A., 2009. Genel Biyoloji. 272. Anadolu Üniversitesi Web-Ofset Tesisleri, Eskişehir.

Parte M.P., Camacho O., Camacho E.F., 2002, Development of a GPC-BASED sliding mode controller, ISA Transactions 41,19-30.

Pekin, B., 1979. Biyokimya Mühendisliği. Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.

Pencheva, T., Hristozov, I., Tzonkov, S. and Hitzmann, B., 2004. Functional State Modelling of Saccharomyces cerevisiae Cultivations. Bioautomation,1,1-15.

Pencheva, T., Hristozov, I., Hell, D., Hitzmann, B. and Tzonkov, S. 2005. Modelling of Functional States during *Saccharomyces cerevisiae* Fed-batch Cultivation. Bioautomation,2,8-16.

Rainer, B.W. 1990. Determination Methods of Volumetric Oxygen Transfer Cofficient k_La in Bioreactors, Chem. Biochemical Engineering, 4, 185-196.

Raol, J.R., Girija, G. and Singh., J. 2004. Modelling and parameter estimation of dynamic systems , IEE control engineering series, London.

Rao, M. and Qiu, H. 1993. Process Control Engineering, Gordon and Breach Science Publishers, Netherlands.

Richalet J. Rault A., Testud J.L. and Papon J. 1978. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes, Automatica 14 413-428.

Sarıoğlu, M.K., 1991. Otomatik Kontrol (I) Ders notu, 4. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.

Serter, N., Akşit, F. Akgün, Y. ve Kiraz, N. 2006. Genel Mikrobiyoloji ve İmmünoloji, Anadolu Üniversitesi, 281, Eskişehir.

Shearer, J. L., Kulakowski, B.T. and Gardner, J.F. 1997. Dynamic Modelling and Control of Engineering Systems, Second Ed., Prentice Hall, USA.

Shinskey, F.G. 1988. Process Control Systems Application, Design, and Tuning. McGraw Hill , New York.

Shuler M.L. and Kargi F. 2002. Bioprocess Engineering Basic Concepts, 2nd Edition, Prentice Hall, USA.

Silva R.G. and Kwong, W.H. 1999. Nonlinear Model Predictive Control of Chemical Processes. Braz. J.Chem. Eng., 16,1,

Sinclair, C.G. and Kristiansen, B. 1987. Fermentation kinetics and modelling, Open University Pres, Taylor and Francis, New York.

Sivanagaraju, S. and Devi, L. 2008. Control Systems Engineering, New Age International (P) Limited, Delhi.

Söderström, T. and Stoica, P. 1989. System Identification, Prentice Hall, Cambridge.

Spriet, J.A. and Vansteenkiste, G. C.1982. Computer-aided modelling and simulation, Academic Press, London.

Sragg, A.H. 1988. Biotechnology for Engineers Biological Systems in Technological Processes, Ellis Horwood Limited, England.

Sragg, A.H., 1991. Bioreactors in Biotechnology a practical approach. Ellis Horwood Limited, England.

Stephananopoulos, G. 1984. Chemical Process Control and Introduction to Theory and Practice ,Prentice Hall, New Jersey.

Tanker, N., Koyuncu, M. ve Coşkun M. 1998. Farmasötik Botanik. Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları, Ders Kitapları No:78, 416,Ankara.

Tham, M.T. 1999. Multivariable Control an Introduction to Decoupling Control, University of Newcastle upon Tyne, lecture and course notes,19p, London.

Thomas, Y.A. 1975. Linear Quadratic Optimal Estimation and Control with Receding Horizon, Electronics Letters, 11,19-21.

Türker, M. 2005. Biyoreaksiyon Mühendisliği. Su Vakfı Yayınları, Kocaeli.

Walker, G.1999. Yeast Physiology and Biotechnology. Wiley,England.

Wellstead, P.E. and Zarrop, M. B. 1991. Self-Tunning System Control and Signal Processing, John Wiley and Sons, Great Britain.

Wang, Z., Chen, Z., Sun, Q. and Yuan, Z., 2006. Multivariable Decoupling Predictive Control Based on QFT Theory and Application in CSTR Chemical Process. Chinese J.Chem.Eng., 14(6), 765-769.

Wang, H.Y., Cooney, C.L. and Wang D.I.C. 1977. Computer-Aided Baker's Teast Fermentations. Biotech. Bioeng., 19,69.

Wang, Q.G., Huang, B. and Guo, X. 2000. Auto-tuning of decoupling controllers from step test. ISA Transactions, 39, 407-418.

Willis, M.J. 1999. Multivariable Control:An introduction, Depertmant of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle.

Vittal, R.R. and Bhat R., 2009. Biotechnology Concepts and Applications,. Alpha Science,India.

Yu, D.L. and Gomm, J.B, 2003.Implementation of neural network predictive control to a multivariable chemical reactor. Control Engineering Practice 11, 1315-1323.

Yüksel, İ. 2011. Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri. Nobel Yayın Dağıtım, 5. Baskı, Ankara

Zhang, R., Xue, A., Wang,S. and Ren, Z. 2011. An improved model predictive control approach based on extended non-minimal state space formulation. Jornal of Process Control, 21, 1183-1192.

Zhang, J., Wei, J. and Zhong, T. 2004. A generalized predictive controller to a thermal process for batch dyeing process. International Conference on Information Acquisition, China, 433.

Zhang, X. Ch., A. Visala, A. Halme and P.,Linko. 1994. Functional State Modelling Approach for Bioprocesses: Local Models for Aerobic Yeast Growth Processes, J. Proc. Cont., 4(3), pp. 127- 134.

EKLER

EK 1 DOMETRE KALİBRASYONU …….....… 199

EK 2 TERMOÇİFT KALİBRASYONU …….....… 201

EK 3 TRANSDUCER KALİBRASYONU ……...…… 202

EK 4 SOĞUTMA SUYU POMPASI KALİBRASYONU ……..… 203

EK 5 MİKROORGANİZMA KALİBRASYONU ……..… 204

EK 6 ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN PROSES REAKSİYON EĞRİSİ ……..... 205

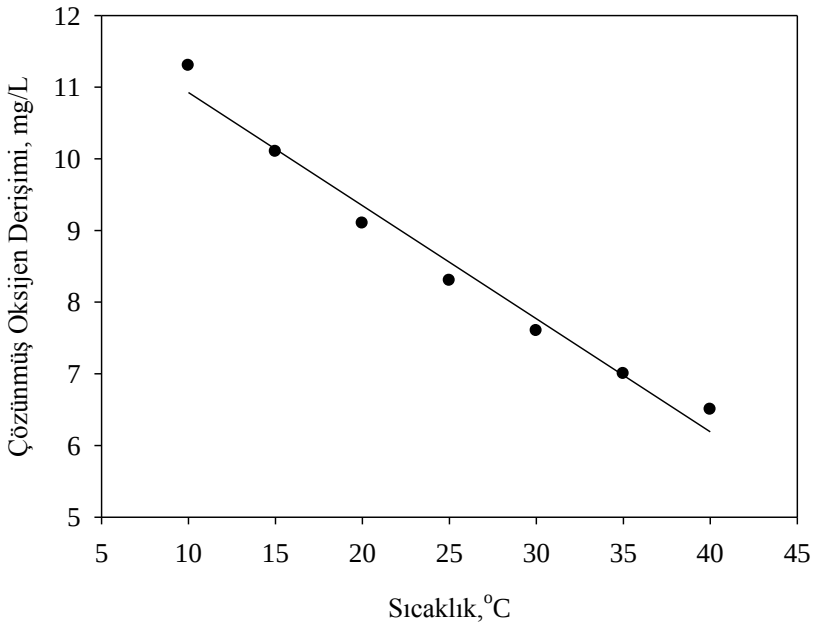
EK 7 BİYOTEPKİME SICAKLIĞI PROSES REAKSİYON EĞRİSİ ……... 207

EK 8 ETANOL ÖLÇER CİHAZI KALİBRASYONU 208

EK 9 SISO PID KONTROL İÇİN VISUAL BASIC PROGRAMI..... 209

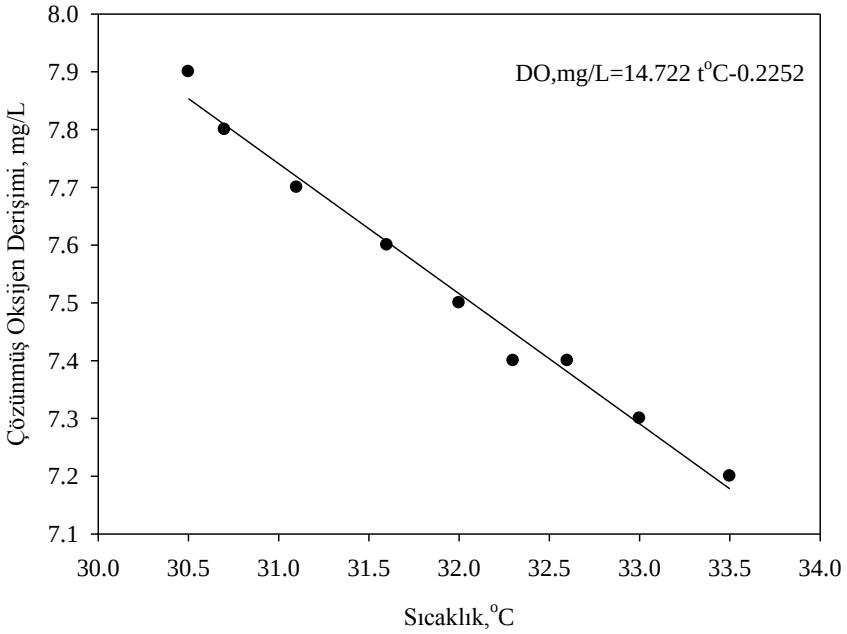
EK 1 DOMETRE KALİBRASYONU

DOmetrenin kalibrasyonu için öncelikle oksijenin sudaki çözünürlüğü ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. bilindiği gibi gazların sudaki çözünürlüğü sıcaklık ile ters orantılıdır. Şekil EK 1.1'den de görülebileceği gibi oksijenin sudaki çözünürlüğü, sıcaklık değişiminden çok fazla etkilenmektedir. Bu nedenle, DOmetrenin kalibrasyonunun bu tez çalışmasına uygun olacak aralıkta olmasına dikkat edilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında çalışmada kullanılan DOmetrenin kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 1 Oksijenin sudaki çözünürlüğünün sıcaklık ile değişimi

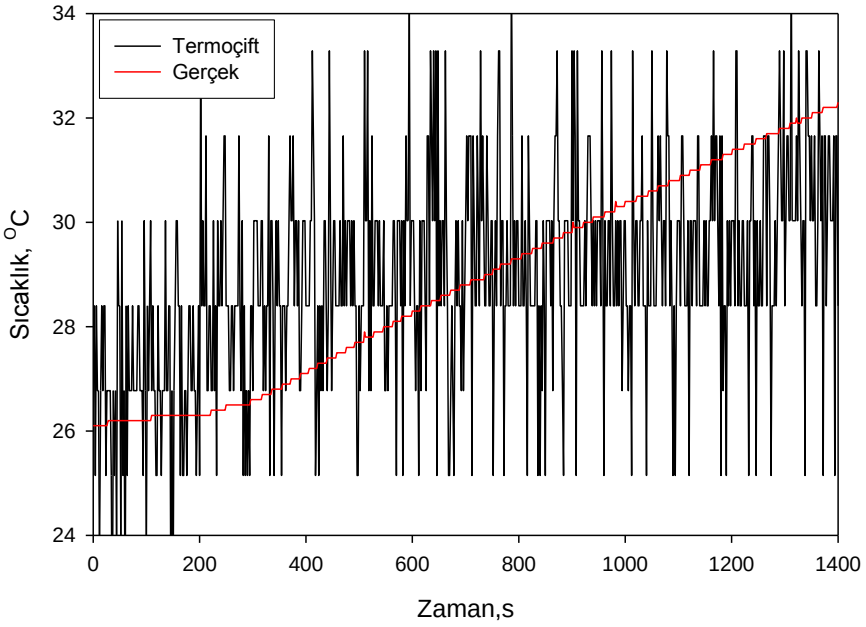
DOmetrenin kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra biyoreaktör sıcaklığı ile DO derişimi arasındaki ilişki Şekil EK1.2'de grafiksel olarak verilmiştir. Yapılan kalibrasyon işleminden sonra DOmetrenin çıkış voltajı ile DO derişimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Örnek verilecek olursa, biyoreaktör içindeki DO derişimi 7,5 mg/L olduğunda DOmetrenin çıkış voltajı 7,5 mV olarak ölçülmektedir.



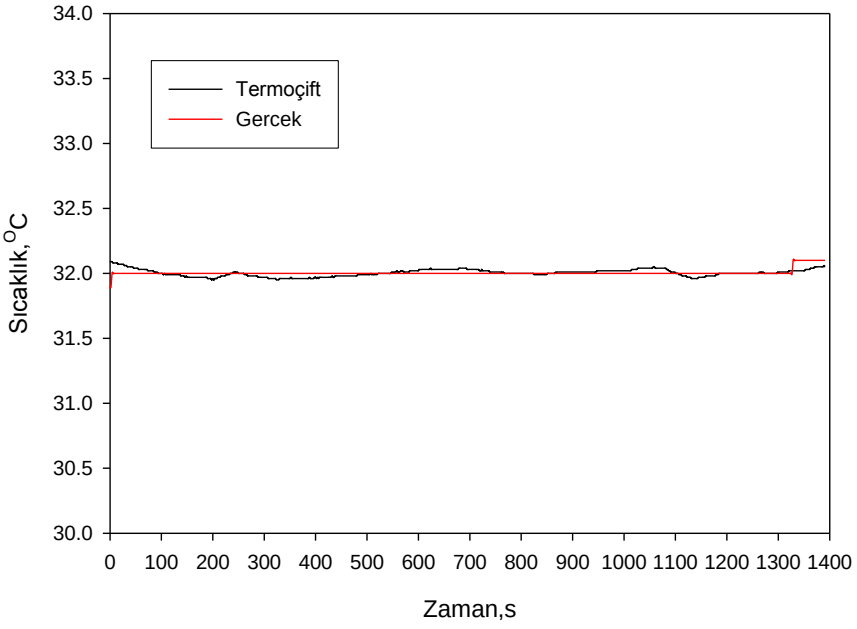
Şekil 2 Sisteme bağlı olan DOmetrenin kalibrasyon doğrusu

EK 2 TERMOÇİFT KALİBRASYONU

Deneysel çalışmalarda kullanılan ve biyoreaktör sıcaklık değerlerini on-line olarak bilgisayara gönderilmesini sağlayacak olan termoçiftte karşılaşılan gürültü problemi filtre kullanılarak aşılmıştır.



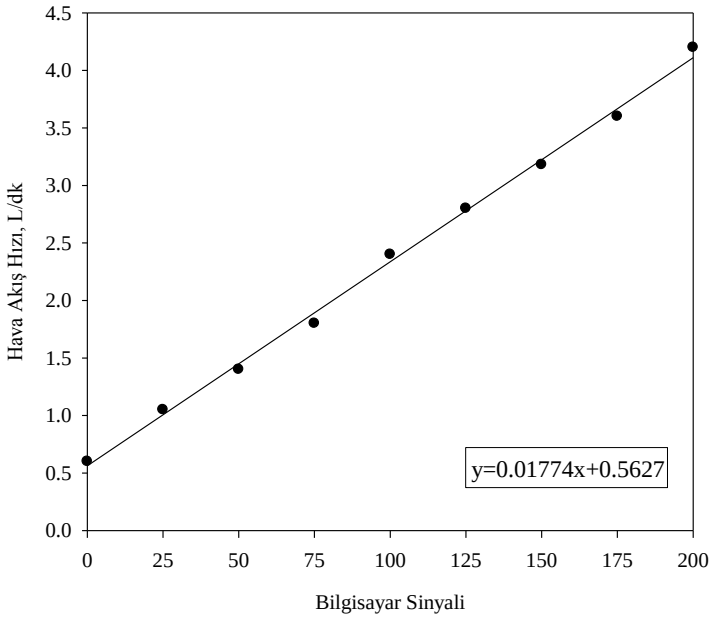
Şekil 1 Termoçiftten filtresiz olarak okunan sıcaklık ve gerçek sıcaklık



Şekil 2 Termoçiftten filtreli olarak okunan sıcaklık ve gerçek sıcaklık

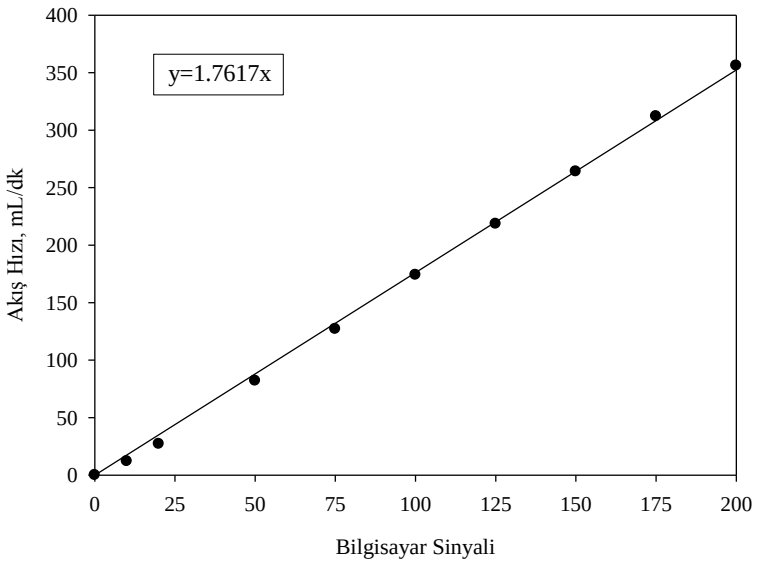
EK 3 TRANSDUCER KALİBRASYONU

Biyoreaktörün çıkış değişkenlerinin doğru okunması ve aktarılması amacıyla yapılan çalışmalardan sonra bilgisayardan ve/veya algoritmadan gönderilen sinyaller ile biyoreaktörün giriş değişkenleri arasındaki ilişki için kalibrasyon yapılmıştır. Bu amaçla, sistemin giriş değişkenlerinden biri olan ve ayarlanabilen değişkenlerden biri olarak seçilen havanın akış hızının ayarlanmasında kullanılacak transducer için kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1 Bilgisayar sinyaline karşılık transducerın sisteme gönderdiği hava akış hızı

EK 4 SOĞUTMA SUYU POMPASI KALİBRASYONU

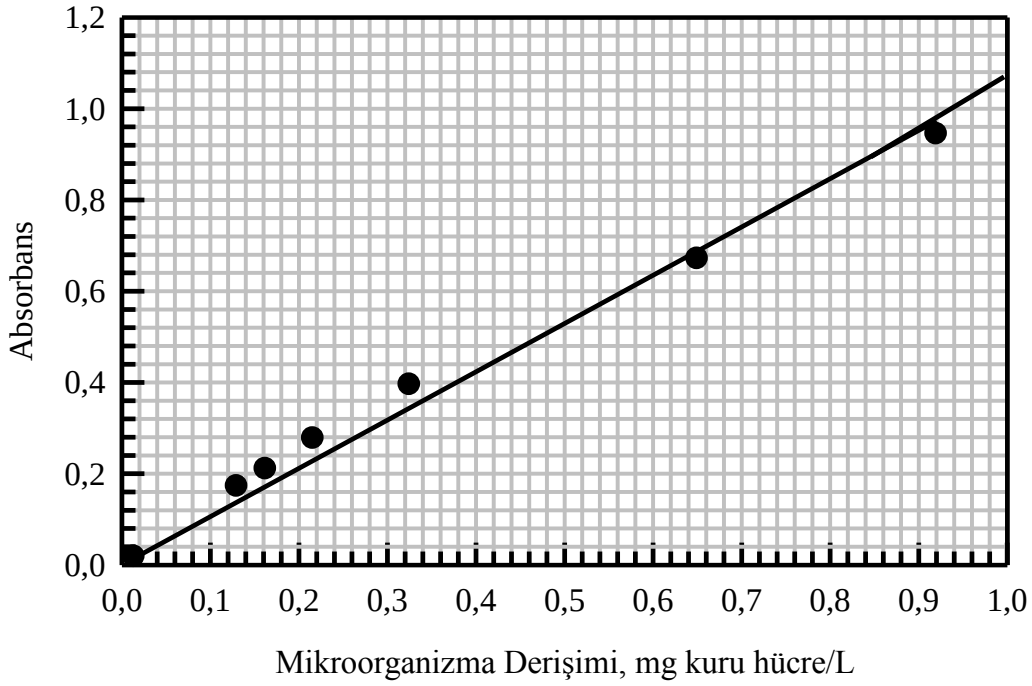


Şekil 1 Bilgisayar sinyaline karşılık pompanın sisteme beslediği soğutma suyu akış hızı

EK 5 MİKROORGANİZMA KALİBRASYONU

Ekmek mayası üretilen kesikli biyoreaktörden alınan örnek kurl ile seyreltilerek UV spektrofotometre kullanılarak 580nm'de absorbans değeri ölçülmüştür. Mikroorganizma derişimi Şekil EK5.1'deki kalibrasyon doğrusu da kullanılarak hesaplanır. Bu yöntemle hem ölü hem canlı hücrelerden oluşan toplam mikroorganizma derişimi elde edilir.

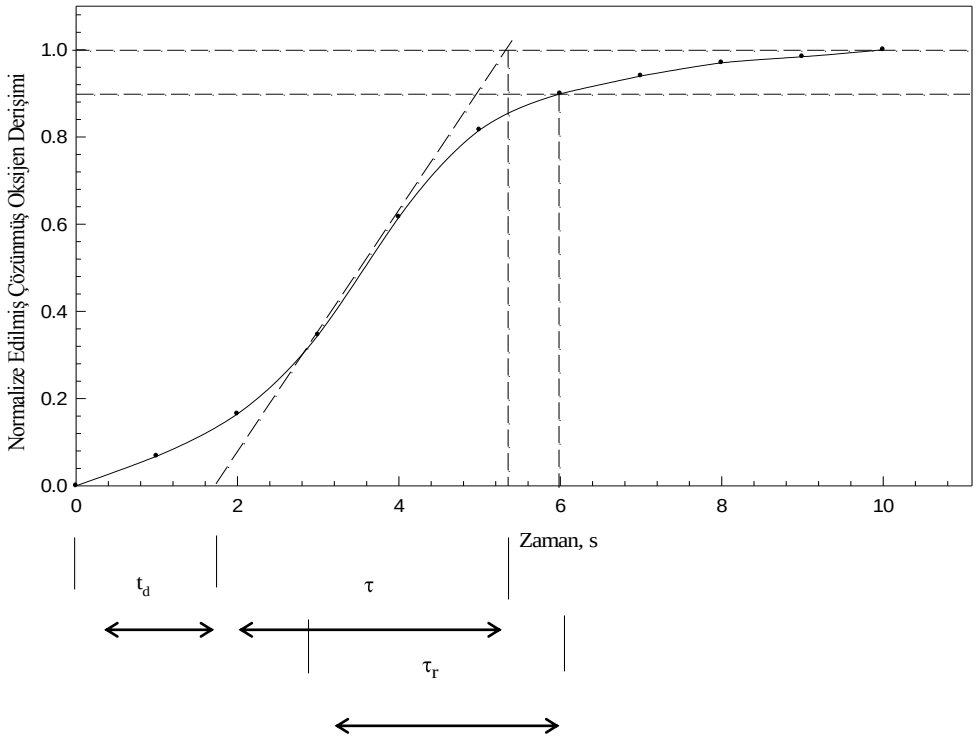
Mikroorganizma derişimi= Okunan Absorbans değeri X Seyreltme Oranı X 1,058



Şekil 1 NRRL Y-567 *S. cerevisiae* mikroorganizması için kalibrasyon eğrisi

EK 6 ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN PROSES REAKSİYON EĞRİSİ*

Hava akış hızına 1.04 L/dk'dan 3.4 L/dk'ya basamak etki verilmiş ve bu etkiye karşılık sistem alınan çözünmüş oksijen derişimin değişimi normalize edilerek grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 1 Hava akış hızı- çözünmüş oksijen derişimi proses reaksiyoneğrisi

Bu yöntemde optimum PID kontrol parametrelerinin bulunması için aşağıdaki Cohen-Coon parametre hesaplama yöntemi eşitlikleri kullanılmıştır.

$$K_c = \frac{1}{K}\frac{\tau}{t_d}\left[\frac{4}{3} + \frac{t_d}{4\tau}\right] \qquad \text{(Ek 6.1)}$$

$$\tau_I = t_d\left[\frac{32 + 6t_d/\tau}{13 + 8t_d/\tau}\right] \qquad \text{(Ek 6.2)}$$

---

* Boyacıoğlu 2002 Yüksek Lisans Tezi'nden alınmıştır.

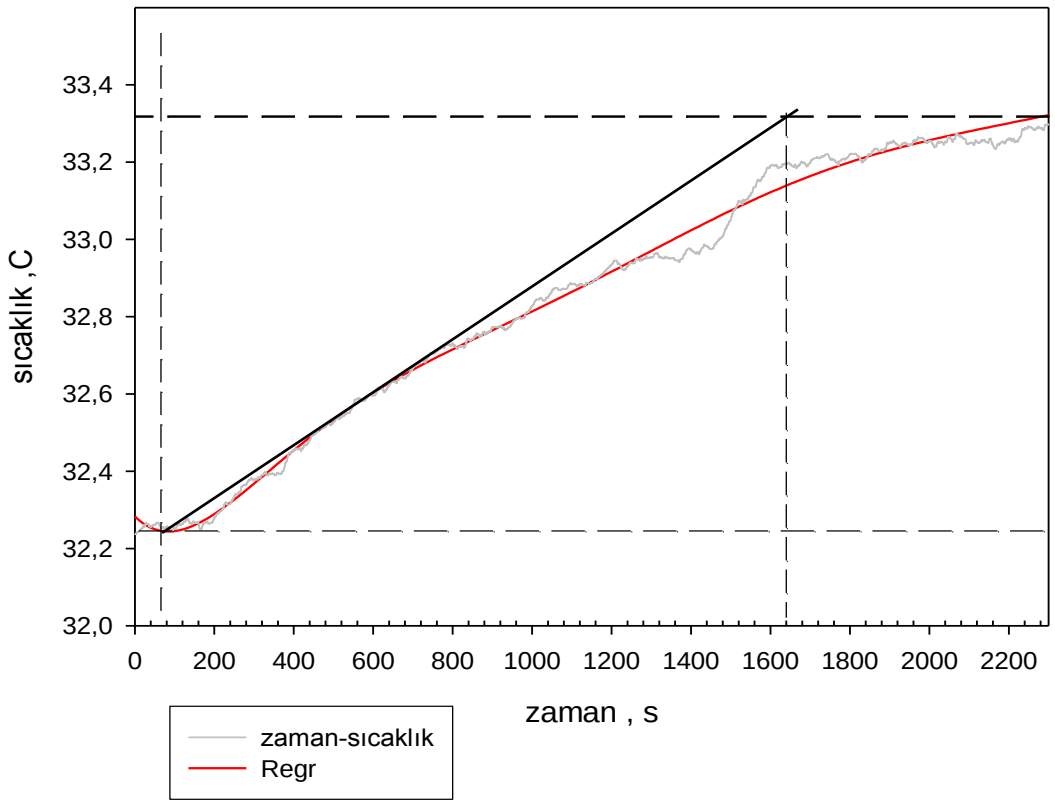
$$\tau_D = t_d \left[\frac{4}{11 + 2t_d / \tau} \right] \qquad \text{(Ek 6.3)}$$

Proses reaksiyon eğrisi ve Eşitlik (Ek 6.1), Eşitlik (Ek 6.2) ve Eşitlik (Ek 6.3) kullanılarak ölü zamanlı birinci mertebe model parametreleri ve PID parametreleri aşağıdaki gibi bulunmuştur. $t_d = 1.7$ s (ölü zaman) $\tau = 5.3$ s (zaman sabiti) $\tau_r = 3.2$ s (yükselme zamanı) $K_c = 4.4069$ (oransal sabiti) $\tau_I = 3.70497$ s (integral zaman sabiti) $\tau_D = 0.58412$ s (türevsel zaman sabiti)

EK 7 BİYOTEPKİME SICAKLIĞI PROSES REAKSİYON EĞRİSİ

Sistemin giriş değişkenlerinden biri olan soğutma suyu akış hızına basamak etki verilerek soğutma suyu akış hızı ile biyoreaktör sıcaklığı arasındaki ilişkiyi bulmak üzere deneysel çalışma yapılmıştır.

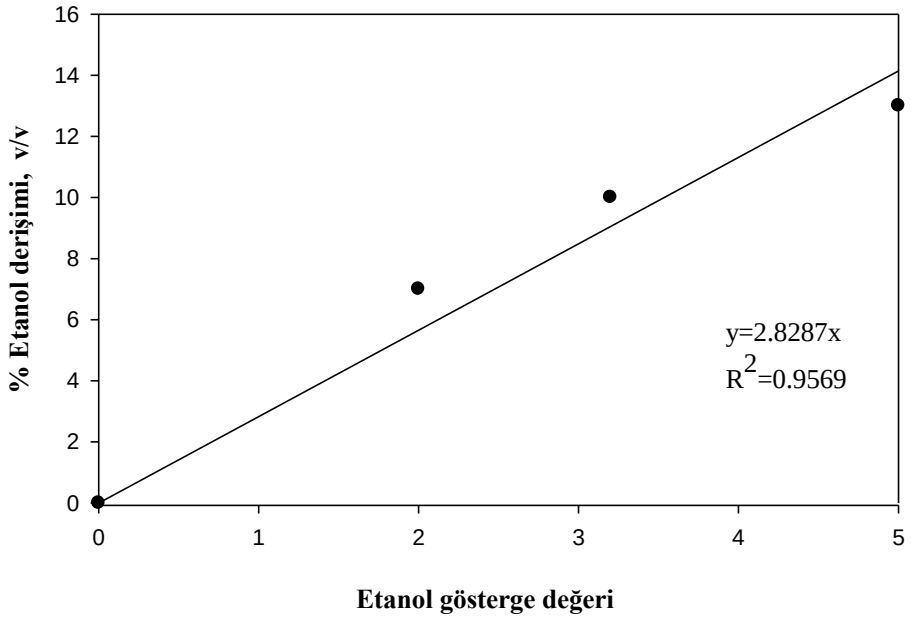
Sistem yatışkın hale getirildikten sonra pompa sinyali 100 mL/dk'dan 50 mL/dk'ya düşürülmüş ve tepkime ortamı sıcaklığının değişimi elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya ait grafik Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 1 Soğutma suyu akış hızı- sıcaklık proses reaksiyon eğrisi

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen grafikten, t_d=80s, τ=1570s τ_r=2000s olarak bulunmuştur. PID kontrol parametreleri Cohen-Coon parametre hesaplama yöntemi ile K_c=-684.543 τ_I =220 s τ_D =55 S olarak hesaplanmıştır.

EK 8 ETANOL ÖLÇER CİHAZI KALİBRASYONU



Şekil 1 Etanol ölçer cihazı kalibrasyon doğrusu

EK 9. SISO PID KONTROL İÇİN VISUAL BASIC PROGRAMI

```
public incr,tt as integer
public er,errm1,errm2 as single
public KC,KI,KD as single
public att,attm1,attm2 as single
public ISE,IAE,ITAE,ITSE as single
public ISE1,IAE1,ITAE1,ITSE1 as single
public FO2,zaman
public zamaneski,fark as integer
public u,deltau,eskiu as single

dim DO2 as Tag
dim rs as Tag
dim ssg as Tag
dim hava as Tag
dim pomp as Tag
dim stt as Tag
dim a as Tag

'değişkenlerin kesirli veya tamsayı olması durumu
dim DO2T as single
dim rsT as single
dim ssgT as single
dim havaT as single
dim pompT as single
dim sttT as single
dim aT as single
Sub SCR1()
if incr=0 then
Open "C:\spadrv\havva\deneyler\pidkont\pidkont.txt" For Output Access Write As #1
end if
```

```
set DO2=GetTag("TASK1","SOC7")
set rs=GetTag("TASK1","SOC5")
set ssg=GetTag("TASK1","SOC6")
set hava=GetTag("TASK1","SOC1")
set pomp=GetTag("TASK1","SOC4")
set stt=GetTag("DISP1","NCTL1")
set a=GetTag("DISP1","NCTL2")

incr=incr+1
zaman=incr*tt

'Set noktasına verilen değişim
'IF zaman<=1000 THEN
'stt=2
'ELSEIF zaman>1000 AND zaman<2000 THEN
'stt=4
'END IF

'tt, ornekleme araligi
tt=2
errm2=errm1     ' e(t-2)=e(t-1)
errm1=er        ' e(t-1)=e(t)
er=stt-DO2      '   e(t)=set noktası-okunan DO degeri

'PID Parametreleri
KC=4.4069      'KC: Oransal  sabit
KI=3.70497     'KI: Integral sabit
KD=0.58412     'KD: Türevsel sabit

'pomp=100      'Soğutma suyu akış hızı

'PID hesaplamaları
```

```
att=(KC+(KC*tt/2*KI)+(KC*KD/tt))*er
attm1=((KC*TT/2*KI)-KC-(2*KC*KD/tt))*errm1
attm2=(KC*KD/tt)*errm2
deltau=(att+attm1+attm2)     'attm3, delta u  değerini ifade eder.
u=(deltau+eskiu)
eskiu=u
hava=u
'stp=(attm3+stpm1)         'Yeni u = delta u + eski u
'stpm1=stp
'stpm2=stpm1/30
'hava=stpm2
if hava<=0.0 then hava=0
if hava>=200.0 then hava=200
write #1,incr,zaman,stt,hava,FO2,er,ISE,IAE,ITAE,ITSE,att,attm1,attm2
outputf 0, hava
outputf 1, pomp
outputf 4, er
outputf 5, u
outputf 6, stt
End Sub
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Havva BOYACIOĞLU
Doğum Yeri	:	Denizli
Doğum Tarihi	:	26.06.1976
Medeni Hali	:	Bekar
Yabancı Dili	:	İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	:	Denizli Anadolu Ticaret Meslek Lisesi (1990-1994)
Lisans	:	Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi
		Kimya Mühendisliği Bölümü (1994-1999)
Yüksek Lisans:		Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
		Kimya Mühendisliği (1999-2002)

Makaleler

Ertunc, S.,Akay, B., **Boyacioglu, H**., Hapoglu H. 2009. Self-tuning control of dissolved oxygen concentration in a batch bioreactor. Food and Bioproducts Processing 87, 46-55.

Akay, B.,Ertunc, S., **Boyacioglu, H**., Hapoğlu, H., Alpbaz, M.2011. Discrete system identification and self-tuning control of dissolved oxygen concentration in a stirred reactor.Korean Journal of Chemical Engineering,28,3,837-847.

Uluslararası Tebliğler

Akay B., Ertunç S., **Boyacioglu H**., Hapoglu H. and Alpbaz M., 2003. Parametric and Non-Parametric Models' Identification Based-on Dissolved Oxygen Concentration in S.cerevisiae Production 3rd Chemical Engineering Conference for Collaborative Research in Eastern Mediterranen (EMCC-3), Selanik,Yunanistan.

Mete, T., **Boyacıoğlu, H**., Ertunc, S., Akay, B., Özkan, G., Hapoğlu, H., Alpbaz, M. 2007. Definition of Bioreaction Rate with Artifical Neural Network, Somer Symposium Series, 136, Ankara.

Boyacioglu, H., Ertunc, S., Hapoglu, H., Alpbaz, M. 2011. Modelling of baker's yeast production. 1st International Symposium on Secondary Metabolites,119,Denizli

Ulusal Tebliğler

Ertunç, S., **Boyacıoğlu, H.,** Kantürk, A.,Akay, B.2005.Biyoreaktörde On-line Çözünmüş Oksijen Derişimi Kontrolu, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'05), İstanbul.

H. Boyacıoğlu, B. Akay, S. Ertunç,H. Hapoğlu, M. Alpbaz, 2004.Ekmek Mayası Üretilen Kesikli Bir Biyoreaktörde Kütle Aktarım Katsayısının Belirlenmesi, Altıncı Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İzmir,Türkiye.

Araştırmacı Olarak Yeraldığı Projeler:

İleri Kontrol Yöntemleriyle Ekmek Mayası Üretim Veriminin Arttırılması (AÜ Biyoteknoloji Enstitüsü, Proje No: 29)

Programlanabilir mantık kontrolun (programmablelogic control) Laboratuar ve pilot ölçekli reaktörlere uygulanması (AU Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP))

Maya Üretilen Biyoreaktörde pH Optimizasyonu, Dinamik Analizi ve Kontrolu

Saccharomyces cerevisiae ve Polistiren Üretiminde Kullanılan Reaktörün Sıcaklık Kontrolü (AU Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP))

Aldığı Burslar

Tübitak Bilim Adamı Yetiştirme Grubu Yurt İçi Doktora Bursu