

168817

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KURUTMA SÜRECİNİN MODELLENMESİ ve AKILLI
ÖNGÖRÜLÜ DENETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Yük. Müh. Uğur YÜZGEÇ

**Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yaşar BECERİKLİ**

MAYIS 2005

KURUTMA SÜRECİNİN MODELLENMESİ ve AKILLI ÖNGÖRÜLÜ DENETİMİ

Uğur YÜZGEÇ

Anahtar Kelimeler: Akışkan Yatak, Kurutma Süreci, Ekmek Mayası, Modelleme, Genetik Algoritma, Optimizasyon, Model Tabanlı Öngörülü Kontrol, Yapay Sinir Ağları.

Özet: Kurutma biyokimyasal, kimyasal ve gıda endüstrileri gibi süreçlerde çok önemli bir işlemdir. Kurutmanın temel amacı malzemeden suyun uzaklaştırılmasıdır. Kurutma süreçleri genel olarak doğrusal olmayan süreçler olarak bilinir. Tarımsal ürünler, gıda maddeleri, maya, enzim ve bakteri türü biyolojik ürünler, kurutma süreci boyunca sıcaklık, nem kesri gibi kurutma koşullarına karşı çok hassas davranış gösterirler. Bu yüzden kurutma süreçlerinin modellemeleri oldukça karmaşık ve zordur.

Bu tez çalışmasında, kesikli bir akışkan yatak içerisindeki ekmek mayasının kurutma süreci için iki matematiksel model geliştirilmiştir. İlk model kütle ve enerji denkleğine dayanan eşitliklerden oluşmaktadır. İkinci model ise granül seviyesindeki ısı ve difüzyon hareketinden yola çıkarak, ekmek mayasının kurutma davranışını öngörebilmek için geliştirilmiş bir modeldir. Ayrıca granül tabanlı kurutma modeli, ürün kalitesi kavramı ve granüllerin büzülmesi ile ilgili denklemlerle daha da geliştirilmiş ve böylece model öngörüsü yeteneği artırılmıştır.

Kurutma süreçlerinde, en önemli göstergeler kurutma sonunda oluşan ürün kalitesi, kurutma zamanı ve enerji tüketimidir. Bu çalışmada kurutma sürecinin optimal kurutma profillerinin bulunabilmesi için genetik algoritma tabanlı bir doğrusal olmayan öngörülü denetleyici geliştirilmiştir. Optimizasyon yapılarında rasgele arama yöntemlerinden biri olarak bilinen genetik algoritmalar optimizasyon probleminin çözümünün karmaşık ve bulunmasının zor olması nedeniyle kullanılmıştır.

Ekmek mayasının kurutma süreci için ikinci kontrol yapısı olarak, bir model öngörülü kontrol yapısı sunulmuştur. Bu kontrol yapısında, nem kesri ve ürün kalitesinin öngörü modelleri yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öngörü modelleri için ileri beslemeli ve yinelemeli sinir ağları kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, doğrusal olmayan bir kurutma sürecinin matematiksel modelini geliştirmek ve kurutma sürecinin enerji maliyetini azaltacak, ürün kalitesini arttıracak ve toplam kurutma zamanını da düşürecek bir kontrol yapısı oluşturmaktır. Tez çalışmasının benzetim performansları, endüstriyel akışkan yataklı kurutma sürecinde önerilen matematiksel modellerin ve kontrol yapılarının rahatlıkla kullanılabilceğini göstermektedir.

MODELING and INTELLIGENT PREDICTIVE CONTROL of DRYING PROCESS

Uğur YÜZGEÇ

Keywords: Fluidized-bed, Drying Process, Baker's Yeast, Modeling, Genetic Algorithm, Optimization, Model Predictive Control, Artificial Neural Network.

Abstract: Drying is an important unit operation in food processing and in the chemical and biochemical industry. The main purpose of drying is the removal of water from the material to be dried. The drying processes are generally known as non-linear processes. Many products to be dried are sensitive to drying conditions such as temperature and moisture content, e.g. agricultural products, foods, pharmaceuticals, biotechnology products such as enzyme preparations bacterial and yeast cultures. So, mathematical modeling of the drying process is rather complex and difficult.

In this study, two mathematical models were developed for drying process of baker's yeast in a batch fluidized bed. The first model consists of equations of energy and mass balance. The second model was developed to predict the drying behaviour of granular baker's yeast by setting up material and heat balances at granular level. Furthermore the drying model of granular product was further improved by integrating shrinking of granules and the quality concept and its ability for prediction was extended.

In the drying processes, the most important indicators are energy consumption, total drying period and the quality of product at the end of the process. A nonlinear predictive controller based on genetic algorithms was developed to determine the optimal drying profile for a drying process. Genetic algorithms known as one of the numerical search methods were used in the complex and absence of the analytical solution of the optimization problem.

For the drying process of the baker's yeast, a model predictive control structure was presented in this study. In this control structure, the prediction models of moisture content and product quality were built by using dynamic artificial neural networks. Feed forward and recurrent neural networks were used for the prediction models.

The objective of this study is to develop a control procedure and a mathematical model for a nonlinear drying process. The target of both the control algorithms proposed was to increase the quality of dried end product and decrease the energy consumption during drying. The results of this study show that the proposed control structures and mathematical models can be used easily in the industrial fluidized-bed drying processes because of the simulation performances.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasına başlarken kurutma süreçlerinin bu kadar derin bir konu olduğunu tahmin bile edemezdim. Ama konuya girdikçe kurutmanın yalnızca bir şeyi ısıtmak olmadığını, özellikle biyolojik ürünlerin kurutma süreçlerinin son derece karmaşık bir yapıya sahip olduğunu öğrendim. Tez çalışmam sırasında zaman zaman gerçekten zorlandığım, sıkıldığım anlar da oldu; fakat bu periyotların sonunda son nokta olan bugünlere gelmek bütün sıkıntılarımı unutturdu doğrusu. Bu tez umarım kurutma süreçleri ve kontrol konusunda araştırmaya meraklı herkese bir yol gösterici kaynak olur.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emeği geçenlerden, öncelikle tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yaşar Becerikli hocama, Pakmaya İzmit fabrikasında üretim müdürü olarak çalışan ve içindeki bilim aşkı hiç sönmeyen değerli hocam Doç. Dr. Mustafa Türker'e, yine bu uzun ve yorucu tez çalışmamda bana her zaman inanan ve destek olan aileme ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Bu tez çalışması boyunca nasıl büyüdüklerini anlayamadığım iki küçük afacanıma bu çalışmayı armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Özet.....	ii
Abstract.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xxiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Kurutma Süreçlerinin Modellenmesi.....	3
1.2. Kurutma Süreçlerinin Kontrolü	7
1.3. Tez Organizasyonu	11
BÖLÜM 2. KURUTMA SÜREÇLERİ.....	13
2.1. Kurutma Sürecinin Temelleri	13
2.2. Kurutma Yöntemleri	15
2.2.1. Konveksiyon veya ısı yayımlı kurutma.....	15
2.2.2. Kontak veya temas ile kurutma	16
2.2.3. Radyasyon yolu ile kurutma	16
2.2.4. Dielektrik kurutma.....	16
2.2.5. Dondurarak (freeze) kurutma	17
2.3. Biyolojik Ürünlerin Kurutulması.....	17
2.3.1. Biyokimyasal süreç.....	17
2.3.2. Biyolojik ürünlerin kurutma süreci.....	18
2.3.3. Biyolojik ürünlerin kurutma sürecini modelleme.....	20
BÖLÜM 3. KURUTMA SÜRECİNİN KİNETİĞİ ve AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLENMESİ.....	23
3.1. Akışkan Yataklı Kesikli Kurutma Süreci	23
3.2. Model Denklemleri.....	25

3.2.1. Kuru madde denklği	25
3.2.2. Su denklği	26
3.2.3. Hava denklği	26
3.2.4. Enerji denklği	27
3.3. Su Verebilme Kapasitesi ve Kurutma Hızı.....	30
3.4. Deneysel Yöntem.....	32
3.5. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	32
3.5.1. Kurutma hızı sabitinin hesaplanması.....	32
3.5.2. Homojen modelleme benzetim sonuçları	35
BÖLÜM 4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GRANÜL	
BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLEMESİ	41
4.1. Eş Zamanlı Isı ve Kütle Aktarım Modeli	42
4.1.1. Difüzyon modeli	42
4.1.2. Isı aktarım modeli	43
4.2. Ürün Kalite Kaybının Modellenmesi.....	44
4.3. Modelde Kullanılan Parametreler ve Sabitler.....	45
4.4. Büzülme Granül Modeli	50
4.5. Büzülen Granül Modeli	51
4.6. Akışkan Yataklı Kurutma Fırın Modeli.....	53
4.7. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	54
4.7.1. Büzülme granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları.....	55
4.7.2. Büzülen granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları	58
BÖLÜM 5. EKMEK MAYASI KURUTMA SÜRECİNİN GENETİK	
ALGORİTMA TABANLI DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ	
.....	65
5.1. Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi.....	66
5.2. Genetik Algoritmalar	69
5.2.1. GA ile ilgili bazı tanımlar	69
5.2.2. Genetik algoritmaların temel prensipleri	69
5.3. Genetik Algoritma Tabanlı Doğrusal olmayan Öngörülü Denetleyici Tasarımı	77

5.4. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	79
5.4.1. Kontrol benzetim çalışmaları I	79
5.4.2. Kontrol benzetim çalışmaları II	84
5.4.3. Denetleyicinin geliştirilmesi	87
5.4.4. Bozucu durum etkisi	94
BÖLÜM 6. YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK BİR EKMEK MAYASI	
KURUTMA SÜRECİNİN MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ.....	98
6.1. Model Tabanlı Öngörülü Kontrol (MPC).....	99
6.1.1. MPC stratejisi	99
6.1.2. MPC elemanları	100
6.1.2.1. Öngörü modeli (Predictive Model).....	101
6.1.2.2. Nesnel fonksiyon	103
6.1.2.3. Kontrol kuralını elde etmek	104
6.2. Yapay Sinir Ağları (YSA)	105
6.3. YSA Tabanlı Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı.....	108
6.3.1. YSA ile nem kesri ve ürün aktivitesinin öngörü modeli	108
6.3.2. Model öngörülü kontrol yapısı	111
6.4. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	113
6.4.1. YSA ile yapılan öngörü modeli benzetim sonuçları.....	113
6.4.1.1. FFN tabanlı öngörü modeli sonuçları	113
6.4.1.2. Dinamik YSA tabanlı öngörü modeli sonuçları	119
6.4.2. Model öngörülü kontrol benzetim sonuçları.....	124
BÖLÜM 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	132
KAYNAKLAR.....	136
EK A. KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLEMESİNDE	
KULLANILAN BAZI PARAMETRELERİN HESABI.....	145
A.1. Maya Özgül Isısının Hesaplanması ($c_{p,y}$).....	145
A.2. Su Buharı Özgül Isısının Hesaplanması ($c_{p,wv}$).....	146
A.3. Buharlaşma Gizli Isısının Hesaplanması (ΔH_v).....	146
A.4. Siklondan Uzaklaşan Mayanın Kuru Madde Miktarı ve Su Miktarı	
Değişimlerinin Hesaplanması	147
A.5. Bağıl Nemin Hesaplanması (rH).....	149

EK B. KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLEMESİ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI	151
EK C. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GRANÜL BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLEMESİ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMLARI	158
C.1. Silindirik Granüllü Ekmek Mayasının Büzülen Granül Tabanlı Kurutma Modellemesi için Yazılan 1. Matlab Programı.....	158
C.2. Silindirik Granüllü Ekmek Mayasının Büzülen Granül Tabanlı Kurutma Modellemesi için Yazılan 2. Matlab Programı.....	162
EK D. GRANÜL BOYUTLU KURUTMA SÜRECİ MODELİNDE KULLANILAN NEM DİFÜZYONU VE SICAKLIK KISMİ DİFERANSİYEL DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMLERİ	167
D.1. Silindirik Büzülen Granülün Nem Kesri Kısmi Diferansiyel Denkleminin Explicit Yöntemi ile Çözümü	167
D.2. Silindirik Büzülen Granülün Nem Kesri Kısmi Diferansiyel Denkleminin Crank-Nicolson Yöntemi ile Çözümü	168
D.3. Silindirik Büzülen Granülün Sıcaklık Kısmi Diferansiyel Denkleminin Explicit Yöntemi ile Çözümü	169
D.4. Silindirik Büzülen Granülün Sıcaklık Kısmi Diferansiyel Denkleminin Crank-Nicolson Yöntemi ile Çözümü	171
EK E. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GENETİK ALGORİTMA TABANLI DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI	173
EK F. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI	183
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER	194
ÖZGEÇMİŞ	195

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

- a : Boyutsuz üs katsayısı
- a : Nöron çıkışı
- a_i : Denklem 4.11'de kullanılan ayarlanabilir parametreler ($i = 1,2,3,4$)
- a_w : Boyutsuz su hareketi
- b : YSA bias değerleri
- b_i : Denklem 4.11'de kullanılan ayarlanabilir parametreler ($i = 1,2,3,4$)
- $c_{p,a}$: Havanın özgül ısısı [J / kgK]
- $c_{p,m}$: Suyun özgül ısısı [J / kgK]
- $c_{p,s}$: Kuru maddenin özgül ısısı [J / kgK]
- $c_{p,y}$: Mayanın özgül ısısı [J / kgK]
- $c_{p,ww}$: Su buharının özgül ısısı [J / kgK]
- C : GAB eşitliğinde kullanılan ayarlanabilir parametre
- d_a : Havanın yoğunluğu [kg / m³]
- d_m : Suyun yoğunluğu [kg / m³]
- d_s : Kuru maddenin yoğunluğu [kg / m³]
- d_{ww} : Su buharı yoğunluğu [kg / m³]
- D : Difüzyon katsayısı [m² / s]
- D_a : Havadaki suyun yayınıcı [m² / s]
- D_{ref} : Referans difüzyon katsayısı [m² / s]
- $E_{a,i}$: Ürün kalitesi için aktivasyon enerjisi [J / mol]
- E_D : Difüzyon için aktivasyon enerjisi [J / mol]
- E_s : Aktivasyon enerjisi [J / mol]
- F : Bireyin fonksiyon (fitness) değeri
- g_i : Basamak girişleri için örneklenmiş çıkış değerleri
- h : Runge-kutta yöntemi için integrasyon aralığı [s]

- h_a^i : Hava ile giren enerji [J / s]
 h_a^o : Hava ile uzaklaşan enerji [J / s]
 h_i : Örnekleme çıkışı
 h_y^i : Maya ile giren enerji [J / s]
 h_y^o : Maya ile uzaklaşan enerji [J / s]
 H : Akışkan yataktaki enerji [J / s]
 $\dot{m}_{m,i}$: Partikül yüzeyindeki kütle akışı [kg / m²s]
 $\dot{T}_{T,i}$: Partikül yüzeyindeki ısı akışı [J / m²s]
 J : Toplam maliyet fonksiyonu
 J : Kurutma hızı [kg su / kg k.madde s]
 J_E : Enerji maliyet fonksiyonu
 J_Q : Ürün kalitesi maliyet fonksiyonu
 J_x : Nem kesri maliyet fonksiyonu
 k : Kurutma hızı katsayısı [1 / s]
 k : Kütle transfer katsayısı [m / s]
 k_e : Ürün aktivite kaybı hızı [1 / s]
 k_g : Gaz fazındaki kütle transfer katsayısı [m / s]
 k_∞ : Frekans faktörü [1 / s]
 K : GAB eşitliğinde kullanılan ayarlanabilir parametre
 L : Silindirin yüksekliği [mm]
 L_c : Kromozom boyu
 m_a^i : Kuru havanın giriş hızı [kg k. hava / s]
 m_a^o : Kuru havanın çıkış hızı [kg k. hava / s]
 m_y^i : Mayanın kuru madde içeriğinin giriş kütle hızı [kg / s]
 m_y^o : Hava yoluyla siklondan uzaklaşan kuru maddenin uzaklaşma hızı [kg/s]
 M_y : Fırın yatağındaki mayanın kuru madde kütlesi [kg]
 n : Benzetim adımı
 n : YSA'da geçiş fonksiyonu girişi
 N : Öngörü ufku
 N_l : Minimum öngörü ufku

- N_2 : Maksimum öngörü ufku
- P : Denklem 4.11'de kullanılan ayarlanabilir parametre
- P : Nöron girişi
- P : Optimizasyon ağırlık değeri
- p_c : Çaprazlama (crossover) olasılığı
- p_m : Mutasyon olasılığı
- P : Basınç [kPa]
- P_i : i. bireyin olasılık değeri
- P_s : Populasyondaki toplam birey sayısı
- P_{ws} : Havadaki su buharının doyma basıncı [kPa]
- r : Çaprazlama (crossover) işlemi için kesim noktası
- r : Hedef değeri
- r : Partikülün yarıçapı [mm]
- r_w : Buharlaşma yoluyla uzaklaşan suyun hızını [kg su / s]
- rH : Bağıl nem
- R : Nesnel fonksiyonunda kontrol değişkenlerine ait ağırlık değerleri
- R : Gaz sabiti [J / molK] 8,314
- R_d : Maksimum partikül yarıçapı [mm]
- R_0 : Büzülen model için başlangıç partikül yarıçapı [mm]
- q : Denklem 4.11'de kullanılan ayarlanabilir parametre
- q : Optimizasyon ağırlık değeri
- q^{-N} : N adım gecikme
- Q : Nesnel fonksiyonunda kontrol edilebilir değişkenlere ait ağırlık değ.
- Q : Ürün aktivitesi
- Q_d : Arzu edilen ürün aktivitesi
- t : Zaman [s,dk]
- t_d : Toplam kurutma zamanı [s]
- T : Sıcaklık [K]
- T_a : Akışkan yatağa giren havanın sıcaklığı [K]
- T_a^i : Giren havanın sıcaklığını [K]

T_a^o	: Çıkan havanın sıcaklığını [K]
$T_{c,w}$: Suyun kritik sıcaklığı 647.3 K
T_0	: Başlangıç yatak sıcaklığı [K]
T_r	: İndirgenmiş sıcaklık [K]
T_{ref}	: Referans Sıcaklık [K]
T_y^i	: Giren mayanın sıcaklığı [K]
T_y^o	: Siklonlardan uzaklaşan mayanın sıcaklığı [K]
u	: Kontrol değişkeni
u_a	: Havanın debisi [kg / s]
v	: Geometrik faktör
V	: Partikülün toplam hacim [m^3]
V_m	: Partikül içindeki suyun hacmi [m^3]
V_s	: Partikül içindeki kuru maddenin hacmi [m^3]
w	: Referans işaret
w	: YSA ağırlık değerleri
w_a^i	: Havanın taşıdığı su buharının giriş hızı [kg su buharı / s]
w_a^o	: Havanın taşıdığı su buharının çıkış hızı [kg su buharı / s]
w_y^i	: Mayanın su içeriğinin giriş kütleli hızı [kg / s]
w_y^o	: Hava yoluyla siklondan uzaklaşan suyun uzaklaşma hızı [kg / s]
W	: YSA'da kullanılan SxR boyutlu ağırlık matrisi
W	: GAB eşitliğinde kullanılan ayarlanabilir parametre
W_y	: Fırın yatağındaki mayanın içerdiği suyun kütlesi [kg]
x_i	: Kromozom
x'_i	: Genetik işlem sonrası elde edilen kromozom
X	: Nem kesri [kg su / kg kuru madde]
X_e	: İstenilen nem kesri [kg su / kg kuru madde]
X_0	: Başlangıç nem kesri [kg su / kg kuru madde]
X'	: Toplam tabanlı nem kesri [kg / kg toplam]
\bar{X}	: Partikül içerisindeki nem kesrinin ortalaması [kg su / kg kuru madde]
y	: Kontrol edilebilen değişken

Y	: Mayanın yüzde kuru madde oranı [kg su / kg toplam]
Y_a	: Havanın nem oranı [kg su buharı / kg kuru hava]
α	: Isı transfer katsayısı [J / m ² sK]
α_g	: Gaz fazındaki ısı transfer katsayısı [J / m ² sK]
β	: Optimizasyon ağırlık değeri
λ	: Maddenin termal iletkenliği [J / msK]
λ_a	: Havanın termal iletkenliği [J / msK]
γ	: Denklem 4.15'de kullanılan yardımcı parametre
ρ_m	: Partikül içerisindeki su konsantrasyonu [kg / m ³]
ρ_s	: Kuru maddenin kütle konsantrasyonu [kg / m ³]
$\rho_{wv,g}$: Yatak içindeki havanın su buharı konsantrasyonu [kg / m ³]
$\rho_{wv,i}$: Partikül yüzeyindeki su buharı konsantrasyonu [kg / m ³]
$\rho_{wv,sat}$: Havadaki doymuş su buharı konsantrasyonu [kg / m ³]
$\overline{\rho_m}$: Partikül içerisindeki su konsantrasyonu ortalaması [kg / m ³]
$\overline{\rho_s}$: Partikül içerisindeki k.maddenin kütle konsantrasyonu ort. [kg / m ³]
τ	: Büzülme katsayısı
τ	: Değişim aralığı
ΔH_v	: Suyun buharlaşma ısısı [J / kg]

YSA	: Yapay sinir ağları
MPC	: Model tabanlı öngörülü kontrol
MAC	: Model algoritma kontrol
GPC	: Genelleştirilmiş öngörülü kontrol
EPSAC	: Uzayan öngörülü adaptif kontrol
DMC	: Dinamik matris kontrol
MUSMAC	: Çoklu adım çok değişkenli adaptif kontrol
MURHAC	: Çoklu öngörülü kayan ufuklu adaptif kontrol
EHAC	: Uzayan ufuklu adaptif kontrol
FFN	: İleri beslemeli sinir ağları

RN	: Yinelene sinir ağları
GY Y	: Geriye yayılım yöntemi
IW	: Giriş katmanı ağrılık matrisi
LW	: Gizli katmanların ağrılık matrisi
GA	: Genetik algoritma
TDL	: Zaman gecikmesi
UPC	: Tek biçimli öngörölü kontrol



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Nem kesri (a) ve kurutma hızının (b) zamana bağlı değişimleri.	14
Şekil 2.2. Isı yayımlı (Konveksiyon) kurutma sistemi. (a) açık kurutma sistemi, (b) akışkan yataklı kurutma sistemi.....	15
Şekil 2.3. Biyokimyasal süreç yapısı (Kanarya 2002).....	18
Şekil 2.4. Ekmek mayası kurutma sürecinin granül tabanlı modelinin silindirik granül formu için bulunan kalite fonksiyonunun zamanla değişimi.....	20
Şekil 2.5. Biyolojik ürünlerin kurutma sürecinin modellenmesine ilişkin akış diyagramı (Kanarya 2002).....	21
Şekil 3.1. Kurutma modeli.....	24
Şekil 3.2. Enerji denklğine ait model akışı şeması.....	27
Şekil 3.3. Değişik yük (kg) koşulları altında nem kesri değişimi: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.....	32
Şekil 3.4. Değişik yük (kg) koşulları altında nem uzaklaşma hızları: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.....	33
Şekil 3.5. Değişik yük (kg) koşulları altında kurutma hızı sabitinin hesabı için z-t gösterimi: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.....	34
Şekil 3.6. Kurutucu yükünün fonksiyonu olarak kurutma hızı sabitleri.....	35
Şekil 3.7. Benzetimde kullanılan hava besleme profilleri.	35
Şekil 3.8. Homojen matematiksel modelin akış diyagramı.	36
Şekil 3.9. Akışkan yataklı ekmek mayası kurutma süreci modelinin benzetim sonuçları:fırın yatak sıcaklığı ve % kuru madde oranı.	37
Şekil 3.10. Kurutma süreci boyunca toplam uzaklaştırılan suyun (kg) zamanla değişimi.....	38
Şekil 3.11. Kurutma süreci boyunca nem kesrinin (kg su/kg k.madde) zamanla değişimi.....	38
Şekil 3.12. Buharlaşma hızı, mayanın su verebilme kapasitesi ve havanın su alabilme kapasitesinin zamanla değişimi.	39

Şekil 3.13. Fırın yatağındaki kuru maya ve suyun kurutma süreci sırasındaki kütleles değişimleri.	39
Şekil.4.1. Ürün aktivite kaybı hızının sıcaklık ve nem kesri ile olan ilişkisi.	45
Şekil.4.2. Difüzyon katsayısının sıcaklık ve nem kesri ile ilişkisi ($D_{ref}=1,5 \cdot 10^{-10} m^2/s$, $T_{ref}=323,15K (50 ^\circ C)$, $a=1,1066$, $X_e=0$, $X_0=1$).	46
Şekil 4.3. Ekmek mayası için nem kesrine bağlı olarak dört sıcaklık değerinde ölçülen (Josic 1982) ve hesaplanan a_w su aktivitesi profilleri ($C=23,5737$, $K=0,9458$, $W=0,0482$, $E_s=13.774$).	48
Şekil 4.4. Bir kurutma süreci sırasında büzülmeyen granülün şematik gösterimi.....	50
Şekil 4.5. Büzülen granülün kurutma sırasındaki davranışı.	51
Şekil 4.6. Akışkan yataklı kurutma fırını.....	53
Şekil 4.7. Akışkan yataklı kurutma sürecinin granül tabanlı matematiksel modelinin akış diyagramı.....	55
Şekil 4.8. Silindirik büzülmeyen granül içerisindeki nem kesri (a), sıcaklık (b) ve ürün aktivitesinin (c) zamana ve yarıçapa bağlı değişimleri ile ortalama sıcaklık, ortalama nem kesri ve ortalama ürün aktivitesinin kurutma süresince değişimleri (d) ($R_d = 0,5 \text{ mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ C$).	56
Şekil 4.9. Küresel büzülmeyen granül içerisindeki nem kesri (a), sıcaklık (b) ve ürün aktivitesinin (c) zamana ve yarıçapa bağlı değişimleri ile ortalama sıcaklık, ortalama nem kesri ve ortalama ürün aktivitesinin kurutma süresince değişimleri (d) ($R_d = 1,5 \text{ mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^\circ C$).	56
Şekil 4.10. Büzülmeyen silindirik granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde granül içerisindeki sıcaklığın zamanla ve yarıçapla değişimi. ($R_d = 5 \text{ mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ C$).	57
Şekil 4.11. Büzülmeyen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. Endüstriyel veriler: ort. sıcaklık (\square), % kuru madde kesri (Δ), ort. nem kesri (O), model benzetim sonucu (-) (silindirik: $R_0 = 0,5\text{mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ C$) (küresel: $R_0 = 1,5\text{mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^\circ C$).....	58
Şekil 4.12. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayası için granül içerisindeki nem kesrinin zamanla ve yarıçapla değişimi.	59

Şekil 4.13. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayası için granül içerisindeki ürün aktivitesinin zamanla ve yarıçapla değişimi.	59
Şekil 4.14. Silindirik büzülen granül yüzeyindeki su buharı konsantrasyonu ile havanın doymuş su buharı konsantrasyonunun değişimleri.	60
Şekil 4.15. Granülün büzülme katsayına göre yarıçap değişimi.	60
Şekil 4.16. Farklı sabit hava sıcaklıkları ($80^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$) için silindirik granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. ortalama nem kesri (a), ortalama sıcaklık (b), kuru madde kesri (c), ürün aktivitesi % (d).....	61
Şekil 4.17. Farklı sabit hava sıcaklıkları ($80^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$) için küresel granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. ortalama nem kesri (a), ortalama sıcaklık (b), kuru madde kesri (c), ürün aktivitesi % (d).....	61
Şekil 4.18. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. Endüstriyel veriler: ort. sıcaklık (\square), % kuru madde kesri (Δ), ort. nem kesri (O), model benzetim sonucu (-) (silindirik: $R_0 = 0,5\text{mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^{\circ}\text{C}$) (küresel: $R_0 = 1,5\text{mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^{\circ}\text{C}$)	62
Şekil 4.19. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde ürün aktivitesinin değişimi: model sonuçları (-), endüstriyel veriler (\blacksquare).	63
Şekil 4.20. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde yarıçap değişimi: endüstriyel veri (o), model sonucu (-).....	63
Şekil 4.21. Silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinin granül tabanlı modeli ile homojen modelinin karşılaştırılması Endüstriyel veriler: yatak sıcaklığı (\square), % kuru madde kesri (Δ), nem kesri (O), büzülmeyen granül tabanlı model (kesikli çizgi), büzülen granül tabanlı model (sürekli çizgi).	64
Şekil 5.2. Kurutma sürecinde maliyet fonksiyonunun hava sıcaklığına bağlı değişimi.	68
Şekil 5.3. Genetik algoritmanın akış diyagramı.	70

Şekil 5.4. Genetik algoritmalarda mutasyon işleminin bir kromozoma uygulanışı ($p_m = 0,05$ ve kromozom boyu =11).	71
Şekil 5.5. Genetik algoritmalarda çaprazlama işlemi ($r=3$).....	72
Şekil 5.6. Örnek 1'deki optimizasyon probleminin genetik algoritma ile çözümü. (kesik çizgiler maksimum, düz çizgiler ise ortalama değerlerdir).....	75
Şekil 5.7. Örnek 2'deki optimizasyon probleminin genetik algoritma ile çözümü. (kesik çizgiler minimum, düz çizgiler ise ortalama değerlerdir).....	76
Şekil 5.8. Ekmek mayası kurutma sürecinin doğrusal olmayan öngörülü kontrolü..	78
Şekil 5.9. Kurutma sürecinde kullanılan deneysel hava profilleri.....	79
Şekil 5.10. Silindirik granüllü ekmek mayası için değişik maliyet fonksiyonları yardımı ile yapılan optimizasyon benzetim sonuçları.	81
Şekil 5.11. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufku değerleri için ortalama nem kesri, ürün aktivitesi ve hava sıcaklığı değişimleri.	82
Şekil 5.12. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin iki öngörü ufku değeri için ortalama nem kesri, ürün aktivitesi ve hava sıcaklığı değişimleri.....	83
Şekil 5.13. Silindirik ve küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde $N=3dk$ ve $N=15dk$ için ürün aktivitesi, ortalama nem kesri ve ortalama sıcaklık değişimleri.	84
Şekil 5.14. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufukları için denetleyici çıkışları.	85
Şekil 5.15. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufukları için denetleyici çıkışları.	86
Şekil 5.16. Silindirik ve küresel granül için yapılan kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.17. Silindirik granül için yapılan kontrol benzetim sonuçları.	88
Şekil 5.18. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde hava sıcaklığı profilinin geçiş faktörüne bağlı olarak değişimi.	89
Şekil 5.19. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde değişik öngörü ufukları için bulunan kontrol profilleri.	90
Şekil 5.20. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma süreci için 2. denetleyici çıkışı hava sıcaklığı profilinin geçiş faktörüne bağlı olarak değişimi.....	91

Şekil 5.21. Küresel granüllü ekme mayası kurutma süreci için 1. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.	92
Şekil 5.22. 2. denetleyicinin iki öngörü ufku için verdiği çıkış profilleri.	93
Şekil 5.23. Silindirik granül için yapılan 1. ve 2. kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 5.24. Küresel granül için yapılan 1. ve 2. kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.25. Silindirik granüllü ekme mayası kurutma modelinin 1. bozucu etken karşısındaki benzetim sonuçları.....	95
Şekil 5.26. Silindirik granüllü ekme mayası için denetleyicinin 1. bozucu etken karşısında verdiği benzetim yanıtları.....	95
Şekil 5.27. Silindirik granüllü ekme mayası kurutma modelinin 2. bozucu etken karşısındaki benzetim sonuçları.....	96
Şekil 5.28. Silindirik granüllü ekme mayası için denetleyicinin 2. bozucu etken karşısında verdiği benzetim yanıtları.....	96
Şekil 6.1. MPC stratejisi.	100
Şekil 6.2. Genel bir MPC yapısı.	101
Şekil 6.3. YSA'nın eğitilmesi.....	105
Şekil 6.4. Basit bir nöron yapısı.....	105
Şekil 6.5. Tek katmanlı bir YSA'nın genel gösterimi.	107
Şekil 6.6. Ürün aktivitesinin öngörülmesi için tasarlanan RNN model yapısı.	109
Şekil 6.7. Nem kesrinin öngörülmesi için tasarlanan RNN model yapısı.	110
Şekil 6.8. YSA tabanlı model öngörülü kontrol yapısı.....	111
Şekil 6.9. YSA tabanlı model öngörülü kontrol akış diyagramı.....	112
Şekil 6.10. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ¹ : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x :FFN çıkışı, o :test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	116
Şekil 6.11. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ² : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x :FFN çıkışı, o :test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	116
Şekil 6.12. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ³ : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x :FFN çıkışı, o :test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	117

Şekil 6.13. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ¹ : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	117
Şekil 6.14. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ² : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	118
Şekil 6.15. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ³ : (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).....	118
Şekil 6.16. RNN tabanlı nem kesri (a) ve ürün aktivitesi (b) öngörü modellerinin eğitim sırasındaki karesel hatalarının adım sayısına bağlı değişimi.....	119
Şekil 6.17. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ¹ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	119
Şekil 6.18. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ² (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	120
Şekil 6.19. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ³ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	120
Şekil 6.20. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ⁴ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	121
Şekil 6.21. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu ⁵ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	121
Şekil 6.22. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ¹ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	122
Şekil 6.23. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ² (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	122
Şekil 6.24. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ³ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	123
Şekil 6.25. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ⁴ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	123
Şekil 6.26. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu ⁵ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).....	124
Şekil 6.27. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2 dk öngörü ufku için FFN ve RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları.	125

Şekil 6.28. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 3 dk öngörü ufku için FFN ve RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları.	125
Şekil 6.29. Kontrol edilebilir değişkenlerin optimizasyon ağırlıklarının akışkan yataklı kurutma sürecine etkisi.	126
Şekil 6.30. Kontrol değişkenlerinin optimizasyon ağırlıklarının akışkan yataklı kurutma sürecine etkisi.	127
Şekil 6.31. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 1 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.	128
Şekil 6.32. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.	128
Şekil 6.33. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 3 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.	129
Şekil 6.34. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 4 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.	129
Şekil 6.35. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin zamanla değişen öngörü ufku (e) için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.	130
Şekil 7.1. Ekmek mayası akışkan yataklı kurutma sürecinde doğrusal olmayan öngörülü kontrol uygulaması.	134
Şekil 7.2. Ekmek mayası akışkan yataklı kurutma sürecinde YSA kullanılarak model öngörülü kontrol uygulaması.	135
Şekil A.1. Maya özgül ısısının yüzde kuru madde oranına bağlı değişimi.	145
Şekil A.2. Su buharı özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.	146
Şekil A.3. Buharlaştırma gizli ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.	147

Şekil A.4. Sürüklenen maya ile uzaklaşan kuru madde kesrinin yataktan uzaklaşma hızı.	148
Şekil A.5. Sürüklenen maya ile uzaklaşan su kesrinin yataktan uzaklaşma hızı.....	148
Şekil A.6. Havadaki su buharının doyma basıncının sıcaklıkla değişimi.....	149



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Sabit hava sıcaklığı ve akış hızında değişik kurutucu yük koşulları altında nem uzaklaşma hızının maksimum değerleri	33
Tablo 4.1. Denklem 4.17’de kullanılan sabit değerler.....	47
Tablo 5.1. Optimizasyonda kullanılan genetik algoritma parametreleri.	77
Tablo 5.2. Silindirik granüllü ekmek mayası için değişik maliyet fonksiyonları yardımı ile yapılan optimizasyon benzetim sonuçları.	80
Tablo 5.3. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufku değerleri için kontrol sonuçları.	82
Tablo 5.4. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin iki öngörü ufku değeri için kontrol sonuçları.	83
Tablo 5.5. Silindirik granüllü ekmek mayasının değişik öngörü ufku değerleri için iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.	84
Tablo 5.6. Küresel granüllü ekmek mayasının öngörü ufku değerlerine bağlı iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.	85
Tablo 5.7. Silindirik granüllü ekmek mayasının tek kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.	88
Tablo 5.8. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin geçiş faktörüne bağlı olarak yapılan kontrol benzetim sonuçları.....	89
Tablo 5.9. Silindirik granüllü ekmek mayasının iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.	90
Tablo 5.10. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2. denetleyici kullanılarak yapılan geçiş faktörüne bağlı benzetim sonuçları.....	91
Tablo 5.11. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 1. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.	91
Tablo 5.12. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.	92
Tablo 6.1. YSA’da kullanılan temel geçiş fonksiyonları (Matlab® 2002).	106

Tablo 6.2. ¹ Nem kesri ve ² ürün aktivitesi öngörü modelleri için YSA parametreleri.	109
Tablo 6.3. FFN tabanlı nem kesri ve ürün kalitesi öngörü modelleri için kullanılan eğitim datalarından birkaçı.	114
Tablo 6.3.(Devam) FFN tabanlı nem kesri ve ürün kalitesi öngörü modelleri için kullanılan eğitim datalarından birkaçı.	115
Tablo A.1. Maya özgül ısısı ($c_{p,y}$) denkleminde (A.1) kullanılan sabit C değerleri.	145
Tablo A.2. Su buharı özgül ısısı ($c_{p,wv}$) denkleminde (A.3) kullanılan sabit C değerleri.	146
Tablo A.3. Denklem A.6’da kullanılan sabit C değerleri.	147
Tablo A.4. Denklem A.7’de kullanılan sabit C değerleri.	147
Tablo A.5. Denklem A.9’da kullanılan sabit C değerleri.	149



BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlu yıllarca değişik amaçlar doğrultusunda sürekli bir şeyleri kurutma uğraşı vermiştir. Kurutma temelde çok eskilere dayanmasına karşın, esas olarak teknolojinin de gelişmesine paralel olarak 20. yüzyıldan sonra endüstriyel anlamda ortaya çıkmış bir süreçtir. Hızla gelişmekte olan kurutma süreçleri, 1960'lı ve 1970'li yıllardaki Ortadoğu krizi ile birlikte fırlayan enerji maliyetleri yüzünden durağan bir hale girmiş ve endüstriyel süreçler arasındaki liderliğini kaybetmiştir. Artan enerji maliyetleri endüstriyel süreçlerin maliyet analizlerinin yapılmasına yol açmıştır (Traub 2004). Kurutma süreçlerinin maliyetlerinin azaltılabilmesi için yalnızca enerji veriminin sağlanması yeterli bir çözüm olmayıp, kurutulacak ürüne göre kurutucu tipinin de doğru olarak belirlenmesinde fayda vardır.

Bu tez çalışmasının ilk kısmında biyolojik bir ürün olan ekmek mayasının (*Saccharomyces cerevisiae*) akışkan yataklı kurutma süreci için iki model geliştirilmiştir. Birinci matematiksel model, enerji ve kütle denklğine dayanan homojen modeldir. Bu model yapısında yatak sıcaklığı birinci dereceden adi bir diferansiyel denklem olarak bulunmuş ve çözümü ayrık zamanda dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile yapılmıştır. Ekmek mayasının endüstriyel akışkan yataklı kurutma sürecinden alınan veriler ile model test edilmiştir.

İkinci model, kurutma süresince granül içerisindeki nem kesri ve sıcaklık profillerini hesaplayan model denklemlerinden oluşmaktadır. Granül içerisindeki nem difüzyonu ve sıcaklık değişimleri ikinci dereceden parabolik doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ayrık zamanda Crank-Nicolson yöntemi ile çözülmüştür. Kurutma süresince kurutulan granülün yapısındaki fiziksel değişimler göz önüne alınarak, model büzülen granül tabanlı kurutma modeli olarak geliştirilmiştir.

Ekmek mayasının ürün aktivitesi modellenmesinde, Lievense (1991) tarafından *Lactobacillus plantarum* bakterisi için yapılan aktivite modeli kullanılmış ve ekmek mayasının endüstriyel kurutma sürecinden alınan ürün aktivite verileri ile model deneysel verilere uydurulmuştur. Geliştirilen ürün aktivitesi modeli granül tabanlı modele ilave edilerek model tamamlanmıştır. Model endüstriyel veriler ile dört benzetim durumu için test edilmiştir. İlk iki benzetim büzülmeyen silindirik ve küresel granül formlu ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma süreci için yapılmıştır. Son iki benzetim de büzülen silindirik ve küresel granül formlu ekmek mayası ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasının ikinci kısmında akışkan yataklı kurutma sürecinin enerji maliyetine, ekmek mayasının ürün aktivitesine ve nem kesrine bağlı bir optimizasyon problemi tanımlanmış ve problemin karmaşıklığı sebebi ile genetik arama algoritması ile çözüm yapılmıştır. Değişik öngörü ufukları için silindirik ve küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin doğrusal olmayan öngörülü kontrol benzetimleri yapılmış ve endüstriyel ekmek mayası kurutma sürecinden alınan veriler ile kontrol sonuçları karşılaştırılmıştır. Kontrol değişkeni olarak önce yalnızca havanın sıcaklığı düşünülmüş, daha sonra ise havanın sıcaklığının yanı sıra havanın nem kesri de kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır.

Kontrol çalışmalarında ikinci aşama olarak, günümüz kontrol uygulamalarında sıkça kullanılan model tabanlı öngörülü denetimin ekmek mayası akışkan yataklı kurutma sürecine uygulanmasına yer verilmiştir. Akışkan yataklı ekmek mayası kurutma sürecinde nem kesri ve ürün aktivitesinin öngörü modelleri dinamik yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılmıştır. Nem kesri ve ürün aktivitesi için ileri beslemeli sinir ağları (FFN: feedforward neural network) ile yinelemeli sinir ağları (RNN: recurrent neural network) olmak üzere iki YSA modeli tasarlanmıştır.

Daha sonra model öngörülü kontrolün önemli yapı taşlarından birisi olan optimizasyon problemi belirlenmiş ve optimizasyon probleminin çözümü için karmaşıklığından dolayı genetik arama algoritması kullanılmıştır. Tasarlanan model öngörülü kontrolör benzetim bazında test edilmiştir. Benzetimlerde RNN yapısı ile FFN yapısı karşılaştırılarak, RNN yapısının başarısı ortaya çıkarılmıştır.

Endüstriyel kurutma süreçleri ile ilgili bilimsel çalışmaları genel olarak iki kısımda inceleyebiliriz.

1.1. Kurutma Süreçlerinin Modellenmesi

Günümüzde Traub (2004) tarafından endüstriyel süreçlerin külkedisine benzetilen kurutma süreçleri, kimyadan gıda endüstrisine kadar her alanda kullanılmaktadır. Kurutmada temel amaç kurutulacak malzemedeki suyun uzaklaştırılmasıdır. Bu uzaklaştırma işlemi çeşitli yöntemlerle yapılabilir: ısı yayımlı, direkt, radyasyon, dielektrik, dondurarak kurutma, v.s. Kurutulacak ürünler yapıları gereği birbirinden farklı özellikler gösterirler. Bu nedenle her ürünü aynı yöntemle veya aynı tür kurutucu ile kurutmak mümkün değildir.

Enzimler, bakteriler, maya kültürleri gibi mikrobiyolojik ve biyolojik ürünlerin kurutulmasında, mikroorganizmaların canlılığı ve kapasitelerinin artırılması gibi özelliklerin geliştirilmesinde kurutma süreçleri önemli rol oynarlar. Bu tür ürünler kurutma koşullarına karşı çok hassas davranış gösterdiklerinden dolayı, kurutma süreçlerinde ürünlerin hangi özelliklerinin kaliteyi etkilediğini iyi tespit etmek gerekir. Ürün kalitesi üzerinde pek çok etken rol oynamakta olup, bu etkenlerden en önemlileri sıcaklık ve nem kesridir (Lievense 1991). Biyolojik ürünlerin kurutma ve saklama sırasında çevre koşullarına olan hassasiyetleri sebebi ile bu süreçler ürün kalitesini fazla düşürmeyecek şekilde yürütülmelidir.

Kurutma teknolojisinin en önemli yanlarından biri, kurutma süreçlerinin fiziksel özelliklerine dayalı matematiksel modellemelerinin yapılmasıdır. Modelleme, modellenecek sistemi tamamen tanımlayacak bir matematiksel denklemler sisteminin oluşturulması temeline dayanır (Strumillo and Kurda 1986). Kurutma süreçleri genelde doğrusal olmayan süreçlerdir ve bu tür süreç modelleri oldukça zor ve karmaşık çözümler gerektiren denklemlerden oluşmaktadır. Tüm kurutma süreçleri ile ilgili genel bir matematiksel model olmadığı gibi, çoğu kurutma modellemeleri de özel parametreler içermektedir. Literatürde kurutma süreçlerinin matematiksel modellenmesi ile ilgili birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Quirijns ve diğ. (1998) kurutma sırasında granül içerisindeki nem kesri, sıcaklık ve ürün aktivitesi profillerini geliştirdikleri matematiksel model ile çözmeye çalışmışlardır. Benzetim çalışmaları *catalase* enzimi kullanılarak yapılmış ve granül içerisindeki nem, sıcaklık ve ürün aktivitesi profilleri çalışmada sunulmuştur.

Liou ve Bruin (1981ab) tarafından kurutma süreçlerinin doğrusal olmayan difüzyon problemi için bir yaklaşım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde difüzyon katsayısı ile nem kesri arasında üstel bir ilişki ($D=X^a$) tanımlanmıştır.

Heinrich ve diğ. (2004) tarafından bir püskürtmeli akışkan yatak kurutma süreci için ısı ve kütle aktarım modelleri geliştirilerek, akışkan yataktaki granül içerisindeki nem kesri profili bulunmaya çalışılmıştır.

Peglow ve diğ. (2004) iki fazlı bir akışkan yatak kurutma modeli geliştirmişlerdir.

Hadrich ve diğ. (2004) tarafından kurutma süresince büzülen bir silindirik granül içerisindeki ısı ve kütle aktarımının modellenmesi ve benzetim çalışmaları sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında muzun kurutma sürecine ait deneysel verilerle model sonuçları karşılaştırılarak model başarımı gösterilmiştir.

Robbins ve diğ. (2003) tarafından arpanın yüksek sıcaklıklardaki püskürtmeli yatak kurutma süreci için sıcaklık ve nem öngörü modelleri geliştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında değişik hava besleme sıcaklıkları için yatak sıcaklığı ve nem profilleri bulunmuştur.

Parry (1985) tarafından tarımsal hububat kurutma süreçlerinde kütle ve ısı transferinin matematiksel modellenmesi geliştirilmiş ve model benzetim bazında test edilmiştir.

Kerkhof (2000) tarafından biyolojik ürünlerin akışkan yatak kurutma sürecinin modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmış ve akışkan yatak kurutma süreci için biyolojik ürünlerin bazı özellikleri sonuçlar kısmında tartışılarak ele alınmıştır.

Luyben ve diğ. (1982) enzimlerin kurutma süreçleri üzerine bir model çalışması yapmış ve kurutma sırasındaki enzim aktivitesini incelemiştir.

Temple ve diğ. (1999abc) tarafından siyah çayın akışkan yataklı kurutma süreci için kurutma hızı ve su aktivitesi fonksiyonu deneysel veriler yardımı ile çıkarılmış ve kurutma sürecinin kütle ve enerji denklığıne dayalı bir homojen model geliştirilmiştir.

Coumans (1987) kurutma süreçlerindeki nem difüzyonunun hesabı ile ilgili bir teori geliştirmiş ve kurutma süreçlerindeki büzülmei incelemiştir.

Kanarya (2002) akışkan yataklı kurutma sürecinin matematiksel modeli üzerine çalışmıştır. Modelleme çalışması enerji ve kütle denklığıne dayanmakta olup, akışkan yatak fırın modeli de genel modele dahil edilmiştir.

Togrul ve diğ. (2003) tarafından kayısının kurutma kinetiklerinin modellenmesi yapılmıştır.

Lievense (1991) tarafından *Lactobacillus plantarum* bakterisi için yapılan ürün aktivitesi modelleme çalışmasında, ürün aktivitesi sıcaklık ve nem kesrinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

Kroes (1999) kurutulacak malzemenin özelliklerinin kurutma kinetikleri üzerindeki etkisi üzerine geniş bir çalışma yapmıştır.

Vitor ve diğ. (2004) tarafından kesikli bir akışkan yatak kurutucusundaki *tapioca* biyolojik ürününün kurutma sürecinin, gaz ve katı fazlarına bağlı olarak ısı ve kütle aktarım katsayılarının kestirimi amaçlanmış ve bir katı, iki sıvı faz olmak üzere üç faz ele alınarak bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Li ve diğ. (2004) tarafından fotosentetik mikro organizma sıvısının ve karışık kültürlü hayvan gıdasının akışkan yataklı kurutma süreci ile ilgili deneysel çalışmalar

yapılmış ve sonuçlar kısmında ürün aktivitesi ile nem kesrindeki değişimler incelenmiştir.

Kurutma süreci modellemesi yapılırken genelde ürün kalitesi dikkate alınmaz. Ancak maya kültürleri, enzimler ve bakteriler gibi biyolojik ürünlerin kurutulmasında, maddede fiziksel değişiklikler haricinde biyokimyasal değişiklikler, kimyasal reaksiyonlar da olabilir ve bu değişiklikler doğrudan kurutma sonunda elde edilen ürün kalitesinin düşmesine sebep olur. Bütün bunlardan dolayı bu tür ürünler için ürün aktivitesi modelleri geliştirmek gereklidir (Lieveense 1991, Verdijck 2003). Ürün aktivitesi modelini geliştirmek için kurutulacak ürünün özelliklerini iyi bilmekte fayda vardır. Ekmek mayası, (*Saccharomyces cerevisiae*) ısıya duyarlı bir biyolojik üründür. Bu yüzden kurutulmasında genelde akışkan yataklı kurutucular tercih edilmektedir (Strumillo and Kurda 1986). Ekmek mayası düşük nem kesirlerinde granül içindeki bağıl nemin uzaklaşmasına karşı direnç gösterir. Bu nedenle kurutma süreçlerinin son evresinde biyopolimerler ve hücre zarları üzerinde çok fazla zararlar görülebilmektedir. Özellikle maya hücresi üzerindeki bozulmalar ürünün kalitesini düşürmekte ve saklama süresini de kısaltmaktadır. Ekmek mayasının (*Saccharomyces cerevisiae*) kurutma süreçlerindeki davranışları ile ilgili literatürdeki birkaç çalışma aşağıda özetlenmiştir.

Zimmermann ve Bauer (1986) ekmek mayasının ürün aktivitesi üzerinde kurutma sürecinin etkilerini araştırmış ve ekmek mayasında kullanılan iki değişik enzimin deneysel verileri ile model sonuçlarının karşılaştırmasını yapmıştır.

Josic (1982) tarafından ekmek mayasının üretimi için gerekli süreç koşullarının optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada ekmek mayasının kurutma sırasındaki fiziksel ve kimyasal değişimleri incelenmiştir.

Bayrock ve diğ. (1997ab) ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecindeki kurutma hızı, nem kesri, sıcaklık gibi değişimlerini inceleyen bir çalışmada bulunmuştur.

1.2. Kurutma Süreçlerinin Kontrolü

Gıda endüstrisindeki biyolojik ürünlerin kurutma süreçlerinde ulaşılması gereken birçok hedefi sıralamak mümkündür:

- makinelerin üretim verimini arttırmak,
- işçilerin üretim verimini arttırmak,
- ürün kayıplarını azaltmak,
- ürün kalitesinin belirli bir çerçeve etrafında koruyabilmek (renk, tat, koku, yumuşaklık v.s.),
- sürecin ve makinelerin esnekliğini arttırmak,
- biyolojik ürünlerin doğal değişkenliklerinin etkilerinin azaltmak,
- biyolojik ürünlerin doğal bozulma etkilerini azaltmak,
- üretim ve sürecin hijyenliğini arttırmak.

Yukarıdaki hedefleri yakalayabilmek için kurutma süreçlerinde kullanılan birçok kontrol uygulaması vardır: PD, PI, PID, optimal kontrol, model tabanlı öngörülü kontrol, bulanık kontrol, yapay sinir ağları ile kontrol, v.s.

Kurutma süreçleri, genellikle ürünleri daha kısa sürede kurutabilmek için yüksek enerji maliyetleri ile karşımıza çıkmaktadır. Ancak yüksek sıcaklıklarda özellikle biyolojik ürünlerin kurutulmasında ürün aktivitesi düşmektedir. Kurutma sürecinin enerji maliyetini minimize etmek, ürün kalitesini istenen seviyede tutmaya çalışmak ve arzu edilen nem kesri değerine en kısa sürede ulaşabilmek için öncelikle bir optimizasyon probleminin tanımlanması gerekmektedir. Tanımlanan optimizasyon probleminin çözüm sınırları belirlenmeli ve bu sınırlar dahilinde çözüme ulaşılması hedeflenmelidir. Biyolojik ürünlerin kurutma süreçlerinin optimizasyonu ve optimal kontrolü ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Filho ve diğ. (1997) tarafından büyük ölçekli kurutucular için uygun optimal çalışma kontrol yöntemi geliştirilmiştir.

Soares ve diğ. (2004ab) dinamik programlama tekniklerinin adaptasyonu ile düşük sıcaklıklarda mısır kurutmasının optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Optimizasyon algoritması enerji tüketiminin minimizasyonu ve ürün kalitesinin artırılması temeline dayandırılmış ve OtimSec adı verilen bir bilgisayar programı yardımı ile kurutma sürecinin optimizasyonu başarılmıştır. Benzetim çalışmalarında OtimSec programı ile kurutma sürecinin çeşitli durumları için çözümler sunulmuştur.

Quirijns ve diğ. (2000ab) tarafından akışkan yataklı kurutma süreçlerinin statik ve dinamik optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon süreci için ürün kalitesi ve enerji tüketimine dayalı bir maliyet fonksiyonu oluşturulmuştur. Optimizasyon probleminin çözümünde sayısal yöntemler kullanılmış ve benzetim çalışmalarında optimal kurutma süresi 1000 sn olarak bulunmuştur.

Perez ve diğ. (2004) yapışkan şeritlerin üretim sürecinin adımlarından birisi olan solventin kurutulması ile ilgili bir optimizasyon çalışması yapmıştır.

Stakic ve diğ. (2004) tarafından tarımsal malzemelerin çalışma bölgelerinin optimizasyonu ve ısı yayınlı kurutucunun kolayca dizaynını sağlamak için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Chen ve diğ. (2004) sonsuz zaman düzleminde doğrusal olmayan kuadratik optimal kontrol problemi için bir yaklaşım yöntemi sunmuştur. Bu yöntem, bir Riccati eşitliği ve bir cebirsel denklemler serisinin çözümünü içerir ve doğrusal olmayan sistemlerin çoğunda uygulanabilir.

Parker ve diğ. (2001) tarafından bir doğrusal olmayan model kullanılarak sürekli bir bioreaktörün optimal kontrol uygulaması yapılmıştır.

Kowalski ve diğ. (1997) kurutma malzemelerinin yapısının kurutma sürecine etkisini inceleyerek, kurutma süreci boyunca ürün bozulmasını engellemek için bir optimal kontrol sistemi geliştirmiştir.

Luna-Solano ve diğ. (2005) tarafından bira mayasının püskürtmeli kurutma (spray drying) sürecinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Trlea ve diğ. (1997) kesikli süreçlerin doğrusal olmayan optimal kontrolü üzerine bir çalışma yapmış ve bu yaptığı kontrol çalışmasını mısır kurutma sürecine uygulamıştır.

Optimizasyon problemlerinin analitik çözümlerinin kimi zaman karmaşık olması nedeniyle, çeşitli sayısal arama algoritmaları problemin çözümünde kullanılmaktadır. Bu arama yöntemlerden birisi de doğal genetik bilimini temel alan genetik algoritmalarıdır (Goldberg 1989). Genetik arama algoritmaları yaklaşımı literatürde son zamanlarda çeşitli optimal kontrol uygulamalarında göze çarpmaktadır. Aşağıda bazıları özetlenmiştir.

Na ve diğ. (2002) genetik algoritmaları kullanarak kesikli maya kültürü sürecinin adaptif optimizasyonu üzerine deneysel ve benzetimsel çalışmalar yapmışlardır.

Sarkar ve diğ. (2003) tarafından genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş, kesikli bioreaktörlerin optimal çalışabilmeleri için gerekli besleme profilleri bu algoritma yardımı ile hesaplanmıştır. Önerilen algoritmanın yeterliliği yapılan iki fermantasyon benzetim çalışması ile gösterilmiştir.

Roubos ve diğ. (1999) tarafından genetik algoritmalar kullanılarak global optimizasyon probleminin çözümü yapılmış ve bir kesikli bioreaktörün optimal kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Son yıllarda doğrusal olmayan süreçlerin kontrol uygulamalarında model öngörülü denetimin kullanımı artmıştır. Literatürde ve endüstride çok sayıda model öngörülü kontrol çalışması yapılmıştır. Bunlardan bazılarına kısaca şu şekilde sıralamamız mümkündür:

Dufuor, Laurent ve diğ. (2004) kızılötesi kurutma sürecinin doğrusal olmayan difüzyon model tabanlı öngörülü kontrolü ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında model öngörülü kontrol yaklaşımı, ölçülemeyen nem profilini kestirebilecek bir gözlemci temeline dayanmaktadır.

Wang ve diğ. (2004ab) tarafından model öngörülü kontrol yapılarında kararlılık ve referans yörüngesi takibinin daha iyi yapılabilmesi için yeni bir gürbüz model teori ve hesaplama yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntem doğrulanması için açık döngü kararsız bir sisteme, bir ısıtıcı sistemine ve bir ayırıştırma sistemine uygulanmıştır.

Dufuor, Michaud ve diğ. (2004) kısmi diferansiyel denklemlere dayalı model öngörülü kontrol yaklaşımı geliştirerek, bu yaklaşımı çevrim dışı (off-line) ve çevrim içi (on-line) optimizasyonda kullanmışlardır.

Dufuor, ve diğ. (2003) tarafından bir deneysel kurutma sürecinin doğrusal olmayan model öngörülü kontrolü yapılmıştır. Doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlere sahip bir sistemin ayrık zamanda çözümü yapılmış ve daha sonra ayrık zaman davranışı çerçevesinde sürekli zamanda öngörülü kontrol ile optimal değişkenler bulunmaya çalışılmıştır.

Roux ve diğ. (2004) bir yarı kesikli reaktörün doğrusal olmayan öngörülü kontrol uygulamasını yapmışlar ve sürecin kontrolünde karşılaşılan temel zorlukları çalışmalarında dile getirmişlerdir. Benzetim çalışmalarında ise PID ve öngörülü kontrol performansları karşılaştırılarak, öngörülü kontrolün başarısı gösterilmiştir.

Ozkan ve diğ. (2000) doğrusal modeller kullanarak doğrusal olmayan sistemlerin model tabanlı öngörülü kontrolü üzerine bir çalışma sunmuşlardır.

Roubos ve diğ. (1999) tarafından yapılan çalışma ile Takagi-Sugeno modelleri kullanılarak, model öngörülü kontroldeki önemli parametrelerden biri olan doğrusal olmayan süreçlerin öngörü modellemesine katkıda bulunulmuştur.

Model tabanlı öngörülü kontrolde iki ana problem karşımıza çıkmaktadır: Doğrusal olmayan sürecin öngörü modelini oluşturmak ve bu modeli kontrol sistemine adapte etmek. Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde en çok kullanılan yöntem gösterdiği başarı nedeniyle yapay sinir ağlarıdır. Bu sebeple ötürü özellikle doğrusal olmayan sistemlerin öngörü modelleri yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılır. YSA'nın kullanıldığı model tabanlı öngörülü kontrol ile ilgili yapılan çalışmaların birkaçına kısaca bir göz atalım:

Bahar ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada, bir endüstriyel arıtma sisteminin model öngörülü kontrolünde öngörü modeli bir YSA ile tasarlanmıştır. Yapılan YSA modelinde birincisi 36 nöron, ikincisi 12 nörondan oluşan iki gizli katman kullanılmıştır.

Chu ve diğ. (2003) ileri beslemeli ve dışarıdan yinelenen (external recurrent network) sinir ağları kullanarak çok adımlı bir model öngörülü kontrol yapısı tasarlamışlar ve bu kontrol algoritmasını doğrusal bir sistemde, sürekli karıştırılmalı tank reaktöründe ve etanol su ayrıştırma süreçlerinde uygulayarak, tasarlanan kontrol yapısının başarısı göstermişlerdir.

Castellanos ve diğ. (2002) tarafından bir akışkan yataklı kurutma sürecinin modelleme çalışmasında, kurutulan ürünün nem kesrinin öngörülebilmesi için YSA kullanılmıştır. YSA 3 katmanlı, girişte 4, gizli katmanda 4 ve çıkış katmanında ise 1 nöron kullanılarak tasarlanmıştır. YSA eğitiminin geliştirilmesinde öğrenme katsayısı ayarı, eğitim verilerinin seçimi gibi önemli parametreler öne çıkarılmıştır. YSA % \mp 1,57 oranında hata ile nem kesrini öngörmüştür.

Moura ve diğ. (2004) tarafından geriye yayılım algoritması ile ileri beslemeli sinir ağları modeli, *Polymnia sonchifolia*'nın kurutulmasında parametre öngörüsü için kullanılmıştır.

1.3. Tez Organizasyonu

Yapılan tez çalışmasının organizasyonu aşağıda verildiği şekildedir:

Bölüm 2'de kurutma süreçlerinin temelleri, kurutma yöntemleri ve biyolojik ürünlerin kurutma süreçleri kısaca anlatılmıştır.

Bölüm 3'de ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma süreci için kütle ve enerji denkliğine dayanan bir homojen model tasarımı ayrıntıları ile verilmiştir. Yapılan modelin endüstriyel verilerle test edilerek başarısı bu bölümün sonuçlar ve değerlendirmeler kısmında yer almaktadır.

Bölüm 4’de Bölüm 3’de verilen homojen modelin kurutma sürecinin son periyodundaki deneysel verilerle uyumu tam olarak yakalayamaması nedeniyle granül tabanlı kurutma modeli adı altında bu çalışmada geliştirilen yeni bir matematiksel model yer almaktadır. Bu modelde önce difüzyon ve ısı aktarım modeli verilmiş, daha sonra ürün kalite kaybı modeli ilave edilerek model geliştirilmiştir. Modelde kullanılan parametre ve sabitlerin verilmesinin hemen arkasından büzülen granül modeli üzerinde durulmuş ve model bir adım daha ileriye götürülerek büzülen granül tabanlı kurutma modeli halini almıştır. Sonuçlar ve değerlendirmeler kısmında tasarlanan matematiksel modelin büzülen ve büzülmeyen ekmek mayası granülü için benzetimler yapılmış ve modelin başarısı irdelenmiştir.

Bölüm 5’de, ekmek mayası kurutma sürecinin kontrol yapısı için öncelikle enerji maliyeti, nem kesri ve ürün aktivitesine bağlı olarak bir optimizasyon problemi tanımlanmış, daha sonra problemin karmaşık yapısından dolayı çözümünde kullanılacak genetik algoritmalar kısaca anlatılmıştır. Genetik algoritma kullanılarak doğrusal olmayan öngörülü kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra sonuçlar ve değerlendirmelerde değişik durumlar için her iki granül yapısının benzetimleri yapılmıştır. Bölümün sonunda, tasarlanan kontrolörün bozucu durumda verdiği cevaplar gösterilmiştir.

Bölüm 6’da, son yılların gözde kontrol algoritmalarından olan model tabanlı öngörülü kontrol yapısı kısaca anlatılmış, ardından öngörü modeli olarak düşünülen yapay sinir ağlarının temelleri verilmiştir. YSA tabanlı model öngörülü kontrolör tasarımında önce YSA ile nem kesri ve ürün aktivitesi öngörü modelleri verilmiş daha sonra kontrolör yapısı anlatılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar ve değerlendirmeler kısmında ise YSA ile yapılan öngörü modellerinin testleri verilmiş, son olarak da tasarlanan kontrol yapısı test edilerek kontrol başarımı gösterilmiştir.

Bölüm 7’de yapılan tez çalışması ile ilgili genel sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2. KURUTMA SÜREÇLERİ

Kurutma, temel olarak su ve kuru maddeden oluşan bir ürünün içindeki suyun çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılma işlemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntemlerden bazıları, ısı yayımlı (convective) kurutma, direkt (contact) kurutma, radyasyon kurutma, dielektrik kurutma, dondurarak (freeze) kurutma, osmotik kurutma ve akışkan yataklı kurutma şeklinde sayılabilir. Bu bölümde önce kurutma sürecinin temelleri, ardından temel kurutma süreçleri ve en son olarak da biyolojik ürünlerin kurutulması ele alınacaktır.

2.1. Kurutma Sürecinin Temelleri

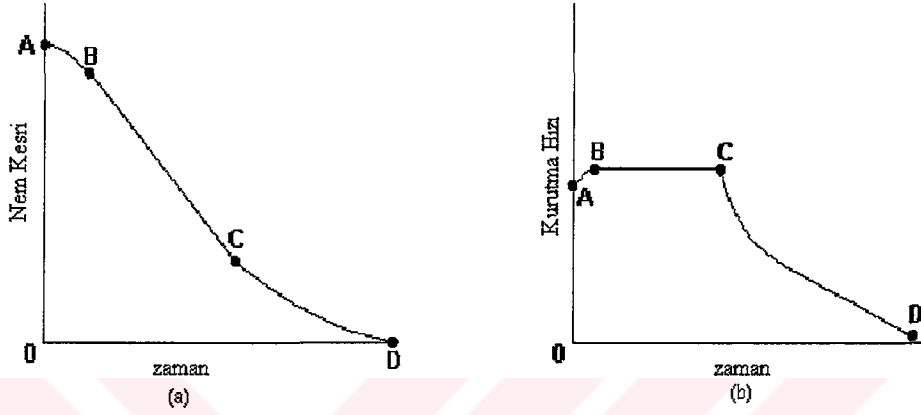
Kurutma sürecinin temel hedefi ürün içindeki suyun (nem) uzaklaştırılmasıdır. Nem iki ayrı gruba ayrılır: bağıl nem ve bağıl olmayan nem. Katı içinde sıvı formda hapsedilmiş olarak bulunan neme bağıl nem denir ve bu nemin buhar basıncı saf suyunkinden daha azdır. Bağıl nemin katı içinde aşırı miktarda bulunması durumundaki fazla neme de bağıl olmayan nem adı verilir. Maddenin taşıdığı suyun kuru maddeye oranı nem kesri olarak adlandırılır (Strumillo and Kudra 1986). Nem kesri iki şekilde ifade edilebilir: kuru temel ve yaş temel:

$$\text{kuru temel: } X = \frac{\Omega_{su}}{\Omega_{km}} \quad (2.1)$$

$$\text{yaş temel: } X = \frac{\Omega_{su}}{\Omega_{top}} \quad (2.2)$$

Burada X nem kesrini (kg/kg), Ω_{su} maddenin içerdiği nem kütlesini (kg), Ω_{km} maddenin içerdiği katı kütlesini (kg) ve Ω_{top} ise maddenin toplam kütlesini (kg) göstermektedir. Maddeyi çevreleyen havadaki su buharı ile madde içerisindeki nemin denge durumuna gelmesi ile teorik olarak maddenin kurutulması sona erer. Bu denge durumundaki nem kesrine denge veya minimum nem kesri adı verilir.

Maddenin bütün boşluklarının su ile dolması durumundaki hal, maksimum nem kesri olarak adlandırılır. Kurutma sırasında madde önce doymuş yüzeyinden buharlaşma ile suyunu havaya verir. Daha sonra bu doymuş yüzey azalır ve en sonunda madde granülünün iç bölgelerinden su kaybetmeye başlar. Şekil 2.1’de bir maddenin kurutulması sırasında nem kesrinin ve kurutma hızının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Nem kesri (a) ve kurutma hızının (b) zamana bağlı değişimleri.

Şekil 2.1’den de görüleceği üzere kurutma süreci farklı alt bölümlerden oluşmaktadır. A-B bölümüne ısınma periyodu, B-C bölümüne sabit hız periyodu ve son bölüm olan C-D bölümüne ise azalan hız periyodu adı verilir. C noktasındaki nem kesrine kritik nem kesri denilmektedir. İkinci periyot olan sabit hız periyodunda, kurutulmuş maddenin su verebilme kapasitesi havanın su alabilme kapasitesine eşittir. Kurutma hızı yüzeye aktarılan ısı oranı ile kontrol edilir. Yüzeydeki su buharlaşma yolu ile yüzeyini çevreleyen hava tabakasına geçer. Sabit kurutma hızını etkileyen üç faktör vardır: ısı ve kütle aktarım katsayıları, kurutulacak maddenin yüzeyi, hava ve madde yüzeyi arasındaki sıcaklık ve nem kesri farklılıkları.

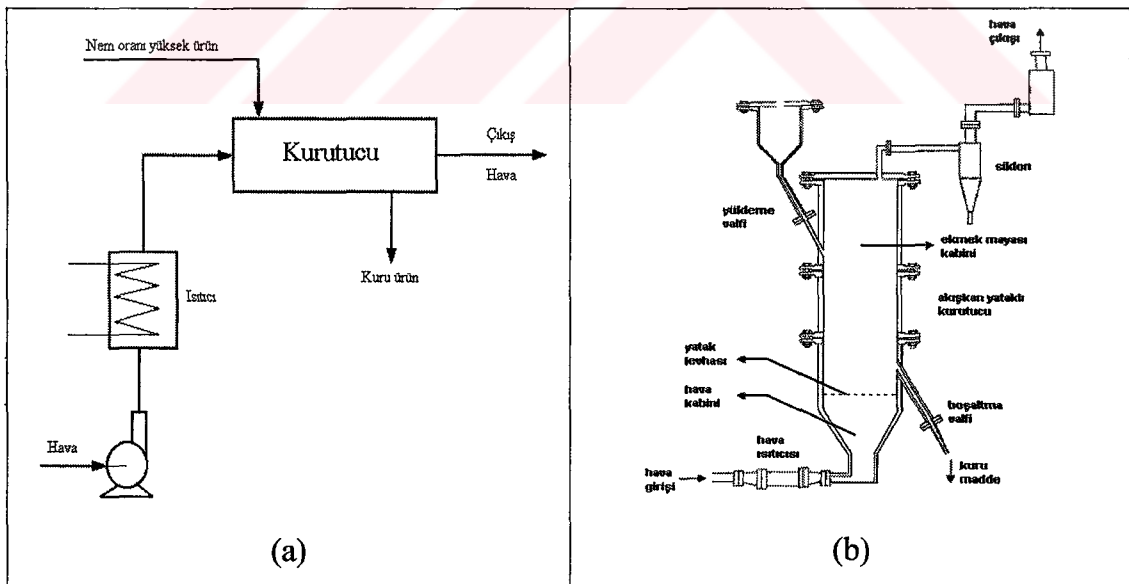
Son periyotta ise maddenin su verebilmesi, içerdiği nem kesri oranının da düşmesi ile havanın su alabilme kapasitesinden aşağıya düşer ve dolayısıyla kurutma hızı azalır. Bu periyot kritik nem kesri ile başlar ve eğer kurutma süresince nem kesri bu kritik değere düşmüyorsa, tüm kurutma sabit hız periyodunda gerçekleşir. Eğer kurutma başlangıcında maddenin nem kesri kritik nem kesrinin altında ise kurutma yalnızca azalan hız periyodunda gerçekleşir.

2.2. Kurutma Yöntemleri

Kurutulacak maddenin farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı endüstriyel alanda kurutma çok çeşitlilik göstermektedir. Aynı zamanda kurutma süreci için gerekli ısıyı sağlamanın da birçok yöntemi vardır (Strumillo and Kudra 1986). Bununla birlikte genel olarak kullanılan yöntemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

2.2.1. Konveksiyon veya ısı yayımlı kurutma

Isı, ısıtılmış hava veya gaz ile madde yüzeyine uygulanır. Buharlaştırma ısıyı madde yüzeyine yayılım ile aktarılır ve buharlaştırılan nem kurutucu gaz veya hava ile uzaklaştırılır. Bu tip kurutucular doğrudan kurutucu olarak da adlandırılır. Bu tip ısıtma yöntemi granüler, tabaka veya kek formundaki yaş maddelerin kurutulması için uygundur. Akışkan yataklı, döner, püskürtmeli tipindeki kurutucular bu sınıfa birer örnektir. Şekil 2.2’de ısı yayımlı kurutma sistemlerine ait iki örnek gösterilmiştir (Kanarya 2002).



Şekil 2.2. Isı yayımlı (Konveksiyon) kurutma sistemi. (a) açık kurutma sistemi, (b) akışkan yataklı kurutma sistemi.

2.2.2. Kontak veya temas ile kurutma

Dolaylı kurutucu olarak da adlandırılan kontak tipli kurutucular genelde ince veya çok yaş maddeler için uygundur. Buharlaştırma ısı sabit veya hareketli olan ısıtılmış yüzeyler ile sağlanır. Bu yüzeyler, maddeyi tutacak, taşıyacak veya bölümlere ayıracak biçimde kurutucu içine yerleştirilir. Kurutma sırasında nem, vakum yoluyla veya sisteme gaz akışı sağlanmasıyla uzaklaştırılır. İnce sulu çimento ve çamur gibi maddelerin kurutulmasında kullanılan buhar tüplü döner kurutucular ve tambur tipli kurutucular bu kurutma yöntemine örnek olarak verilebilir (Kanarya 2002).

2.2.3. Radyasyon yolu ile kurutma

Kurutulacak malzemeye 0,76-400 µm dalga boyunda elektromanyetik radyasyon ile termal enerji uygulanır. Bu dalga boyundaki radyasyon kızılötesi radyasyon diye adlandırılır ve malzemenin yüzeyine nüfuz eder. Madde yüzeyi ise gelen radyasyonun bir bölümünü soğurur. Genellikle kaplamaları, ince filmleri ve tabakaları kurutmak için kullanılır. Pahalı bir yatırım ve işletim maliyetinin olması sebebi ile daha çok nem uzaklaştırma süreci zor olan malzemelerin son nem kesrini düzeltmede veya değerli ürünlerin kurutulmasında tercih edilen bir yöntemdir (Kanarya 2002).

2.2.4. Dielektrik kurutma

Bu tip kurutmada, radyo frekansı veya mikrodalga bölgesinde çok yüksek frekansa sahip bir elektromanyetik alana yerleştirilen malzemenin içerisinde termal enerji üretilir. Elektromanyetik alan yönündeki hızlı değişimler yüzünden moleküler sürtünmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan ısı kutup akışını değiştirir. Sıvı haldeki suyun dielektrik sabitinin birçok katı malzemeninkinden çok yüksek olmasından dolayı ısı malzemenin su içeren kısmında üretilir (Strumillo and Kudra 1986).

2.2.5. Dondurarak (freeze) kurutma

Bu yöntem basıncın üçte bire indiği bir kurutma çemberine yerleştirilmiş malzemeden soğutulmuş veya dondurulmuş nemin artırılması esasına dayanır. Gerekli ısı değeri genellikle ısıtıcı tabla veya plakalardan iletilmesi ile sağlanır (Strumillo and Kudra 1986, Mujumdar ve diğ.1980).

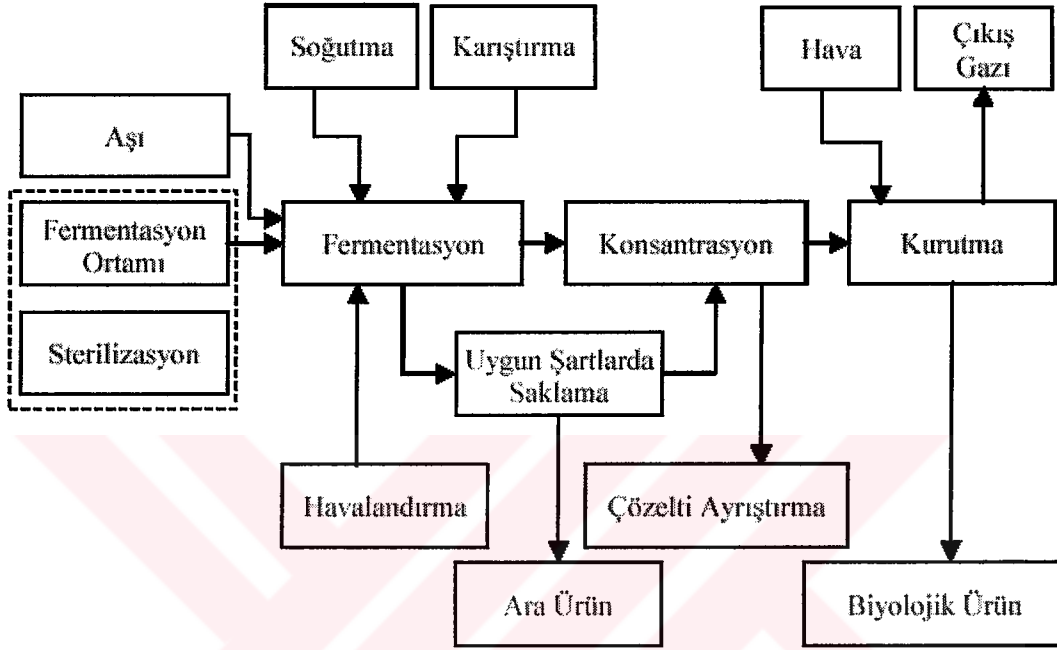
2.3. Biyolojik Ürünlerin Kurutulması

Yaş maddelerin kurutulması yalnızca ısı ve kütle aktarım süreci olmayıp, aynı zamanda ürün kalitesinde önemli rol oynayan bir biyolojik süreçtir. Özellikle mikrobiyolojik ve biyolojik ürünlerin kurutulmasında, mikroorganizmaların canlılığı ve kapasitelerinin artırılması gibi özelliklerin geliştirilmesinde kurutma süreçleri önemli rol oynarlar. Enzimler (Adamic, 1995), bakteriler (Lievens & Riet, 1993, 1994) ve maya kültürleri (Beker & Rapoport, 1987) gibi mikrobiyolojik ürünler kurutma koşullarına karşı çok hassas davranış gösterirler. Kurutma süreçlerinde, ürünlerin hangi özelliklerinin kaliteyi etkilediğini bilmek gerekir. Örneğin, gıda sektöründeki mikrobiyolojik ürünlerde önemli olan mikroorganizma sayısını en yüksek dereceye çıkartmak, antibiyotik, amino asit ve enzimlerin kurutulmasında ise en yüksek aktiviteyi yakalamaktır. Ürün kalitesi üzerinde pek çok etken rol oynamaktadır. Bu etkenlerden en önemlileri sıcaklık ve nem kesridir (Kerkhof 2000, Lievens 1991).

2.3.1. Biyokimyasal süreç

Biyoteknoloji, biyolojik maddeler, mikroorganizmalar ve virüsler ile çeşitli endüstriyel ürünlerin elde edilmesidir. Şekil 2.3'de biyokimyasal sürecin yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Biyokimyasal süreç, şekilden de görüleceği üzere çeşitli temel işlemlerden oluşmaktadır. Bunlardan ilki fermantasyon sürecidir. Fermantasyon, mikrobiyolojik, kimyasal, fiziksel ve mekaniksel etkenlere bağlı karmaşık bir biyokimyasal süreçtir. Doğru bir fermantasyon süreci yüksek ürün kalitesine ve verimliliğe sahip olmalıdır. Süreci etkileyen küçük bir değişim, ürün üzerinde belirleyici değişikliklere yol açar. Kesikli, yarı-kesikli ve sürekli

fermantasyon olmak üzere üç tip fermentasyon mevcuttur. Ticari üretimde en çok kullanılan ise yarı-kesikli fermentasyon sürecidir. Çünkü bu yöntem ile istenen ürün verimliliğini artırmak ve istenmeyen ikincil ürün oluşumunu engellemek mümkündür (Karakuzu 2003).



Şekil 2.3. Biyokimyasal süreç yapısı (Kanarya 2002).

Fermentasyon kadar önemli diğer bir süreç ise biyolojik ürünlerin korunmasıdır. Fermentasyon sonrası biyolojik ürünler içerdikleri nem kesri nedeniyle uzun süre saklanamazlar. Ürünün uygun olmayan şartlar altında bulunması kalitesinde bozulmalara neden olur. Bu nedenlerden ötürü fermentasyon sonunda oluşan ürün ayrıştırma, konsantrasyon ve kurutma gibi süreçlerden geçirilir. Biyolojik ürünlerin kurutma ve saklama sırasında çevre koşullarına olan hassasiyetleri sebebi ile bu süreçler ürün kalitesini fazla düşürmeyecek şekilde yürütülmelidir.

2.3.2. Biyolojik ürünlerin kurutma süreci

Fermentasyon sonrası elde edilen ürünün kuru madde yüzdesi düşük, nem oranı ise yüksek bir seviyededir. Biyolojik ürünlerdeki su miktarı ürünün yaşam süresi, aktivitesi ve saklanabilmesi açısından oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Lieveense

1991). Bu yüzden kurutma süreçlerinde asıl hedeflenmesi gereken, biyolojik ürünün nem oranının azaltılmasıdır. Biyolojik ürünlerin kurutulmasında dikkat edilecek ikinci bir husus da, kurutma sonunda elde edilecek ürün kalitesinin düşürülmemesidir. Suyun sahip olduğu role göre biyolojik ürünler iki gruba ayrılabilir:

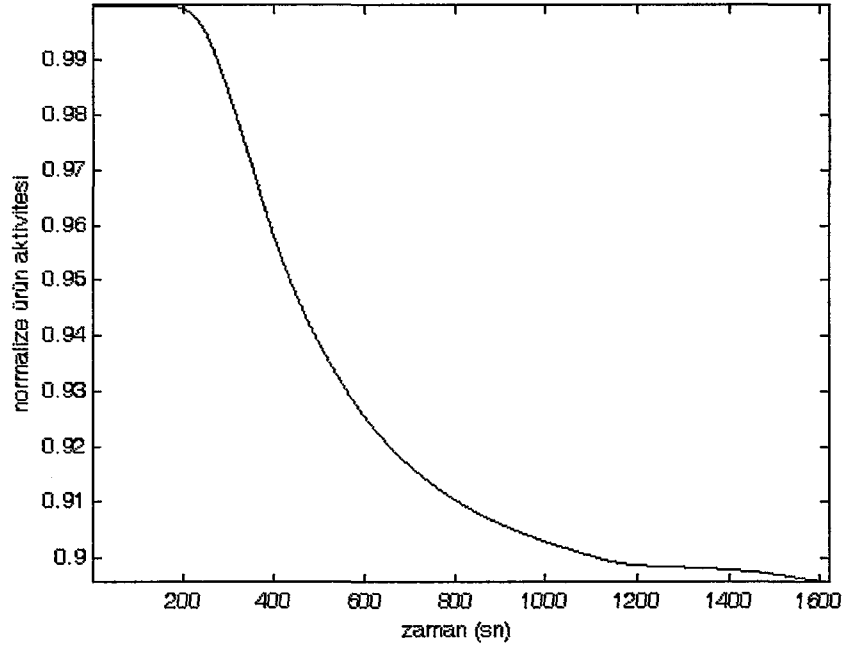
1. Bakteri, maya, küf gibi maddeler: Kurutma sürecine karşı yüksek dayanıklılık gösteremezler ve kurutma sırasında nitelikleri önemli ölçüde değişikliğe uğrar.
2. Antibiyotikler, amino asitler ve vitaminler: Kurutma sürecine karşı yüksek dayanıklı olup, kurutma süresince niteliklerinde çok az değişiklik olur.

Bu iki ürün grubunun kurutulması birbirinden farklıdır. Biyolojik ürünler uzun süre saklanabilecek şartlara sahip, biyolojik aktivitenin de kaybolmayacağı bir nem kesri değerine kadar kurutulmalıdır. Kaliteyi etkileyen değişiklikler maddenin karmaşık yapısı ile de ilgilidir. Değişim miktarı, ürünün tipine, yoğunluğuna, kurutma parametrelerine, su aktivitesine, pH ve oksijen gibi etkenlere bağlıdır (Kanarya 2002). Gıda teknolojisi üzerine yapılmış olan birçok çalışmada kurutma sırasında ürünlerde meydana gelen değişiklikler işlenmiştir (Bayrock ve diğ. 1997a, 1997b, Panchariya ve diğ. 2002, Akpınar ve diğ. 2003, Doymaz ve diğ. 2003).

Teorik olarak düşük sıcaklık ve yüksek kurutma zamanı biyokimyasal kurutma süreçleri için en uygun değerler olarak görünmekle birlikte, bu değerler endüstriyel ortamlarda gerekli ve yeterli koşullar göz önüne alınıp optimizasyon analizi ile hesaplanabilir. Biyolojik ürünlerin kurutulması sürecinde kalite fonksiyonu kurutma zamanı, sıcaklık ve nem kesrine bağlı olarak değişir (Lievens 1991):

$$Q = f(T(t), X(t)) \quad (2.3)$$

Burada T sıcaklığı, X nem kesrini ve Q ise kaliteyi ifade etmektedir. Şekil 2.4'de ekmek mayası kurutma sürecinin granül tabanlı modelinin (Bkz. Bölüm 4) silindirik granül formu için bulunan kalite fonksiyonunun zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Ekmek mayası kurutma sürecinin granül tabanlı modelinin silindirik granül formu için bulunan kalite fonksiyonunun zamanla değişimi.

Biyolojik ürünlerin kurutulması sırasındaki kalite değişimleri üzerine literatürde birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bunlardan bazıları Zimmermann ve Bauer'ın (1985) ekmek mayasının bozunma reaksiyonları üzerine yaptığı çalışma, Luyben ve diğ. (1982) tarafından yapılan alkalın fosfataz, lipaz ve katalaz enzimlerinin kurutma süresince bozunmalarını inceleyen çalışma ve Lievens (1991) tarafından *Lactobacillus Plantarum* bakterisi için geliştirilen kalite fonksiyonu denklemleri ile ilgili çalışmadır.

2.3.3. Biyolojik ürünlerin kurutma sürecini modelleme

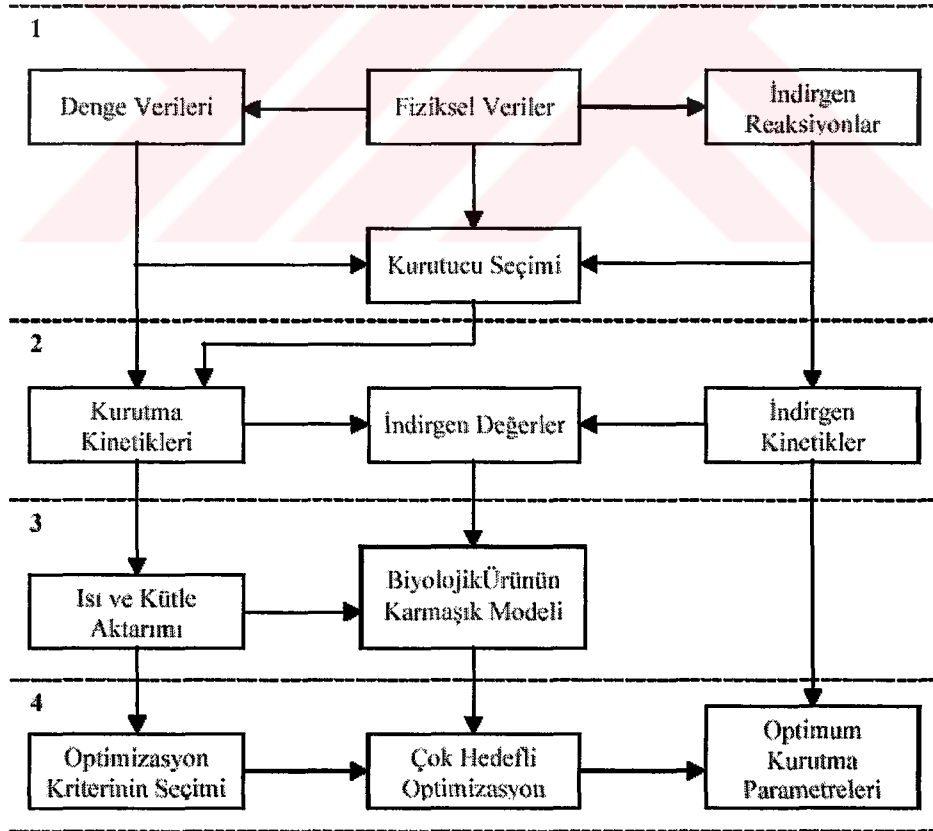
Biyolojik ürünlerde meydana gelen değişimler, kurutma sürecinin modellenmesinde ciddi problemler oluşturabilirler. Öncelikle biyolojik ürün ile ilgili kalite kaybı denklemleri iyi bilinmelidir. Genel olarak biyolojik ürünlerin modellenmesini dört ana başlıkta toplayabiliriz:

1. Biyokimyasal ürünlerin fiziksel ve kimyasal temel bilgileri, denge verileri bilinmelidir. Bu şekilde kurutma sürecinin seçimi ile maksimum kurutma

sıcaklığı, minimum nem kesri değeri ve maksimum kurutma zamanı öngörülebilir.

2. Kurutma ve kalite kaybı fonksiyonları eş zamanlı olarak incelenmelidir.
3. Yönteme bağlı olarak kurutma dinamiklerine göre sürecin modeli oluşturulmalıdır.
4. En uygun süreç parametrelerinin seçilebilmesi için çok hedefli optimizasyon analizi yapılmalıdır.

Bu analiz yöntemi ürün kalitesini ve sürecin maliyetini de içermelidir. Su uzaklaştırma işleminde oluşan istenen ve istenmeyen değişimlerin bilinmesi ile kalite ve kurutma arasında bir ilişki oluşturulabilir (Kanarya 2002, Zimmermann ve diğ. 1985, 1987, Strumillo ve diğ. 1986). Şekil 2.5'de genel olarak kurutma sürecinin modellenme mantığı ile ilgili şematik bir diyagram gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Biyolojik ürünlerin kurutma sürecinin modellenmesine ilişkin akış diyagramı (Kanarya 2002).

Bu bölümde temel olarak kurutma süreci, en genel kurutma yöntemlerinden kısaca bahsedilmiş, biyolojik ürünlerin kurutulması başlığı altında biyokimyasal süreçlerden fermantasyon ve kurutma işlemleri anlatılmış, son kısımda ise biyolojik ürünlerin kurutma süreçlerinin modellenmesine dair temel bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Bundan sonraki bölümde akışkan yataklı kurutma sürecinin homojen matematiksel modellenmesi yer almaktadır.



BÖLÜM 3. KURUTMA SÜRECİNİN KİNETİĞİ ve AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLENMESİ

Bu bölümde, kurutma süreçlerinin matematiksel modellemesi ile ilgili yapılan bir çalışmaya yer verilmiştir. Yapılan modelleme çalışmalarında akışkan yataklı kesikli kurutma süreci seçilmiştir. Kurutulacak maddenin homojen tanecikli olduğu varsayımı ile modelleme yapılmıştır. Yapılan matematiksel modellemenin sınanması amacıyla ekmeek mayası (*Saccharomyces cerevisiae*) kurutma sürecinden alınan verilerle yapılmıştır.

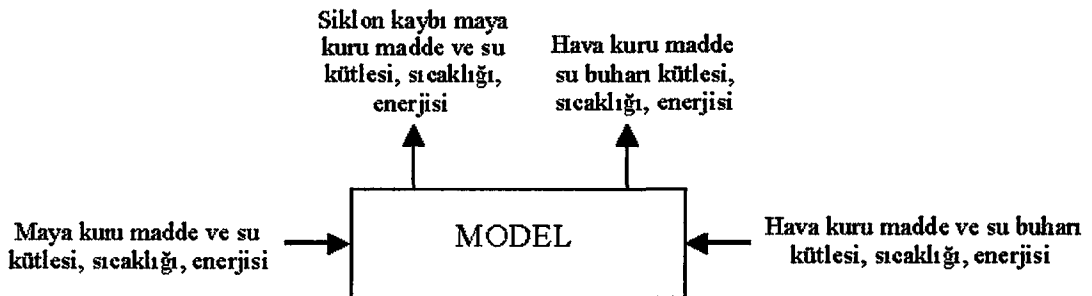
3.1. Akışkan Yataklı Kesikli Kurutma Süreci

Akışkan yataklı kesikli kurutma süreci, ham maddenin kurutma fırınına yüklenmesi ve doygun olmayan hava beslemesiyle maddenin içindeki suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılması esasına dayanır (Temple ve diğ. 1999b). Akışkan yataklı kurutma sürecinde, fırına nem oranı yüksek madde yükleme kısmından verilir ve ısıtılmış hava fırına verilmek suretiyle madde içerisindeki su uzaklaştırılır. Fırına belirli zaman boyunca kek formunda, yani kuru madde oranı düşük, nem oranı yüksek madde yüklemesi yapılmakta ve bu süreç zarfında hava beslemesiyle beraber akışkan yatak oluşturulmaktadır. Bu kısma yükleme evresi de denilmektedir. Yükleme evresi bittikten sonra belirli şartlarda hava beslemesine devam edilmekte ve madde içindeki su buharlaştırılmaktadır. Madde içindeki kuru madde oranı istenen seviyeye ulaştığında ise madde fırından boşaltılmaktadır. Kurutma sürecinin matematiksel modellemesi yapılırken aşağıdaki şartlar göz önüne alınmıştır:

1. Belirli bir zaman süresince fırına madde yüklemesi yapılır. Bu süre boyunca sistem içine madde giriş akışı bulunmaktadır ve bu akış miktarı ile yüklenen maddenin sıcaklığı bilinmektedir. Yükleme bittikten sonra madde giriş akışı sıfırdır.

2. İlgili sistem kesikli olduğundan, yüklemeden sonra süreç bitinceye kadar yüklenen madde fırın içinde kalır. Maddenin nem kesri bilinmektedir.
3. Kurutma süreci boyunca sistem sürekli hava ile beslenmektedir. Giren havanın akış miktarı, sıcaklığı, bağıl ve mutlak nem oranları bilinmektedir.
4. Sistemde hava birikimi olmamakta ve giren hava fırın bacasından çıkmaktadır. Kurutma süreci sebebiyle çıkan havanın sıcaklığı, bağıl ve mutlak nem oranları değişmiştir. Kuru hava debisi sabit kalmış, ancak su buharı debisi kurutma süreci sırasında maddeden uzaklaşan suyun havaya geçmesi sebebiyle değişmiştir.
5. Hava fırından çıkarken bir miktar madde de kayıp olarak siklondan uzaklaşabilir.
6. Kurutulacak madde, kuru madde ve sudan oluşmaktadır. Süreç başında kuru madde kesri bilinmektedir. Kurutma süreci süresince maddeden su uzaklaştığı için kuru madde oranı artacaktır.
7. Kurutma aracı olan hava, kuru madde ve su buharından oluşmaktadır. Kurutma süreci süresince kuru madde bölümü sabit kalmakta ve su buharı bölümü maddeden buhar olarak uzaklaşan su ile birlikte değişmektedir.

Yapılan matematiksel model, termodinamik enerji denkliği esasına dayanarak oluşturulmuştur. Sisteme giren ve sistemden çıkan enerjilerin toplamı, sistem içinde biriken enerjiye eşittir. Şekil 3.1’de model şematik olarak sunulmaktadır. Sistem içindeki madde toplam olarak ele alınmış ve granül bazındaki kurutma mekanizmaları ile yatak dinamikleri modele dahil edilmemiştir.



Şekil 3.1. Kurutma modeli.

Kurutma sürecinin matematiksel modellenmesi yapılırken bazı varsayımlarda bulunulmuştur (Temple ve diğ. 1999c). Bunlar sırasıyla:

1. Akışkan yatak atmosfere açık olup atmosferik basınç altındadır (1 atm).
2. Yatak boyunca basınç farkı çok küçük olup kurutma sabit basınçta gerçekleşir.
3. Kurutma fırınında enerji kaybı yada kazancı olmayıp süreç adyabatiktir.
4. Hava akışı, piston akış şeklinde olup mayanın tam olarak karıştığı varsayılır.
5. Granül ve hava arası karşılıklı ısı değişimi tam olup havanın fırın çıkışındaki sıcaklığı yataktaki maya granüllerinin sıcaklığına eşittir.
6. Yataktaki hava kütlesi ihmal edilebilir.
7. Modeli yapılan kurutma sistemi kesikli bir sistem olup, belirli bir süre boyunca maya yüklemesi yapılmakta ve kurutma süresince mayanın kayba uğramadan sürecin yürütülmesi beklenmektedir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda, fırın siklonlarından bir miktar mayanın hava yoluyla sistem dışına taşındığı gözlenmiştir. Bundan dolayı sistemdeki mayanın kütlelerinde bu yolla bir azalma olmaktadır ve uzaklaşan mayanın sıcaklığı, sistemdeki maya sıcaklığına eşittir.

3.2. Model Denklemleri

Elde edilen matematiksel model fiziksel kanunlara dayalı olarak 4 kısımdan oluşur:

- Kütle denkliği
 - a. Kuru madde denkliği
 - b. Su denkliği
 - c. Hava denkliği
- Enerji denkliği

3.2.1. Kuru madde denkliği

Kurutma süreci kesikli olduğundan, sisteme beslenen mayanın kuru madde içeriği yükleme boyunca artacak ve yükleme evresi bittiği zaman siklon kayıpları haricinde değişmeyecektir. Yataktaki maya kütlelerinin değişimi şu şekilde verilebilir:

$$\frac{dM_y}{dt} = m_y^i - m_y^o \quad (3.1)$$

Burada M_y fırın yatağındaki mayanın kuru madde toplam kütesini (kg), m_y^i ve m_y^o ise sırasıyla mayanın kuru madde içeriğinin giriş kütleli hızını ve hava yoluyla siklondan uzaklaşan kuru maddenin uzaklaşma hızını gösterir.

3.2.2. Su denkliği

Sistemdeki su, maya ile birlikte sisteme gelen su ile havada bulunan su buharının toplamıdır. Yataktaki mayanın taşıdığı toplam su kütesinin değişimi, sisteme beslenen mayadaki suyun akışı ile buharlaşma yoluyla mayadan su uzaklaşma hızı ve hava yoluyla siklonlardan uzaklaşan mayanın içerisindeki suyun uzaklaşma hızı farkıdır:

$$\frac{dW_y}{dt} = w_y^i - w_y^o - r_w \quad (3.2)$$

Burada w_y^i mayanın su içeriğinin giriş kütleli hızını, w_y^o hava yoluyla siklondan uzaklaşan suyun hızını, r_w ise buharlaşma yoluyla uzaklaşan suyun hızını göstermektedir.

Aynı zamanda havanın sisteme getirdiği suyun kütleli hızı ile mayadan uzaklaşan suyun kütleli hızı toplamı, sistemden uzaklaşan havanın taşıdığı suyun kütleli hızını verir:

$$w_a^o = w_a^i + r_w \quad (3.3)$$

Burada w_a^i ve w_a^o , sırasıyla havanın taşıdığı su buharının giriş ve çıkış hızı miktarlarını göstermektedirler.

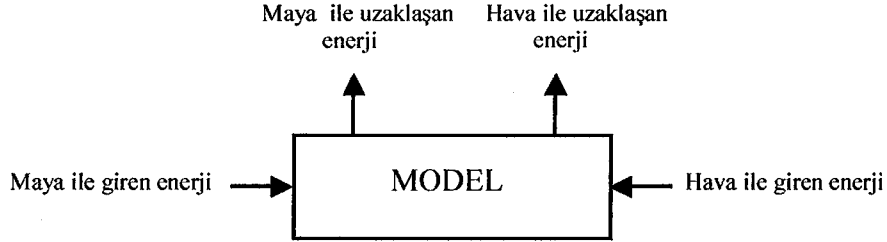
3.2.3. Hava denkliği

Model varsayımlarında da ifade edildiği gibi yataktaki hava kütlesi ihmal edilmiş olup, giren havanın hiçbir kayba uğramadan yataktan çıktığı kabul edilmiştir:

$$\frac{dM_a}{dt} = m_a^i - m_a^o \cong 0 \Rightarrow m_a^i = m_a^o \quad (3.4)$$

3.2.4. Enerji denkliği

Bu bölümde anlatılan homojen modellemenin en önemli kısmını enerji denkliği oluşturmaktadır. Şekil 3.2’de enerji denkliği için model akışı verilmiştir.



Şekil 3.2. Enerji denkliğine ait model akışı şeması.

Kurutma sürecinde 4 adet enerji mevcuttur:

1. Hava ile giren enerji (h_a^i)
2. Maya ile giren enerji (h_y^i)
3. Hava ile uzaklaşan enerji (h_a^o)
4. Maya ile uzaklaşan enerji (h_y^o)

Kurutma sürecinin adyabatik olduğu varsayımından yola çıkılarak, akışkan yataktaki enerji şu şekilde ifade edilebilir:

$$H = h_y^i + h_a^i - h_y^o - h_a^o \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’de belirtilen enerji akış terimleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h_y^i = c_{p,y} m_y^i T_y^i + c_{p,w} w_y^i T_y^i \quad (3.6)$$

$$h_a^i = c_{p,a} m_a^i T_a^i + c_{p,wv} w_a^i T_a^i \quad (3.7)$$

$$h_y^o = c_{p,y} m_y^o T_y^o + c_{p,w} w_y^o T_y^o \quad (3.8)$$

$$h_a^o = c_{p,a} m_a^o T_a^o + c_{p,wv} w_a^o T_a^o \quad (3.9)$$

Bu denklemlerde geçen T_y^i giren mayanın sıcaklığını, T_a^i giren havanın sıcaklığını, T_y^o siklonlardan uzaklaşan mayanın sıcaklığını, T_a^o çıkan havanın sıcaklığını, $c_{p,y}$ mayanın özgül ısısını, $c_{p,w}$ suyun özgül ısısını, $c_{p,wv}$ su buharının özgül ısısını, $c_{p,a}$ havanın özgül ısısını göstermektedir.

Denklem 3.3 ve 3.4 denklem 3.9'da yerine konulursa,

$$h_a^o = c_{p,a} m_a^i T_a^o + c_{p,wv} (w_a^i + r_w) T_a^o \quad (3.10)$$

elde edilir. Bölüm 3.1'deki 5 ve 7 nolu model varsayımlarına göre, sıcaklık terimleri ile ilgili aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$T_a^o = T_y = T_a = T_y^o = T \quad (3.11)$$

Burada T_a yataktaki havanın sıcaklığını ve T_y yataktaki mayanın sıcaklığını göstermektedir. Bu varsayıma göre denklem 3.8 ve 3.10 tekrar düzenlenecek olursa:

$$h_y^o = c_{p,y} m_y^o T + c_{p,w} w_y^o T \quad (3.12)$$

$$h_a^o = c_{p,a} m_a^i T + c_{p,wv} (w_a^i + r_w) T \quad (3.13)$$

Kurutma süreci sırasında yataktaki enerji değişimi, yataktaki havanın ve mayanın enerji değişimleri ile mayadan su uzaklaştırma için gerekli enerji değişiminin toplamıyla ifade edilebilir:

$$H = \frac{d(c_{p,y} M_y + c_{p,w} W_y) T_y}{dt} + \frac{d(c_{p,a} M_a + c_{p,wv} W_a) T_a}{dt} + r_w \Delta H_v \quad (3.14)$$

Burada ΔH_v buharlaşma gizli ısısını göstermektedir. Denklem 3.11 gereğince sıcaklık terimlerini tek bir terim olarak ifade ettiğimizde ,

$$H = \frac{d(c_{p,y} M_y + c_{p,w} W_y) T}{dt} + \frac{d(c_{p,a} M_a + c_{p,wv} W_a) T}{dt} + r_w \Delta H_v \quad (3.15)$$

elde edilir. Bölüm 3.1'deki model varsayımlarında yataktaki hava kütesinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı nedeniyle, hava ile ilgili terimler denklemden çıkarılarak denklem 3.16 elde edilir:

$$H = \frac{d(c_{p,y}M_y + c_{p,w}W_y)T}{dt} + r_w\Delta H_v \quad (3.16)$$

Mayanın özgül ısısı $c_{p,y}$, kuru madde oranına bağlı bir değişkendir ve kuru madde oranı da zamanla değiştiğinden, maya özgül ısısı zamana bağlı bir değişkendir. Denklem 3.16 daha açık bir şekilde yazılacak olursa,

$$H = (c_{p,y}M_y + c_{p,w}W_y)\frac{dT}{dt} + \left(c_{p,y}\frac{dM_y}{dt} + M_y\frac{dc_{p,y}}{dt} + c_{p,w}\frac{dW_y}{dt} \right)T + r_w\Delta H_v \quad (3.17)$$

elde edilir. Denklem 3.6, 3.7, 3.12, 3.13 ve 3.17 denklem 3.5'de yerine konursa denklem 3.18 elde edilir

$$\begin{aligned} & (c_{p,y}M_y + c_{p,w}W_y)\frac{dT}{dt} + \left(c_{p,y}\frac{dM_y}{dt} + M_y\frac{dc_{p,y}}{dt} + c_{p,w}\frac{dW_y}{dt} \right)T \\ & = c_{p,y}m_y^i T_y^i + c_{p,w}w_y^i T_y^i + c_{p,a}m_a^i T_a^i + c_{p,wv}w_a^i T_a^i \\ & - (c_{p,y}m_y^o T + c_{p,w}w_y^o T + c_{p,a}m_a^i T + c_{p,wv}(w_a^i + r_w)T) - r_w\Delta H_v \end{aligned} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de denklem 3.1 ve 3.2 yerlerine konulur ve denklem düzenlenirse 3.19 eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} & (c_{p,y}M_y + c_{p,w}W_y)\frac{dT}{dt} \\ & = c_{p,y}m_y^i T_y^i + c_{p,w}w_y^i T_y^i + c_{p,a}m_a^i T_a^i + c_{p,wv}w_a^i T_a^i - r_w\Delta H_v \\ & - \left(c_{p,a}m_a^i + c_{p,wv}(w_a^i + r_w) + c_{p,y}m_y^i + M_y\frac{dc_{p,y}}{dt} + c_{p,w}(w_y^i - r_w) \right)T \end{aligned} \quad (3.19)$$

Denklem 3.19 1. dereceden adi diferansiyel denklem ifadesidir ve model denklemi denklem 3.20'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A - BT}{C} \quad (3.20)$$

Model denklemindeki A,B,C parametrelerinin ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$A = c_{p,y} m_y^i T_y^i + c_{p,w} w_y^i T_y^i + c_{p,a} m_a^i T_a^i + c_{p,wv} w_a^i T_a^i - r_w \Delta H_v \quad (3.21)$$

$$B = c_{p,a} m_a^i + c_{p,wv} (w_a^i + r_w) + c_{p,y} m_y^i + M_y \frac{dc_{p,y}}{dt} + c_{p,w} (w_y^i - r_w) \quad (3.22)$$

$$C = c_{p,y} M_y + c_w W_y \quad (3.23)$$

Kurutma süreci kesikli olduğundan model sıcaklığına ait diferansiyel denklemin çözümü ayrık zamanda 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi (Gerald & Wheatly 1984) kullanılarak çözülmüştür:

$$k_0 = \frac{A - BT(k-1)}{C} \quad (3.24)$$

$$k_1 = \frac{A - B(T(k-1) + 0.5k_0 h)}{C} \quad (3.25)$$

$$k_2 = \frac{A - B(T(k-1) + 0.5k_1 h)}{C} \quad (3.26)$$

$$k_3 = \frac{A - B(T(k-1) + k_2 h)}{C} \quad (3.27)$$

$$T(k) = T(k-1) + (k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3) \frac{h}{6} \quad (3.28)$$

Burada h integrasyon aralığını göstermektedir. Kurutma sürecinin homojen matematiksel modellemesi yapılırken modelde kullanılan bazı parametrelerin hesabı bir sonraki kısımda verilmiştir. Matematiksel modelde kullanılan mayanın özgül ısısı ($c_{p,y}$), su buharının özgül ısısı ($c_{p,wv}$), buharlaşma gizli ısısı (ΔH_v), siklondan uzaklaşan maya ve bağlı nemin (rH) süreç boyunca nasıl hesaplanacakları konusundaki ayrıntılı bilgiler EK A' da verilmiştir.

3.3. Su Verebilme Kapasitesi ve Kurutma Hızı

Kurutulan maddenin sahip olduğu suyu verebilme yeteneği, maddenin hücresel ve yapısal bütünlüğüne, bu yapının madde özelliklerine, kurutma sürecinin mantığına ve kurutma araçlarının kullanımına, ayrıca su soğurma ve bırakma mekanizmaları gibi

pek çok farklı parametreye bağlıdır (Kanarya 2002). Bu parametrelerin araştırılmasıyla kullanılan sistemin kurutma hızı belirlenebilir (Temple ve diğ. 1999b). Bu hız belirlendikten sonra, maddenin su verebilme kapasitesi, maddenin kuru madde kütlesinin (M_y) ve kurutma hızının (J) çarpımı ile bulunabilir.

$$r_w = JM_y \quad (3.29)$$

Sazhin, Reutskii ve Smirnova (1979)'a göre kurutma hızı, maddeden birim zamanda uzaklaşan su kütlesi olarak tanımlanabilir:

$$J = \frac{dX}{dt} = k(X - X_e) \quad (3.30)$$

$$X = \frac{W_y}{M_y} \quad (3.31)$$

Denklem 3.30 ile sabit ve azalan kurutma hızı periyotlarında ayrı ayrı kurutma zamanları hesap edilebilir. Bununla beraber tek bir kinetik ifadede sabit ve düşen kurutma hızı periyotlarını kapsayan toplam kurutma sürecini tanımlayabilmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Strumillo and Kudra 1986). Bu yöntemde göre kurutma hızı ifadesi, denklem 3.32'deki gibi yazılabilir:

$$J = \frac{dX}{dt} = k(X_0 - X)(X - X_e) \quad (3.32)$$

Burada X_0 , X_e ve X sırasıyla başlangıçtaki nem kesri, dengedeki nem kesri ve anlık nem kesrini (kg su/kg kuru madde), k ise kurutma katsayısını (1/sn) göstermektedir.

Kurutma sırasında maddeden uzaklaştırılan su miktarı yalnız maddenin su verebilme kapasitesine bağlı değildir. Kurutma aracı olarak sisteme verilen havanın su alabilme kapasitesi de buradaki önemli faktörlerdendir. Kısaca kurutulan madde ne kadar çok su verebilecek durumda olursa olsun, hava suyu buhar olarak bünyesinde taşıyamıyor ise maddenin kurutma hızı süreçte yalnız başına yürütücü kuvvet olamayacaktır. Bunun için öngörülen şart şudur: Kurutma boyunca yataktan geçen havanın sıcaklık, bağıl nem, mutlak nem gibi özellikleri değişecektir. Ancak bağıl nem %100'ün üzerinde olamaz.

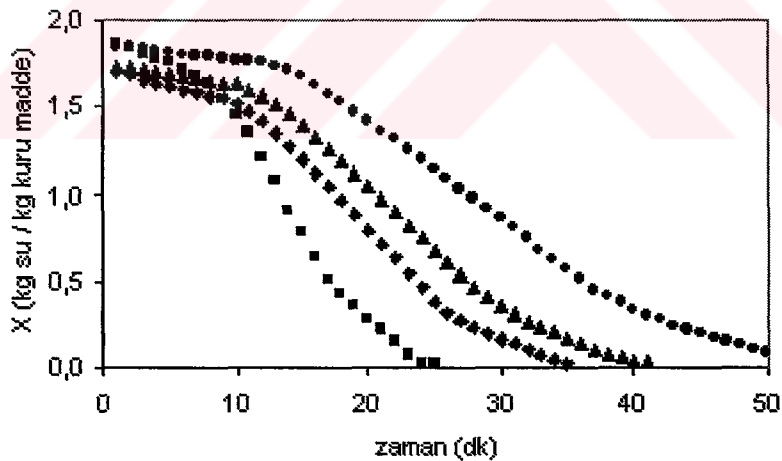
3.4. Deneysel Yöntem

Deneysel veriler endüstriyel bir ekmek mayası akışkan yataklı sürecinden alınmıştır. Farklı çaplardaki ekmek mayası kek halinde kurutucuya verilmektedir. Akışkan yatakta ısıtılan havayı kurutma sürecine vermek için bir merkezi fan bulunmaktadır. Havanın giriş ve çıkıştaki sıcaklık, nem oranı ve akış hızı sürekli olarak ölçülerek bilgisayarlarda kaydedilmiştir. Değişik yük koşulları, değişik çap boyları ve değişik granül formları için kurutma sürecinden ölçümler alınmış ve geliştirilen modelin başarısının testinde kullanılmıştır.

3.5. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler

3.5.1. Kurutma hızı sabitinin hesaplanması

Kurutma hızı sabitinin hesaplanması sabit hava sıcaklığı ve akış hızı altında farklı kurutucu yüklemeleri için yapılmıştır. Şekil 3.3'de değişik yük koşulları için kurutma sürecindeki nem kesri değişimleri gösterilmiştir.

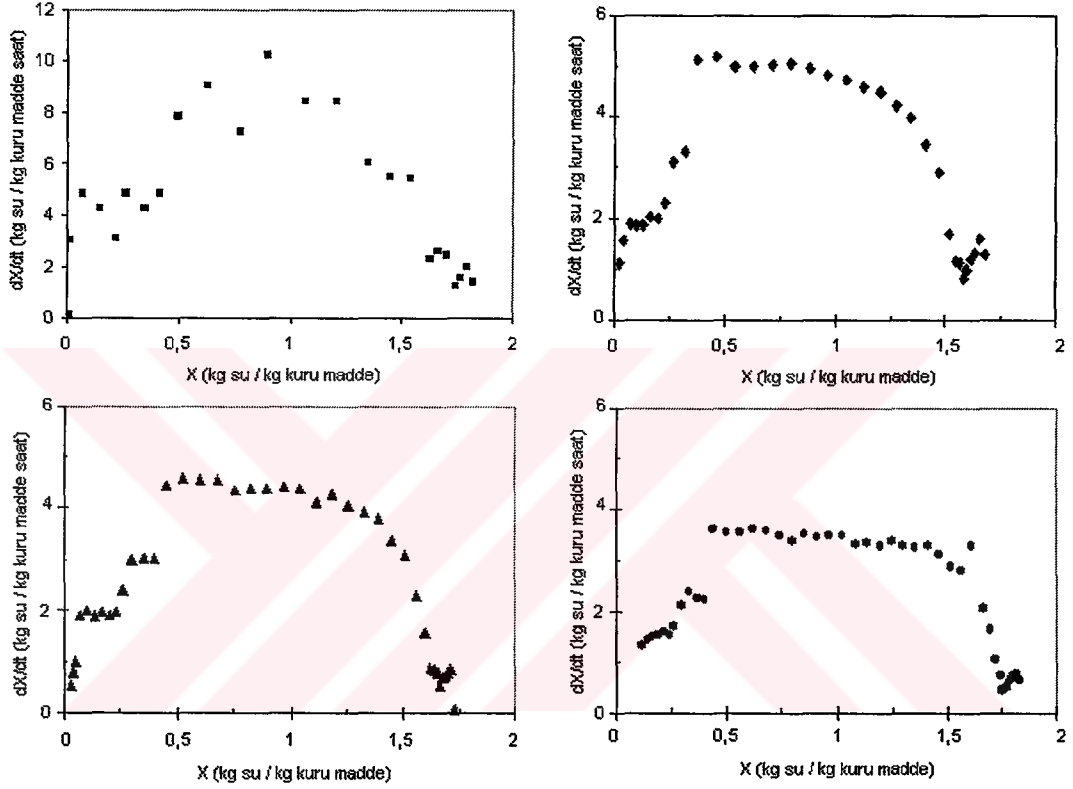


Şekil 3.3. Değişik yük (kg) koşulları altında nem kesri değişimi: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.

Şekil 3.3'den de görüleceği gibi nem kesri değişimi yükteki artışa göre yavaşça azalmaktadır. Şekil 3.4'de farklı yük koşulları için nem uzaklaşma hızındaki değişimler gösterilmiştir. Kurutucu yükü ile maksimum nem uzaklaşma hızı birbirleriyle ters orantılıdır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Sabit hava sıcaklığı ve akış hızında değişik kurutucu yük koşulları altında nem uzaklaşma hızının maksimum değerleri

Kurutucu yükü (kg)	Maksimum nem uzaklaşma hızı (kg su/kg kuru madde saat)
150	9.0
250	5.1
300	4.5
400	3.6



Şekil 3.4. Değişik yük (kg) koşulları altında nem uzaklaşma hızları: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.

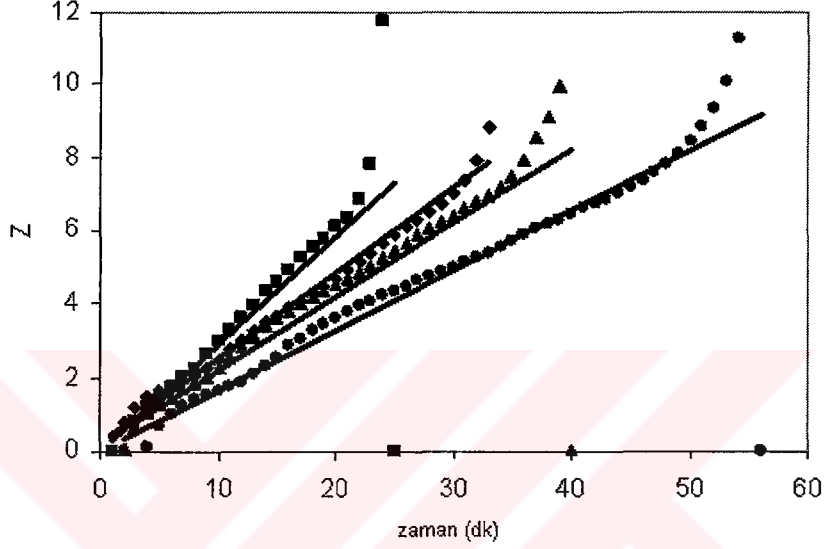
Denklem 3.32'deki kurutma hızı ifadesi, başlangıçtaki denge nem kesrinden, kurutma sonundaki denge nem kesrine kadar birleştirilerek denklem 3.33'deki kurutma zamanı ifadesi elde edilir:

$$t = \frac{1}{k(X_0 - X_e)} \ln \frac{(X_0 - X)(X_{0e} - X_e)}{(X_0 - X_{0e})(X - X_e)} \quad (3.33)$$

Burada X_0 başlangıç nem kesrini, X_{0e} başlangıç periyodu denge nem kesrini göstermektedir. Denklem 3.33'deki ifadede kurutma zamanını kolayca bulabilmek için kurutma eğrisi z-t koordinatlarına geçirilir:

$$z = \frac{(X_0 - X)(X_{0e} - X_e)}{(X_0 - X_{0e})(X - X_e)} \quad (3.34)$$

Değişik kurutucu yükleri altında kurutma hızı sabitini bulmak için z-t gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil 3.5’deki doğruların eğimi kurutma hızı sabitlerini vermektedir.



Şekil 3.5. Değişik yük (kg) koşulları altında kurutma hızı sabitinin hesabı için z-t gösterimi: (■) 150, (◆) 250, (▲) 300, (●) 400.

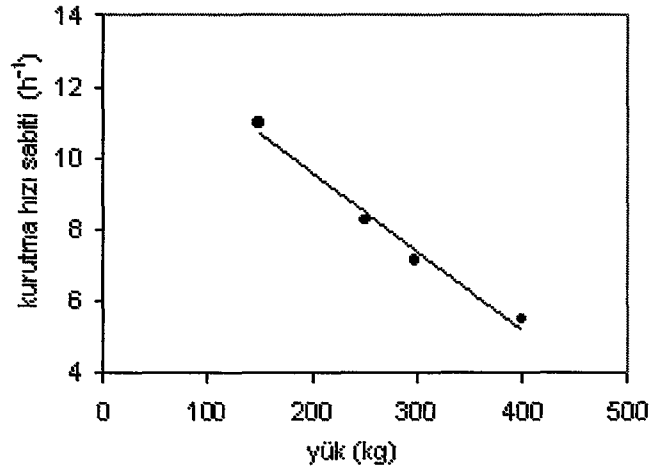
Şekil 3.4’deki her doğrunun eğimi denklem 3.35’deki gibidir:

$$\text{egim} = (X_0 - X_e) \quad (3.35)$$

Şekil 3.6’da kurutma hızı sabitinin kurutucu yükü ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 3.6’da kurutucu yük değerlerine göre bulunan kurutma hızı sabitini 1. dereceden bir doğruya uydurursak, denklem 3.36’daki kurutma hızı sabiti formülü elde edilir:

$$k(t) = 14,027 - 0,0221 * (\text{kg kek}) \quad (3.36)$$

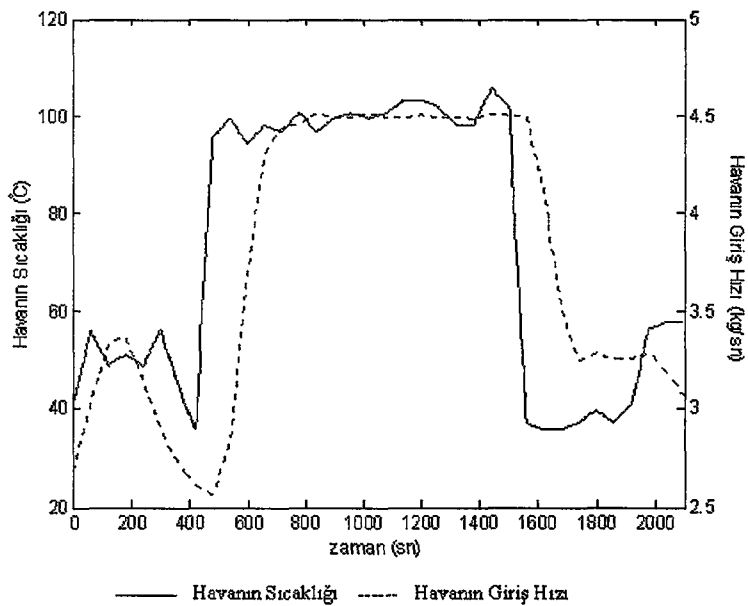
Burada t zamanı saat bazında değişmektedir ve “kek” diye tabir edilen kurutucu yük değerini belirtmektedir.



Şekil 3.6. Kurutucu yükünün fonksiyonu olarak kurutma hızı sabitleri.

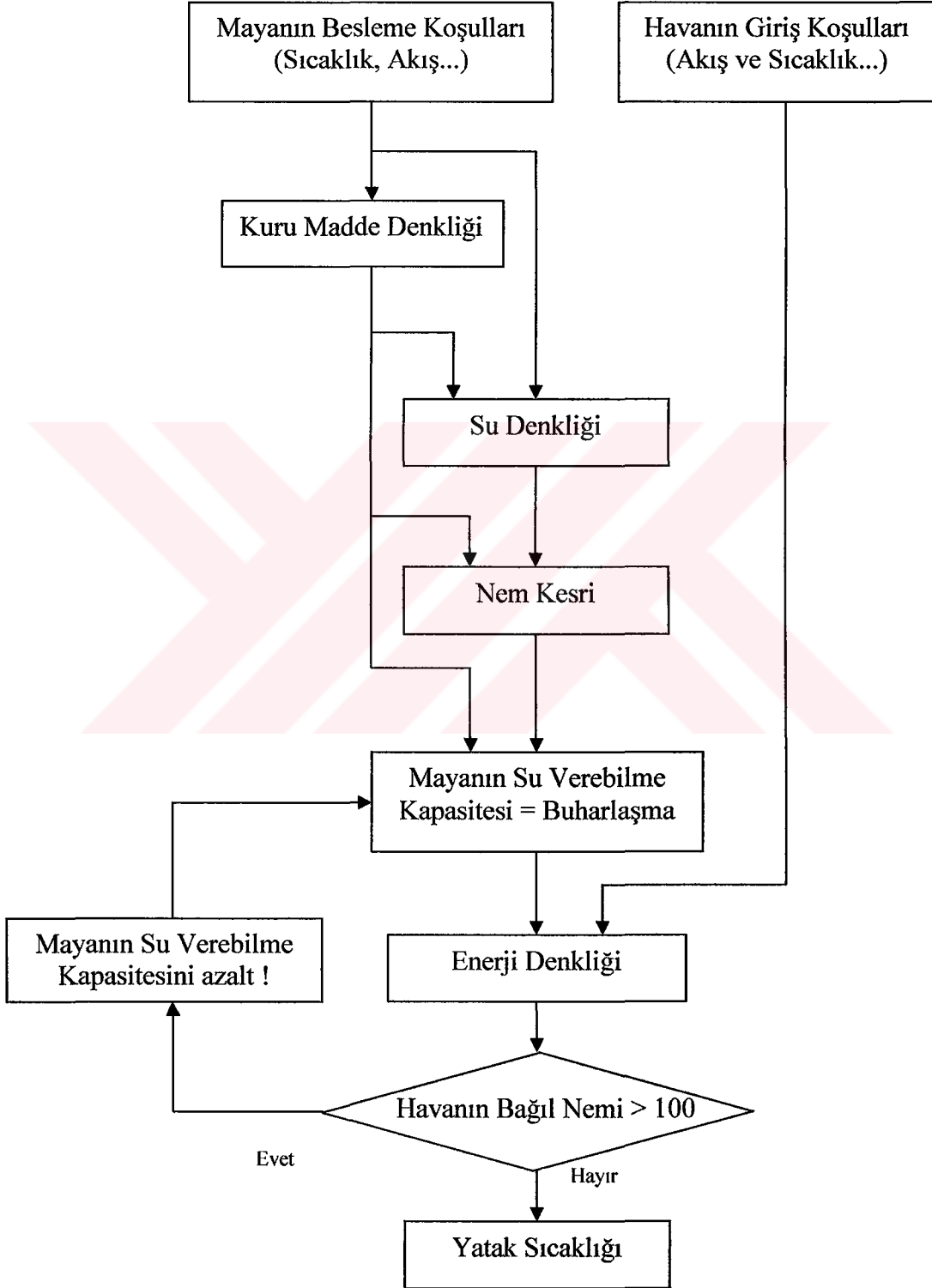
3.5.2. Homojen modelleme benzetim sonuçları

Kurutma süreci üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci fazda kurutucu tanecikli malzeme ile yüklenir. Daha sonra kurutma sıcaklığı sabit kurutma fazını başlatmak için arttırılır. Üçüncü faz azalan kurutma fazı veya düşen kurutma hızı periyodu diye adlandırılan kısımdır. Sonuçta istenen nem kesrine ulaşıldığında, kuruyan malzeme kurutucudan boşaltılır. Kurutma deneyleri iki tip ürün için yapılmıştır: birincisi 0,6 mm çaplı deliklerden, ikincisi ise 1,2 mm çaplı deliklerden geçerek kurutucuya girerler. Yapılan homojen matematiksel modelin bilgisayar programı Matlab 6.5 (Matlab® 2000) ile yapılmıştır (Bkz. EK B). Şekil 3.7’de benzetimler için kullanılan hava profili gösterilmiştir.



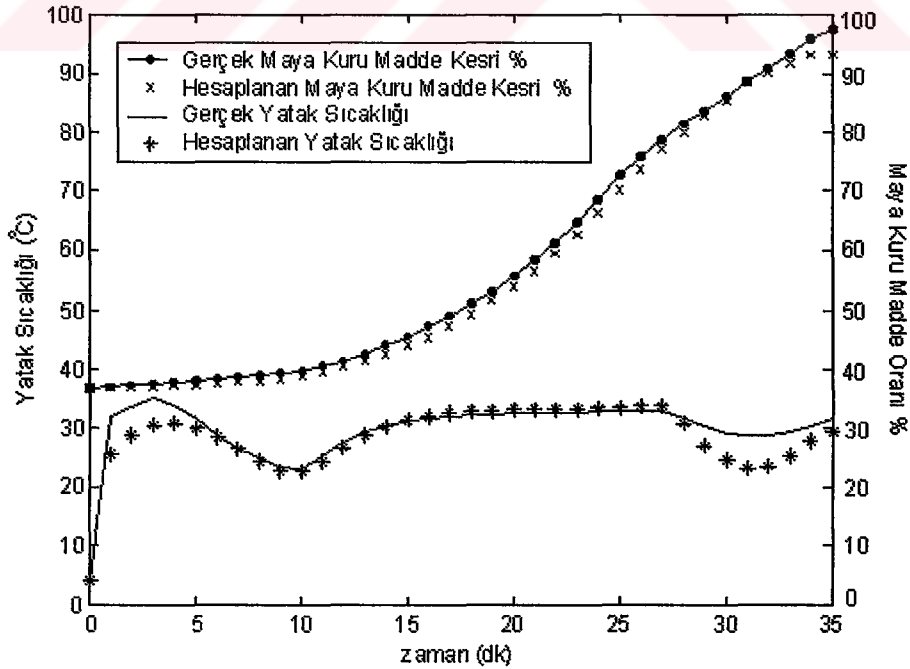
Şekil 3.7. Benzetimde kullanılan hava besleme profilleri.

Şekil 3.8’de ekmek mayası akışkan yataklı kurutma süreci için yapılan homojen matematiksel modele ait akış diyagramı gösterilmiştir. Akış diyagramından da anlaşılacağı üzere ilk önce mayanın verebileceği suyun tamamının buharlaştığı göz önüne alınarak basınç ve enerji denkleğinden yatak sıcaklığı bulunur.

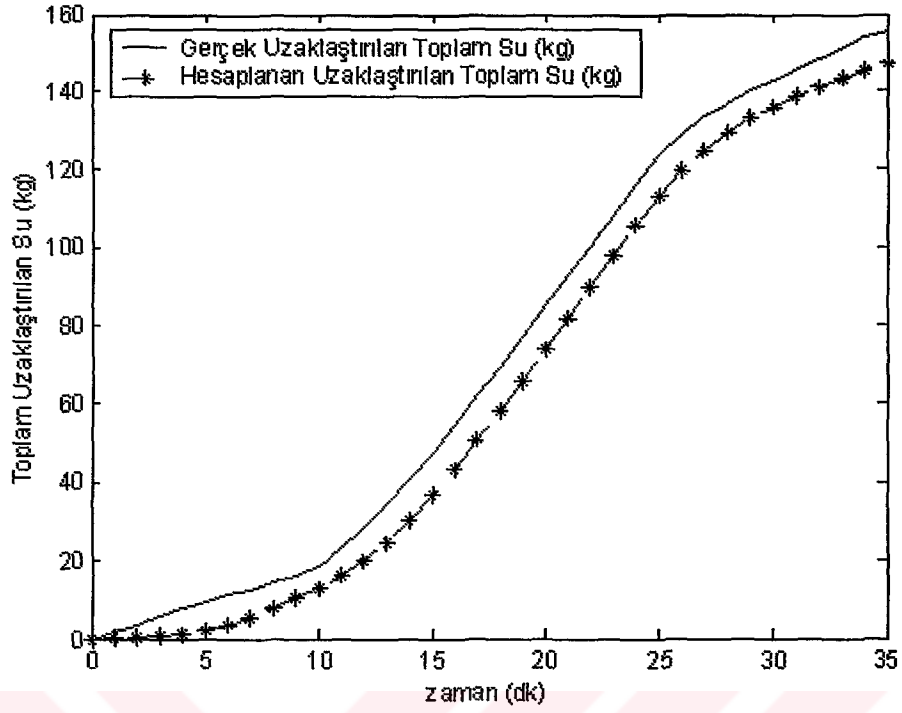


Şekil 3.8. Homojen matematiksel modelin akış diyagramı.

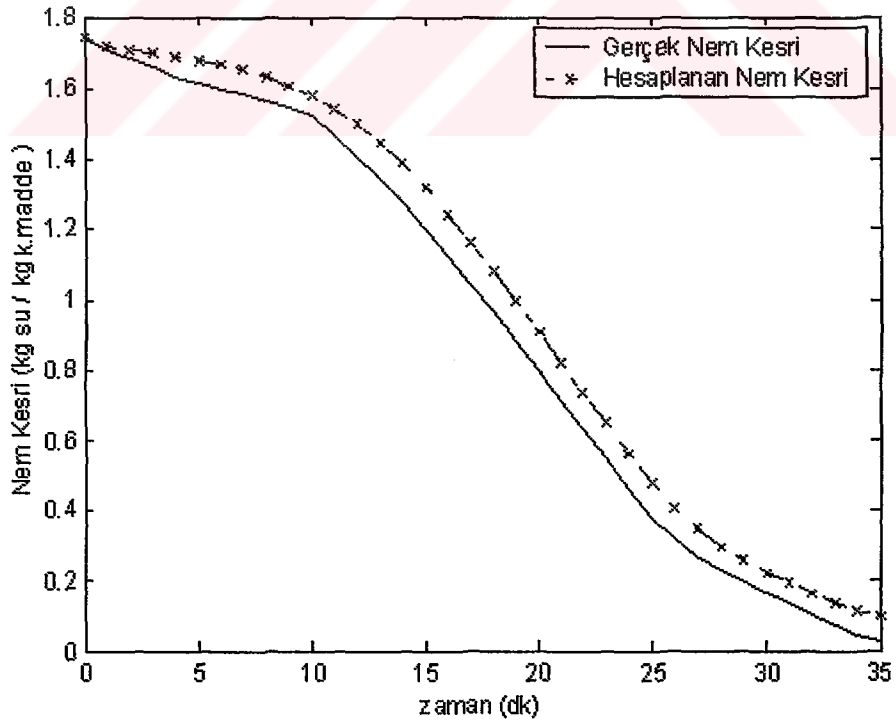
Bulunan yatak sıcaklığı yardımı ile havanın doyum basıncı ve oradan da havanın bağıl nemi hesaplanır. Eğer havanın bağıl nemi %100'ün üzerinde ise mayanın su verebilme kapasitesini azaltıp, tekrar basınç ve enerji denkleğinden sıcaklık bulunur. Bu döngü bağıl nem %100'e eşit veya %100'ün altında olana kadar devam ettirilir. Benzetim programında örnekleme periyodu olarak bir saniye alınmıştır. Bu nedenle modelin içerdiği tüm parametreler saniye birimine indirgenmiştir. Benzetim süresi 2100 saniye, yani 35 dakika olarak alınmıştır. Kurutulacak maya % 63,2'lik nem kesri ile 8 dakikada akışkan yataklı fırına yüklenir. Toplam kek maya 250 kg ağırlığına sahiptir. Mayanın giriş sıcaklığı 277 K (4°C) olarak alınmıştır. Şekil 3.9'da benzetim sonuçları ile endüstriyel ortamdan alınan ekme mayası kurutması sürecine ait verilerin karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 3.10'da kurutma süresi boyunca toplam uzaklaştırılan suyun zamanla değişimi, Şekil 3.11'de ise nem kesrinin değişimi gösterilmiştir. Buharlaşma hızı kurutma süreci boyunca mayanın su verebilme ve havanın su alabilme kapasitesine göre değişir (Şekil 3.12). Buharlaşma profilinden, mayanın su verebilme kapasitesi ile havanın su alabilme kapasitesi arasından küçük olanın buharlaşma hızını verdiği görülmektedir. Fırın yatağındaki kuru maya ve suyun kütleli değişimleri kurutma evreleri ile bölümlendirilerek Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



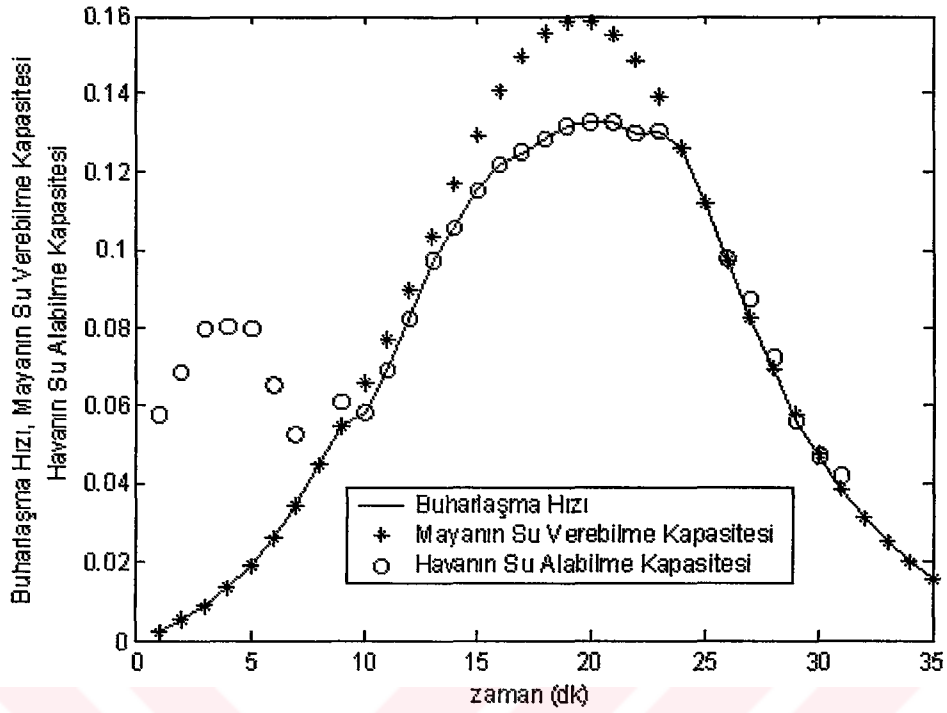
Şekil 3.9. Akışkan yataklı ekme mayası kurutma süreci modelinin benzetim sonuçları:fırın yatak sıcaklığı ve % kuru madde oranı.



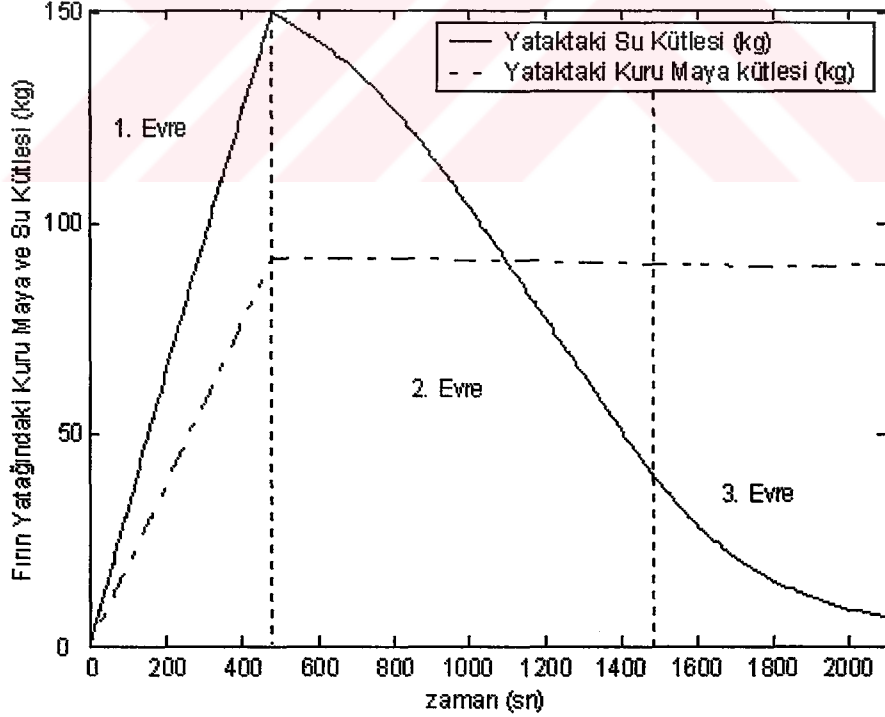
Şekil 3.10. Kurutma süreci boyunca toplam uzaklaştırılan suyun (kg) zamanla değişimi.



Şekil 3.11. Kurutma süreci boyunca nem kesrinin (kg su/kg k.matde) zamanla değişimi.



Şekil 3.12. Buharlaştırma hızı, mayanın su verebilme kapasitesi ve havanın su alabilme kapasitesinin zamanla değişimi.



Şekil 3.13. Fırın yatağındaki kuru maya ve suyun kurutma süreci sırasındaki kütesel değişimleri.

Bu bölümde bir akışkan yataklı kurutma süreci için fiziksel kanunlara dayalı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel model temel olarak kütle ve enerji denkleğine dayanmaktadır. Modelin enerji denkliği ifadesinin sonunda yatak sıcaklığına ait bir adi diferansiyel denklem bulunmuştur. Modelin geçerliliğinin sınanması için ekmeek mayasının (*Saccharomyces cerevisiae*) akışkan yataklı kurutma sürecine ait endüstriyel veriler benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarından yapılan model ile endüstriyel ortamdan alınan kurutma verilerinin iyi bir uyum sağladığı gözlemlenebilmektedir. Yapılan kurutma modeli sürecin ilk koşulları ve hava profili değiştirilerek diğer tüm akışkan yataklı kurutma süreçlerine de rahatlıkla uygulanabilir. Homojen kurutma modelinin dezavantajı, granül boyutu büyük olan maddelerin kurutulmasında istenen sonuçları tam olarak verememesidir. Büyük granüllü maddelerin kurutulmasında granül içindeki suyun difüzyonundan dolayı yapılan matematiksel model ihtiyacı karşılayamamakta ve bu nedenle yeni bir modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sonraki bölümde difüzyon modelini esas alan yeni bir kurutma modeli ve kurutma sırasındaki kalite kaybı üzerine yapılan çalışmalar yer alacaktır.

BÖLÜM 4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GRANÜL BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Bir önceki bölümde kurutma sürecinin enerji ve kütle denklemlerine dayalı homojen matematiksel modeli ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmişti. Bu bölümde ise, kurutulan malzemenin granül boyutları ele alınmış ve granül içerisindeki doğrusal olmayan difüzyon ve sıcaklık kısmi diferansiyel denklemlerine bağlı matematiksel modeli çıkarılmaya çalışılmıştır. Yapılan homojen ve granül matematiksel kurutma modellerinin karşılaştırılması ise bu bölümün son kısmında yer almaktadır. Bir önceki bölümde olduğu gibi yapılan matematiksel modellemenin geçerliliğinin sınanması amacıyla ekmek mayası (*Saccharomyces cerevisiae*) kurutulacak madde olarak seçilmiştir.

Biyolojik ve hassas ürünlerin kurutulması için endüstride çok sayıda kurutucu kullanılmaktadır (Mujumdar 1995). Akışkan yataklı kurutma tekniği modern kurutma yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir (Hovmand 1995). Akışkan yataklı kurutucularda, ürünün silindirik veya küresel granül biçiminde olabilmesi için kurutulacak malzeme bir delikli tabakadan geçirilerek kurutucuya yüklenir. Tanecikli malzeme bu süre içinde akışkandır ve malzemenin nemi genelde hava olan bir kurutma aracı ile uzaklaştırılır (Bayrock and Ingledew 1997a). Akışkan yatakta kurutulan tanecikli malzemeler pirinç, tahıl benzeri gıdalardır. Bu tip ürünlerin kurutma karakteristikleri granül içerisindeki nem difüzyonundan dolayı sınırlı bir yapıya sahiptir (Pary 1985). Literatürde akışkan yataklı kurutma süreçlerinin kurutma performansını tanımlayan farklı matematiksel modeller bulunmaktadır (Bayrock and Ingledew 1997b, Ballegooijen ve diğ. 1997, Quirijns ve diğ. 1998). Bununla beraber bu modellerin çoğunluğu parametrelere dayalı modellerdir. Temple ve Boxtel (1999ab) siyah çayın akışkan yataklı kurutması için bir ince tabaka (thin layer) kurutma modeli geliştirdiler. Geliştirdikleri model ile gerçek ölçümler arasında iyi bir uyum sağlamak için de kurutma hızını 0,6 gibi bir faktörle çarpmışlardır. Granüllerden suyun taşınma işlemi çoğunlukla granül boyutuna bağlı difüzyon ile

gerçekleşir. Kerkhof ve Schoeber (1974), Luyben (1982), Quirijns, Boxtel ve diğ. (1998), Zimmermann ve Bauer (1986) tarafından, tanecikli malzemelerin kurutulması için değişik mekanistik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller normalde doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerine dayanmaktadır (Schoeber 1976) ve bu tip diferansiyel denklemlerin analitik çözümlerinin karmaşıklığı sebebi ile çözümlerinde sayısal yöntemler kullanılır (Gerald & Wheatly 1984). Coumans (1987) tarafından kurutma süreçlerindeki doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için bir teori geliştirilmiştir (Liou & Bruin 1982ab). Bu teoriye göre, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerde kullanılan difüzyon katsayısı sıcaklık ve nem kesrinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır (Coumans 1987).

Bu çalışmada içi oyuk silindirik ve küresel granül geometrileri kullanılmıştır. Akışkan yatak içindeki tüm granüllerin aynı boyutlarda olduğu varsayılmıştır. Granülün ilk önce büzülmediği ve kuruma sırasında hacminin değişmediği varsayımı ile nümerik çözüm yapılmış; ikinci aşamada ise büzülme denkleminin matematiksel modele ilave edilmesi ile birlikte deneysel verilerle benzetim sonuçlarının daha iyi örtüşmesine çalışılmıştır.

4.1. Eş Zamanlı Isı ve Kütle Aktarım Modeli

4.1.1. Difüzyon modeli

Schoeber (1976) tarafından önerilen difüzyon eşitliğinin ifadesi,

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \rho_s D \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada X granül içerisindeki nem kesrini (kg su/kg k.madde), D granül içerisindeki nemin difüzyon katsayısını (m^2/s), ρ_s kuru maddenin kütle konsantrasyonunu (kg/m^3), v ise geometrik faktörü göstermektedir. Geometrik faktör (v) 1 ise granül silindirik, 2 ise granül küresel olarak ele alınır. Difüzyon eşitliğinin başlangıç koşulu denklem 4.2'deki gibidir:

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R_d \Rightarrow X(0, r) = X_0 \quad (4.2)$$

Sınır koşulu olarak bu çalışmada diğer sınır koşullarına göre daha karmaşık fakat süreç ile en iyi örtüşen Robin sınır koşulu kullanılmıştır:

$$t > 0 \Rightarrow \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4.3)$$

$$t > 0 \Rightarrow j_{m,i} = -D\rho_s \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R_d} = k(\rho_{wv,i} - \rho_{wv,g}) \quad (4.4)$$

Burada $j_{m,i}$ granül yüzeyindeki kütle akışını ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), k kütle aktarım katsayısını (m/s), $\rho_{wv,i}$ granül yüzeyindeki su buharı konsantrasyonunu (kg/m^3), $\rho_{wv,g}$ ise yatak içindeki havanın su buharı konsantrasyonunu (kg/m^3) göstermektedir.

4.1.2. Isı aktarım modeli

Granül içerisinde nem kesri ile birlikte sıcaklıkta değişiklik gösterir. Bu nedenle sıcaklık hem zamana hem de uzaya bağlı olarak değişmektedir. Denklem 4.5'de sıcaklık ile ilgili diferansiyel denklem verilmiştir:

$$\frac{\partial(T(\rho_s c_{p,s} + \rho_m c_{p,m}))}{\partial t} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.5)$$

Burada T sıcaklığı (Kelvin), ρ_m granül içerisindeki su konsantrasyonunu (kg/m^3), $c_{p,s}$ ve $c_{p,m}$ sırasıyla mayanın ve suyun özgül ısılarını (J/kgK), λ ise maddenin termal iletkenliğini (J/smK) göstermektedir. Granül içerisindeki sıcaklık eşitliğinin başlangıç koşulu denklem 4.6'daki gibidir:

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R_d \Rightarrow T(0, r) = T_0 \quad (4.6)$$

Robin sınır koşulu difüzyon eşitliğinde olduğu gibi sıcaklık eşitliğinde de kullanılmıştır:

$$t > 0 \Rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4.7)$$

$$t > 0 \Rightarrow j_{T,i} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_d} = \alpha(T(t, R_d) - T_a) + \Delta H_v \big|_{T(t, R_d)} j_{m,i} \quad (4.8)$$

Burada $j_{T,i}$ granül yüzeyindeki ısı akışını (J/m^2s), α ısı transfer katsayısını (J/sm^2K), T_a akışkan yatağa giren hava sıcaklığını (Kelvin), ΔH_v 'de suyun buharlaşma ısısını (J/kg) göstermektedir.

4.2. Ürün Kalite Kaybının Modellenmesi

Ürün kalite kaybı ile ilgili olarak Lievense (1991) tarafından geliştirilen birinci derecedeki diferansiyel denklem yazılabilir:

$$\frac{dQ}{dt} = -k_e Q \quad (4.9)$$

Burada Q aktif ürün konsantrasyonunu yani kaliteyi, k_e ise ürün aktivite kaybının hızını ($1/s$) göstermektedir. Arrhenius denklemi temel alınarak, ürün kalite kaybı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak da düşünülebilir (Liou, Luyben and Bruin 1984; Liou and Bruin 1982a, 1982b, Lievense 1991):

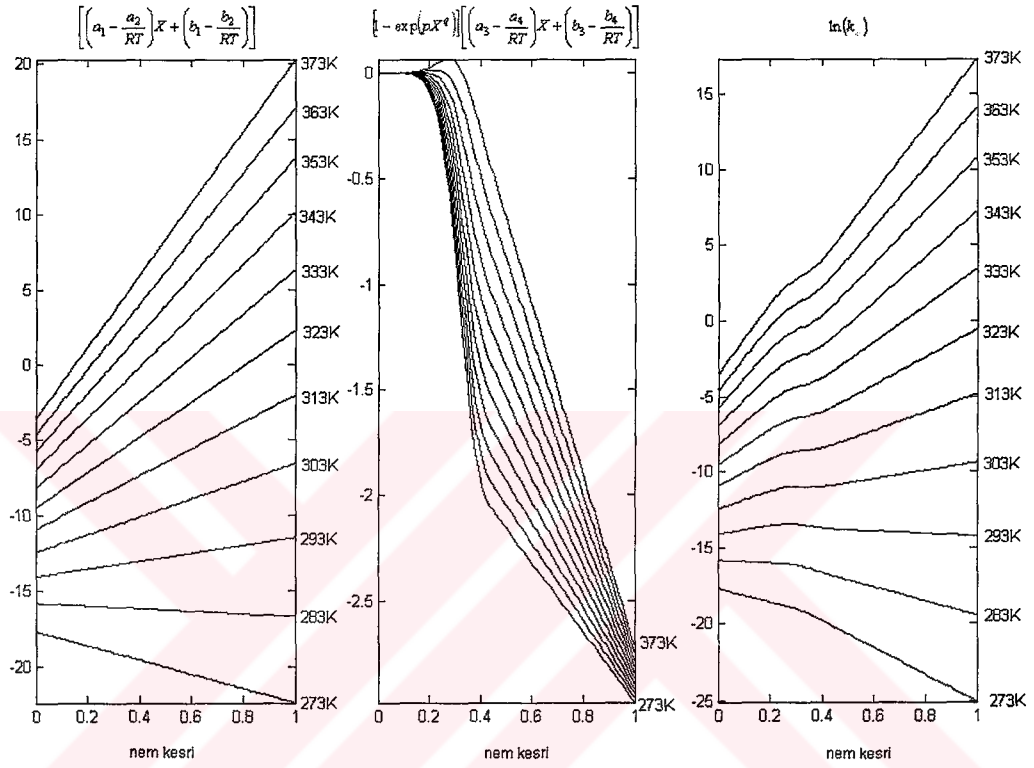
$$k_e = k_\infty \exp\left(\frac{-E_{a,i}}{RT}\right) \quad (4.10)$$

Burada k_∞ frekans faktörünü, $E_{a,i}$ ise aktivasyon enerjisini belirtmektedir. Ürün aktivite kaybı hızının e tabanında logaritması $\ln(k_e)$ Lievense (1991) tarafından *Lactobacillus plantarum* bakterisi için yaptığı çalışmada sıcaklık ve nem kesrinin bir fonksiyonu olarak geliştirilmiştir:

$$\ln(k_e) = \left[\left(a_1 - \frac{a_2}{RT} \right) X + \left(b_1 - \frac{b_2}{RT} \right) \right] + [1 - \exp(pX^q)] \left[\left(a_3 - \frac{a_4}{RT} \right) X + \left(b_3 - \frac{b_4}{RT} \right) \right] \quad (4.11)$$

Burada p, q, a_i, b_i denklemin ayarlanabilir parametre değerleridir. Eğer $p < 0$ ve $q \geq 1$ ise, yüksek nem kesri değerlerinde, $\exp(pX^q) \approx 0$ olacağından $\ln(k_e)$ değeri iki kısmın toplamından oluşacaktır. Düşük nem kesri değerlerinde ise $\exp(pX^q) \approx 1$

olacağından $\ln(k_e)$ değeri eşitliğin yalnızca ilk kısmı ile tanımlı kalacaktır. Şekil 4.1'de ürün aktivite kaybı hızına ait denklemin değişik sıcaklık ve nem kesri değerleri için değişimleri gösterilmiştir. Şekilden düşük nem kesri değerlerinde ürün aktivite kaybı hızının, yani ürün kalite kaybının sıcaklığa daha az duyarlı olduğu açıkça gözükmemektedir.



Şekil.4.1. Ürün aktivite kaybı hızının sıcaklık ve nem kesri ile olan ilişkisi.

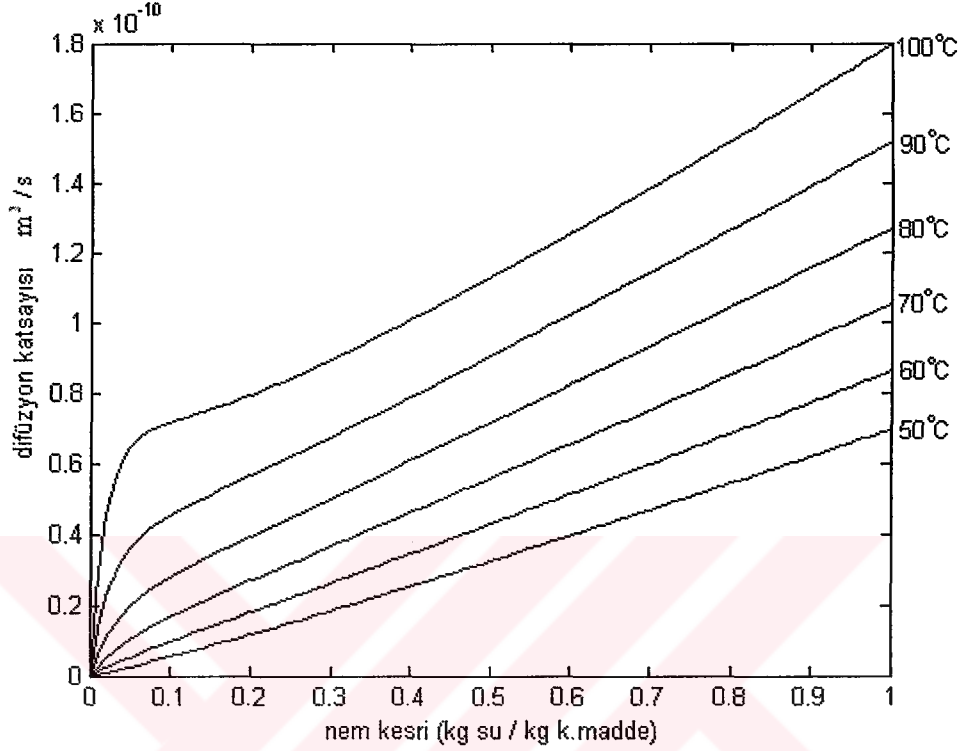
4.3. Modelde Kullanılan Parametreler ve Sabitler

Luyben, Liou ve Bruin (1982) tarafından geliştirilen bir yönteme göre difüzyon katsayısının sıcaklık ve nem kesrine bağlılığı deneysel olarak belirlenebilir. Difüzyon katsayısı sıcaklık ve nem kesrine bağlı olarak denklem 4.12'deki gibi değişmektedir.

$$D = D_{ref} \exp\left(\frac{E_D}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \left[\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right]^a \quad (4.12)$$

$$E_D = 80000 \left(\frac{1}{1+10X} + 0,147\right) \quad (4.13)$$

Burada E_D difüzyon için aktivasyon enerjisini (J / mol), a boyutsuz üs katsayısını, $R=8,314$ J / molK gaz sabitini göstermektedir. Şekil 4.2’de difüzyon katsayısının sıcaklık ve nem kesri ile olan ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil.4.2. Difüzyon katsayısının sıcaklık ve nem kesri ile ilişkisi ($D_{ref}=1,5.10^{-10}m^2/s$, $T_{ref}=323,15K$ ($50^{\circ}C$), $a=1,1066$, $X_e=0$, $X_0=1$).

$c_{p,s}$ mayanın özgül ısısının (J/kgK) hesaplanması ile ilgili bilgiler EK.A’da yer almaktadır. Denklem 4.4’de yer alan $\rho_{wv,i}$ granül yüzeyindeki su buharı konsantrasyonu, $\rho_{wv,sat}$ havadaki doymuş su buharı konsantrasyonuna bağlı olarak denklem 4.14’deki gibi değişir:

$$\rho_{wv,i} = \rho_{wv,sat} a_w \quad (4.14)$$

Burada a_w boyutsuz bir parametre olup, su aktivitesini göstermektedir. a_w granülün havaya verebileceği maksimum su miktarının havanın doyum anında taşıyabileceği su miktarına oranıdır. Kurutma sürecinden alınan fırın sıcaklığı ve nem kesri verileri ile a_w su aktivitesi bulunabilir. a_w su aktivitesi, nem kesrine bağlı olarak değişen Halsey, GAB, Oswin, Henderson ve polinom eşitlikleri ile ölçülen verilere uyumlu hale getirilebilir (Temple and Boxtel 1999c). Bu çalışmada diğer eşitliklere göre

standart sapması daha küçük olan GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) eşitliği kullanılmıştır. GAB eşitliği denklem 4.15’de verilmiştir (Berg, Leniger 1978, Lievens 1991):

$$X_{m,i} = \frac{WCKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad (4.15)$$

Burada W, C, K kurutma sürecinden alınan verilerle matematiksel modelin birbirine uyumlu olması için GAB eşitliğinde ayarlanabilir parametrelerdir. Denklem 4.15 herhangi bir referans sıcaklığındaki nem kesri ile a_w su aktivitesinin değişimini gösterir. Diğer sıcaklıklar için a_w aşağıdaki gibi bulunabilir (Lievens 1991):

$$\ln \frac{a_w(T_{ref})}{a_w(T)} = \frac{E_s}{R} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right] \quad (4.16)$$

Burada E_s aktivasyon enerjisini (J/mol) göstermektedir. Bu çalışmada GAB eşitliğindeki parametreler en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3’de değişik sıcaklıklar için hesaplanan ve ölçülen a_w ile nem kesrinin değişimleri gösterilmektedir.

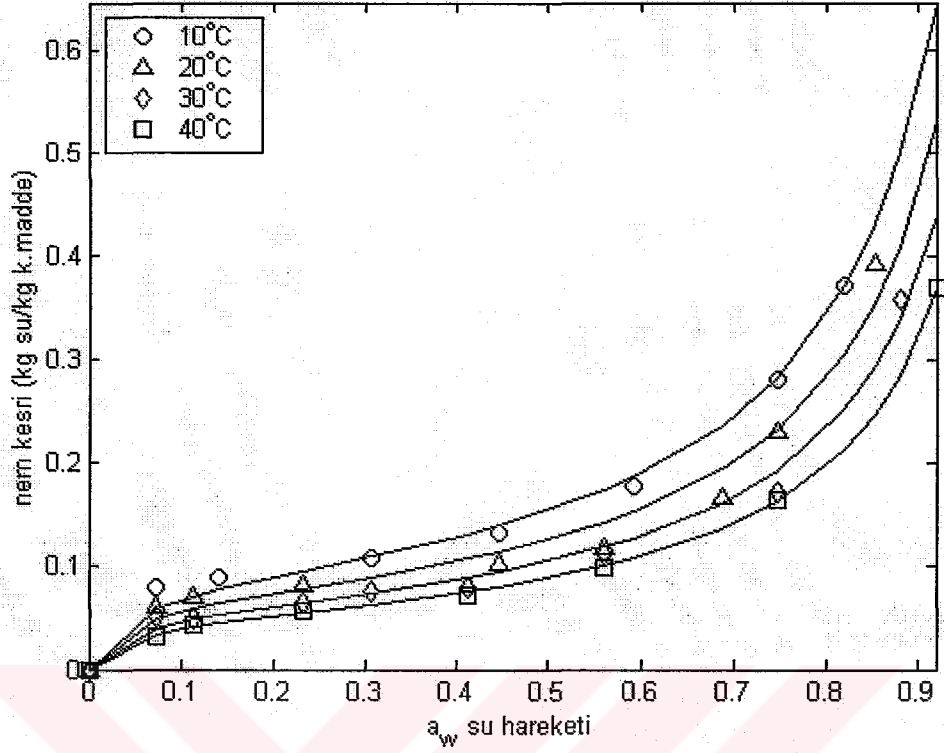
Liou’a (1982) göre $\rho_{wv,sat}$ havadaki doymuş su buharı konsantrasyonu havanın sıcaklığına bağlı olarak denklem 4.17’deki gibi değişmektedir:

$$\rho_{wv,sat} = \frac{C_1}{T} \exp\left(\frac{C_2}{T} + C_3 + C_4 T + C_5 \ln T\right) \quad (4.17)$$

Denklem 4.17’de kullanılan sabit C değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir:

Tablo 4.1. Denklem 4.17’de kullanılan sabit değerler.

C_1	+2,1936 E -03	C_4	+5,7447142 E - 03
C_2	-7246,5822	C_5	-8,2470402
C_3	+77,641232		



Şekil 4.3. Ekmek mayası için nem kesrine bağlı olarak dört sıcaklık değerinde ölçülen (Josic 1982) ve hesaplanan a_w su aktivitesi profilleri ($C=23,5737$, $K=0,9458$, $W=0,0482$, $E_s=13.774$).

ΔH_v suyun buharlaşma ısısına ait eşitlik EK.A'da verilmiştir. Denklem 4.8'de yer alan α ısı aktarım katsayısı denklem 4.18 yardımı ile bulunabilir (Bird, Stewart, and Lightfoot 1960):

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_g (1 - \gamma/2) & \Leftrightarrow \gamma < 0,1 \\ \alpha_g \left(\frac{\gamma}{e^\gamma - 1} \right) & \end{cases} \quad (4.18)$$

Burada γ denklem 4.19 ile ifadesi verilmiş bir parametreyi, α_g ise gaz fazındaki ısı aktarım katsayısını gösterir.

$$\gamma = \frac{j_{m,i} c_{p,wv}}{\alpha_g} \quad (4.19)$$

α_g gaz fazındaki ısı aktarım katsayısı, gaz fazındaki ısı ve kütle transferi arasındaki Chilton-Colburn ilişkisinden bulunabilir (Liou 1982):

$$\alpha_g = k_g (d_a c_{p,a})^{1/3} \left(\frac{\lambda_a}{D_a} \right)^{2/3} \quad (4.20)$$

Burada d_a havanın yoğunluğunu (kg/m^3), $c_{p,a}$ havanın özgül ısısını (J/kgK), λ_a havanın ısıl iletkenliğini (J/msK), k_g gaz fazındaki kütle aktarım katsayısını, D_a ise havadaki suyun yayınımlarını (m^2/s) göstermektedir. Havanın ısıl iletkenliği λ_a ve havadaki suyun yayınımlarını D_a sıcaklığa bağlı olarak denklem 4.21 ve denklem 4.22'deki gibi değişir:

$$\lambda_a = 4,5 \cdot 10^{-3} + 7,26 \cdot 10^{-5} T \quad (4.21)$$

$$D_a = 5,28 \cdot 10^{-9} T^{3/2} \quad (4.22)$$

Gaz fazındaki kütle aktarım katsayısı k_g , Stefan difüzyon denkleminde bulunabilir (Liou, Luyben and Bruin 1984):

$$k_g = \frac{k (X'_{wv,i} - X'_{wv,g})}{\ln \left[\frac{1 - X'_{wv,g}}{1 - X'_{wv,i}} \right]} \quad (4.23)$$

Burada X' denklem 4.23'de verilen toplam tabanlı nem kesrini (kg / kg toplam kütle) göstermektedir.

$$X'_{wv} = \frac{\rho_{wv}}{\rho_{wv} + \rho_a} \quad (4.24)$$

$$\frac{\rho_a}{d_a} + \frac{\rho_{wv}}{d_{wv}} = 1 \Rightarrow \frac{\rho_a}{d_a} = 1 - \frac{\rho_{wv}}{d_{wv}} \Rightarrow \rho_a = \left(1 - \frac{\rho_{wv}}{d_{wv}} \right) d_a \quad (4.25)$$

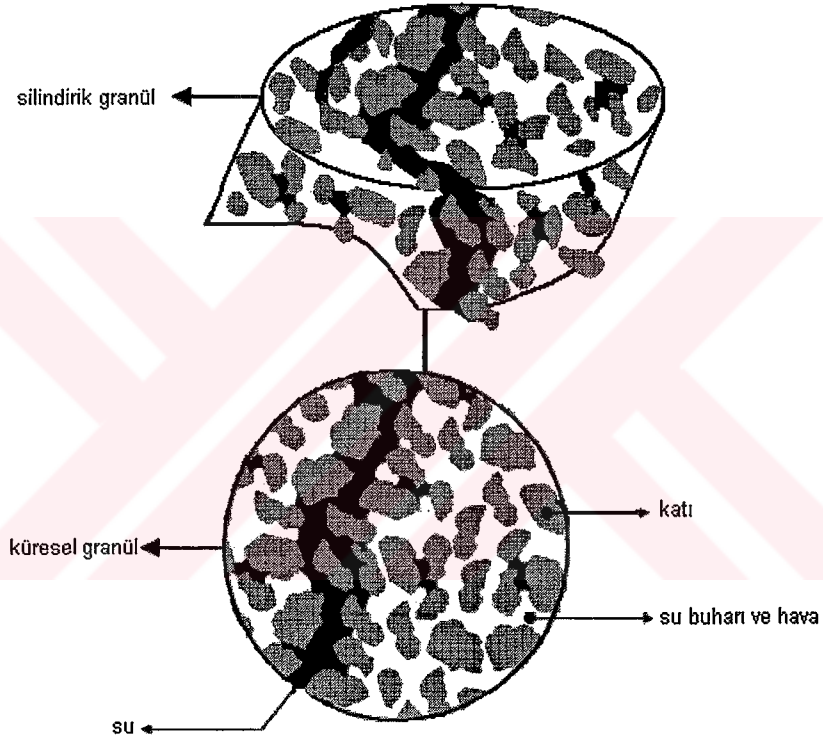
$$X'_{wv} = \frac{\rho_{wv}}{d_a + \rho_{wv} \left(1 - \frac{d_a}{d_{wv}} \right)} \quad (4.26)$$

Burada d_{wv} su buharı yoğunluğunu (kg/m^3), ρ_{wv} havadaki su buharı konsantrasyonunu (kg/m^3) göstermektedir. Denklem 4.4'de yer alan k kütle aktarım

katsayısı deneysel veriler yardımıyla bulunabilir. Aynı denklemde yer alan $\rho_{wv,g}$ yatak içindeki havanın su buharı konsantrasyonu ise sabittir.

4.4. Büzülmeyen Granül Modeli

Granülün büzülme modelinde, granül hacmi, yarıçapı ve ρ_s kuru maddenin kütle konsantrasyonu sabit kalır. Şekil 4.4’de büzülme granül şematik olarak gösterilmiştir. Kurutma sürecindeki granül, su, katı, gaz fazındaki su buharı ve havadan oluşmaktadır (Kroes 1999).



Şekil 4.4. Bir kurutma süreci sırasında büzülme granülün şematik gösterimi.

Denklem 4.1’deki doğrusal olmayan difüzyon kısmi diferansiyel denklemi yeniden düzenlenecek olursa,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v D \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.27)$$

elde edilir. Bu modelde granül içerisindeki su konsantrasyonu ρ_m , granülden havaya geçen su sebebi ile nem kesrine bağlı olarak zamanla azalmaktadır. Granül hacminde

herhangi bir değişiklik olmadığından, kuru maddenin kütle konsantrasyonu ρ_s sabit kalır.

$$\rho_s = \rho_{s,0} = \text{sabit} \quad (4.28)$$

$$\rho_m = \rho_s \cdot X \quad (4.29)$$

4.5. Büzülen Granül Modeli

Bu model, granülün kurutma sürecindeki gerçek davranışını yansıtır. Bu çalışmada büzülmenin granül yüzeyinde homojen olduğu varsayılmıştır. Granül yüzeyi ile hava arasındaki su buharlaşması neticesinde, hacimde bir azalma meydana gelir. Hacmin azalması, beraberinde granülün yarıçapının azalmasına ve kuru maddenin kütle konsantrasyonunun da değişimine neden olur. Büzülen granülün bu fiziksel değişimi Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Büzülen granülün kurutma sırasındaki davranışı.

Granül içerisindeki suyun ve kuru maddenin hacimleri toplamı granülün toplam hacmini oluşturur:

$$V = V_m + V_s \quad (4.30)$$

Burada V hacmi (m^3) göstermekte olup, denklem 4.30’a büzülme katsayısı τ eklenir ve eşitlik düzenlenirse,

$$V = V_s \left(1 + \tau \frac{d_s}{d_m} \bar{X} \right) \quad (4.31)$$

elde edilir. Burada \bar{X} granül içerisindeki nem kesrinin ortalamasını göstermektedir. Kuru maddenin kütle konsantrasyonu ortalaması $\bar{\rho}_s$ ile ilgili eşitlik denklem 4.32'de verilmiştir.

$$\bar{\rho}_s V = d_s V_s \quad (4.32)$$

Denklem 4.32'de hacim yalnız bırakılır ve denklem 4.31'de yerine konup eşitlik düzenlenirse denklem 4.33'de kuru maddenin kütle konsantrasyonu ortalaması elde edilir.

$$\bar{\rho}_s = \frac{1}{\frac{1}{d_s} + \tau \frac{\bar{X}}{d_m}} \quad (4.33)$$

Su konsantrasyonu ortalaması $\bar{\rho}_m$ ise denklem 4.34'deki eşitlikte verilmiştir.

$$\bar{\rho}_m = \frac{\bar{X}}{\frac{1}{d_s} + \tau \frac{\bar{X}}{d_m}} \quad (4.34)$$

Granülün hacminin kurutma süreci boyunca azalması, aynı zamanda granülün yarıçapının da küçülmesine neden olur. Büzülen model için granül yarıçapına ait eşitlik denklem 4.35 ile verilmiştir.

$$R_d = R_o \left(\frac{d_m + \tau d_s \bar{X}}{d_m + \tau d_s \bar{X}_o} \right)^{1/(v+1)} \quad (4.35)$$

Silindirik ve küresel granül modelleri için ortalamalar sırasıyla denklem 4.36 ve 4.37'deki gibidir.

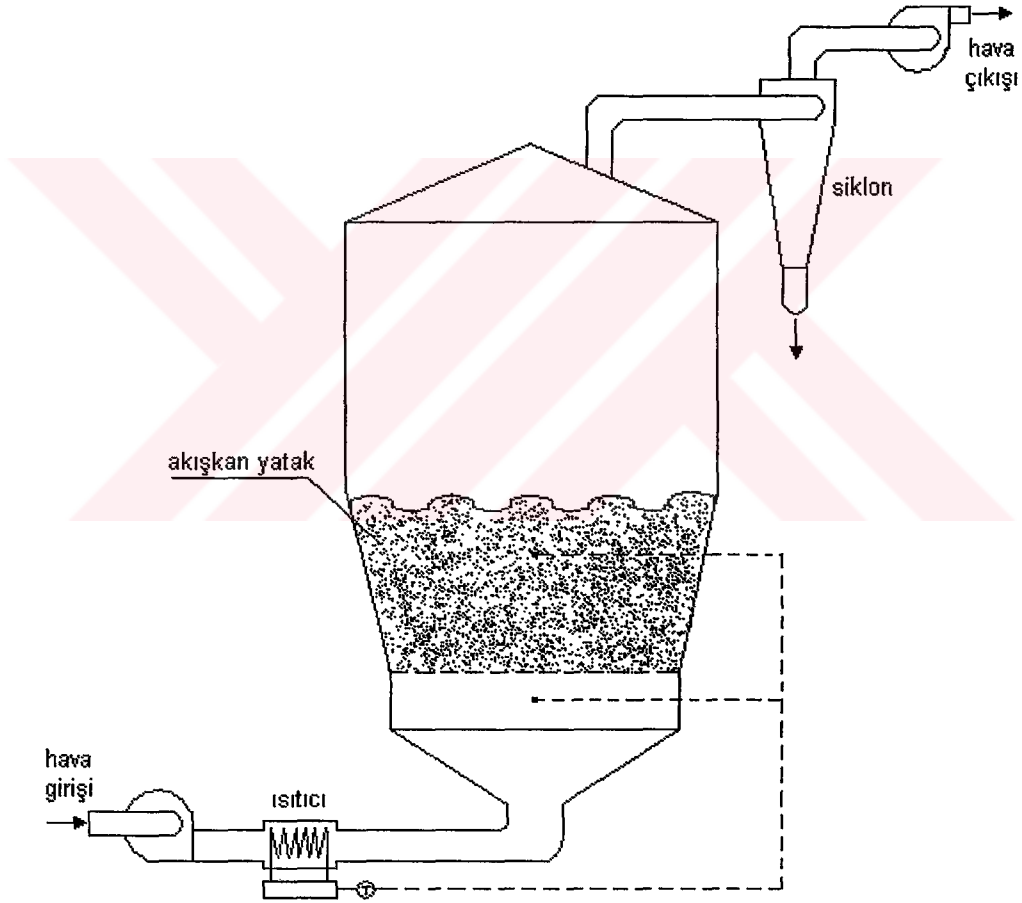
$$\text{Silindirik: } \bar{X} = \frac{1}{\pi R_d^2 L} \int_0^{R_d} 2\pi r L X(r) dr \quad (4.36)$$

$$\text{Küresel: } \bar{X} = \frac{1}{\frac{4}{3} \pi R_d^3} \int_0^{R_d} 4\pi r^2 X(r) dr \quad (4.37)$$

Silindirik granül için ortalama nem kesrini veren denklem 4.36'daki eşitlikte L silindirin granülün yüksekliğini göstermektedir. Modelde kullanılan diğer ortalamalar da yukarıdaki eşitliklerdeki gibi bulunur.

4.6. Akışkan Yataklı Kurutma Fırını Modeli

Biyolojik ürünlerin kurutulmasında akışkan yatak kurutucuların kullanılması oldukça yaygındır. Bu sistemlerin en büyük avantajı granül karışımının yüksek seviyede olması ve bu sebeple daha homojen bir sürecin meydana gelmesidir. Şekil 4.6'da bir akışkan yataklı kurutma fırını gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Akışkan yataklı kurutma fırını.

Diğer bir avantaj ise ürünün aşırı ısınmamasıdır. Bundan dolayı ısıya duyarlı maddelerin kurutulması için uygundur. Ürün granüllerinin mekanik olarak hasara uğrama riski, şeklinin değişmesi ve granüllerin topaklaşıp akışkanlığı bozabilme durumu ise akışkan yatakların dezavantajları arasındadır. Akışkan yataklı kesikli kurutma süreci, daha önce de ifade edildiği gibi ham maddenin kurutma fırınına

yüklenmesi ve doygun olmayan hava beslemesiyle maddenin içindeki suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılması esasına dayanır. Akışkan yataklı kurutma yönteminde, granüller yukarıya doğru çıkan hava içinde askıda kalırlarken bir yandan da kurutulurlar. Havanın hızı arttırıldığı zaman granül boyunca üst ve alt arasındaki basınç farkı da yükselir. Bu fark, yataktaki granül ağırlığının yatak yüzeyine oranına eşit oluncaya kadar artmaya devam eder. Bu noktada bütün granüller yukarı doğru çıkan gaz içinde askıda kalırlar (Kanarya 2002).

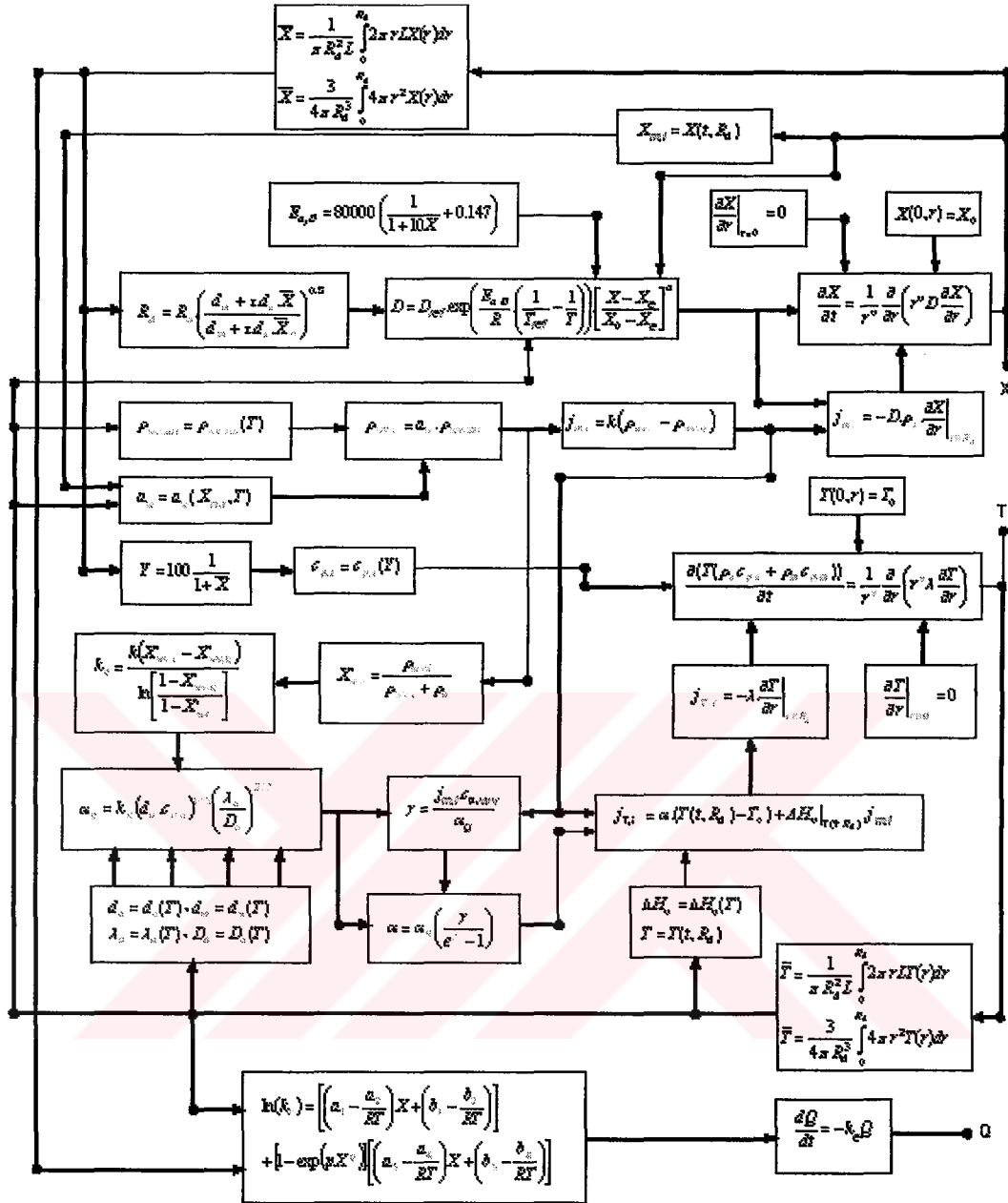
4.7. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler

Yapılan granül tabanlı kurutma sürecinin matematiksel modellemesine ait bilgisayar programı Matlab 6.5 (Matlab® 2000) ile yapılmıştır (Bkz. EK C). Şekil 4.7'de akışkan yataklı kurutma sürecinin granül tabanlı matematiksel modellemesinin akış diyagramı verilmiştir. Yapılan modelin benzetim sonuçları bu kısımda verilmiştir. Bir önceki bölümde yer alan homojen matematiksel model ile bu bölümde yapılan granül tabanlı modelin benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ise bu kısmın sonunda yer almaktadır. Benzetim çalışmalarında akışkan yataklı fırında mayanın yüklendiği varsayılmış ve benzetim programı buna göre işletilmiştir.

Benzetim çalışmaları aşağıdaki sıra ile yapılmıştır:

1. Büzülmeyen granüle sahip ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modeli benzetim çalışmaları,
 - a. Silindirik granüllü ekmek mayasının kurutma modelinin benzetimi,
 - b. Küresel granüllü ekmek mayasının kurutma modelinin benzetimi,
2. Büzülen granüle sahip ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modeli benzetim çalışmaları,
 - a. Silindirik granüllü ekmek mayasının kurutma modelinin benzetimi,
 - b. Küresel granüllü ekmek mayasının kurutma modelinin benzetimi.

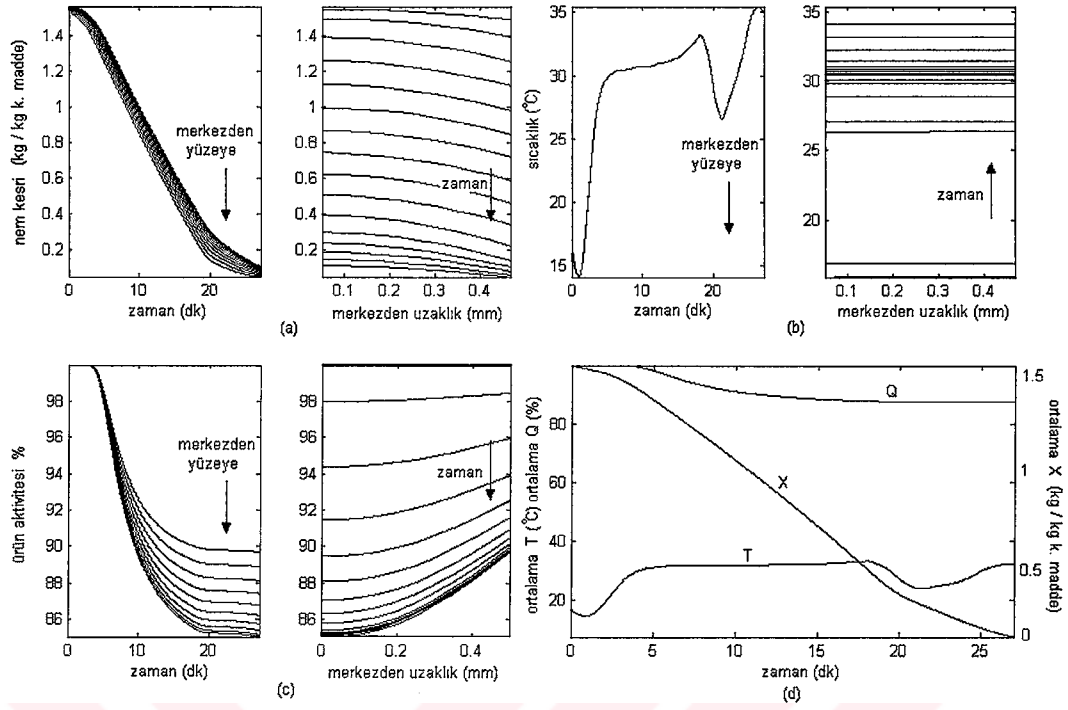
Modelde yer alan doğrusal olmayan kısmi difüzyon ve sıcaklık diferansiyel denklemleri Crank-Nicolson yöntemi ve açık (explicit) yöntem ile ayırık zamanda çözülmüştür (Bkz. EK D). Yine modelde ortalamaların hesaplanması ile ilgili eşitliklerdeki integrallerin sonuçları ise trapez yöntemi ile bulunmuştur.



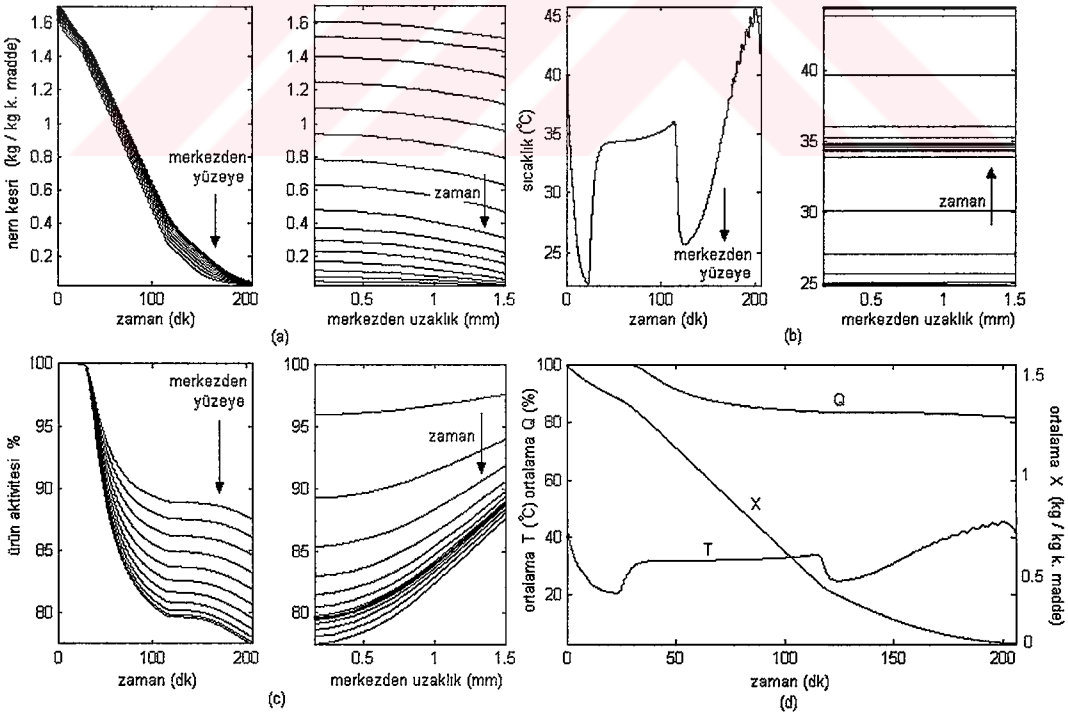
Şekil 4.7. Akışkan yataklı kurutma sürecinin granül tabanlı matematiksel modelinin akış diyagramı.

4.7.1. Büzülmeyen granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları

Yapılan matematiksel modelin test edilmesi için endüstriyel bir ekmek mayası üretim tesisinden alınan veriler kullanılmıştır (Bkz. Bölüm 3.4). Büzülmeyen silindirik ve küresel granüllerin kurutma süresince içerisindeki nem kesrinin, sıcaklığın ve ürün aktivitesinin zamanla ve yarıçapla değişimleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

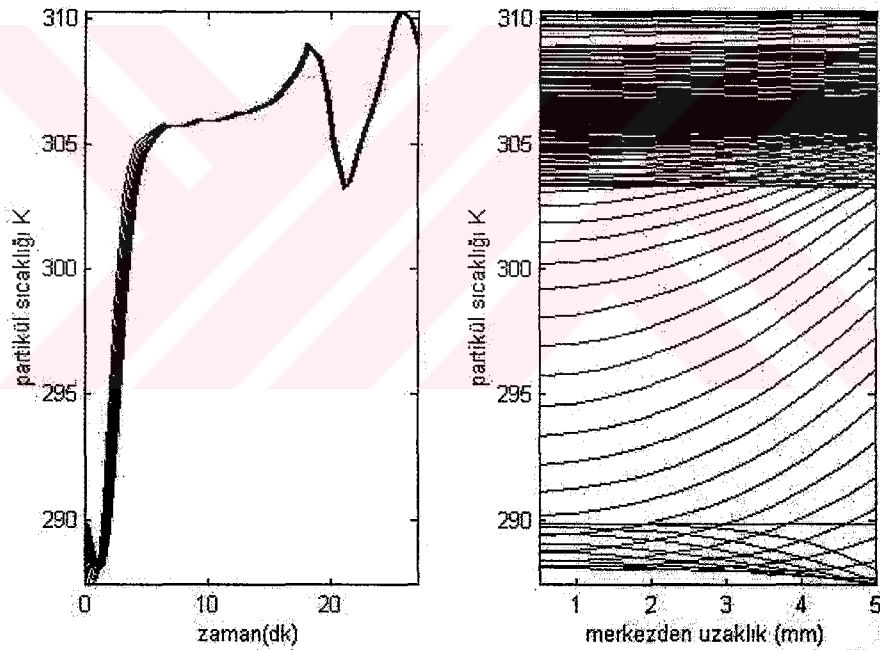


Şekil 4.8. Silindirik büzülmeyen granül içerisindeki nem kesri (a), sıcaklık (b) ve ürün aktivitesinin (c) zamana ve yarıçapa bağlı değişimleri ile ortalama sıcaklık, ortalama nem kesri ve ortalama ürün aktivitesinin kurutma süresince değişimleri (d) ($R_d = 0,5 \text{ mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ\text{C}$).



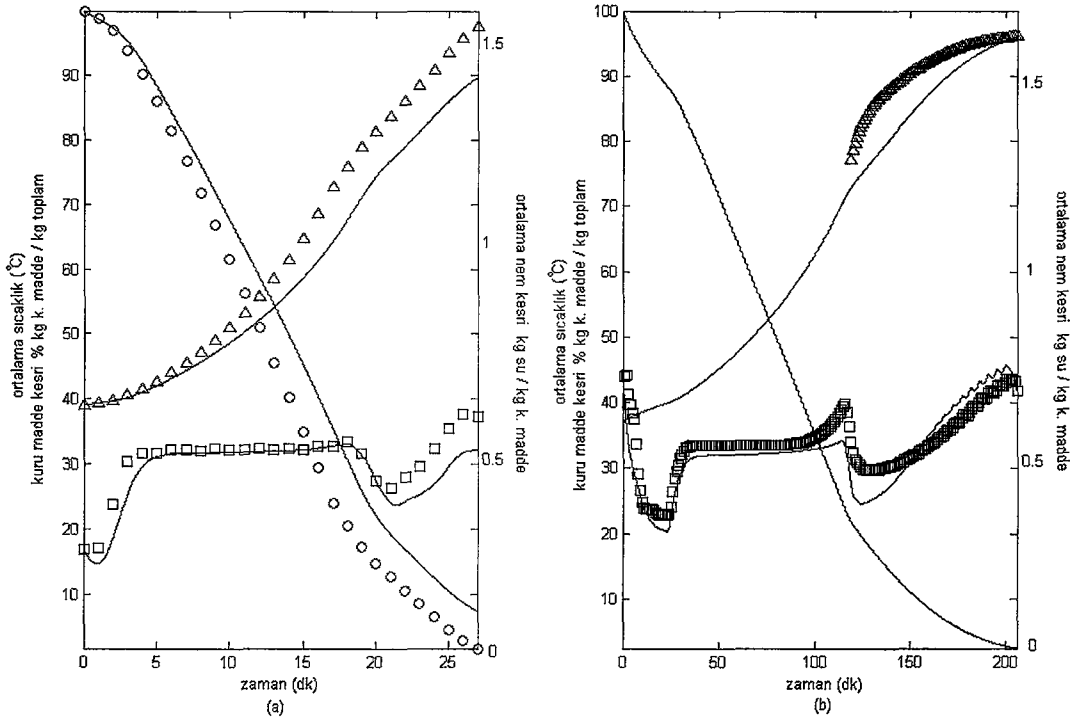
Şekil 4.9. Küresel büzülmeyen granül içerisindeki nem kesri (a), sıcaklık (b) ve ürün aktivitesinin (c) zamana ve yarıçapa bağlı değişimleri ile ortalama sıcaklık, ortalama nem kesri ve ortalama ürün aktivitesinin kurutma süresince değişimleri (d) ($R_d = 1,5 \text{ mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^\circ\text{C}$).

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'dan da görüleceği üzere granül içerisindeki nem merkezden yüzeye doğru hareket etmektedir. Granül içerisindeki nem tanecikleri yüzeydeki buharlaşma sebebi ile adım adım yüzeye doğru hareket etmeye başlar ve bu difüzyon hareketi ile granülün merkezindeki nem kesri de azalmaya başlar. Bununla birlikte granül içerisindeki sıcaklık değişiminde endüstriyel ekmek mayası kurutmasında granül boyutunun küçük olması (silindirik granül için başlangıç yarıçapı 0,5 mm ve küresel granül için ise başlangıç yarıçapı 1,5 mm) nedeniyle granül merkezi ile yüzeyi arasında nem kesrinde olduğu gibi bir değişim görülmemiştir. Kurutma sürecindeki granül boyutu büyük seçilecek olursa, granül içindeki sıcaklık değişiminin yüzeyden merkeze doğru azaldığı ve bu değişimin zamanla azalarak merkezdeki sıcaklığın yaklaşık olarak yüzeydeki sıcaklıkla aynı olduğu görülecektir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Büzülmeyen silindirik granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde granül içerisindeki sıcaklığın zamanla ve yarıçapla değişimi. ($R_d = 5$ mm, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ\text{C}$).

Kurutma süresince ürün aktivitesi granül içerisinde merkezden yüzeye doğru azalma gösterir. (Şekil 4.8c ve Şekil 4.9c) Ürün aktivitesinin granül içindeki değişimi granül içerisindeki nem kesri ile ilişkilidir. Büzülmeyen her iki granül formu için matematiksel modelin endüstriyel bir ekmek mayası kurutmasından alınan verilerle karşılaştırıldığı benzetim sonuçları Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

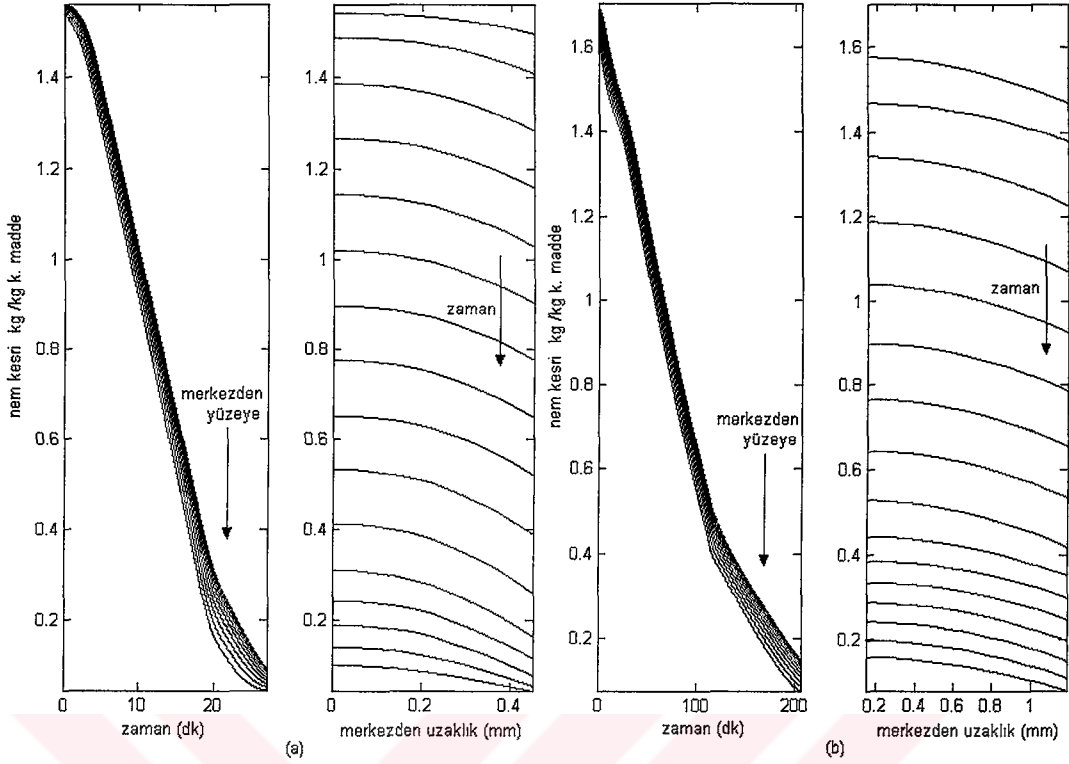


Şekil 4.11. Büzülmeyen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. Endüstriyel veriler: ort. sıcaklık (\square), % kuru madde kesri (Δ), ort. nem kesri (O), model benzetim sonucu (-) (silindirik: $R_0 = 0,5\text{mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ\text{C}$) (küresel: $R_0 = 1,5\text{mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^\circ\text{C}$)

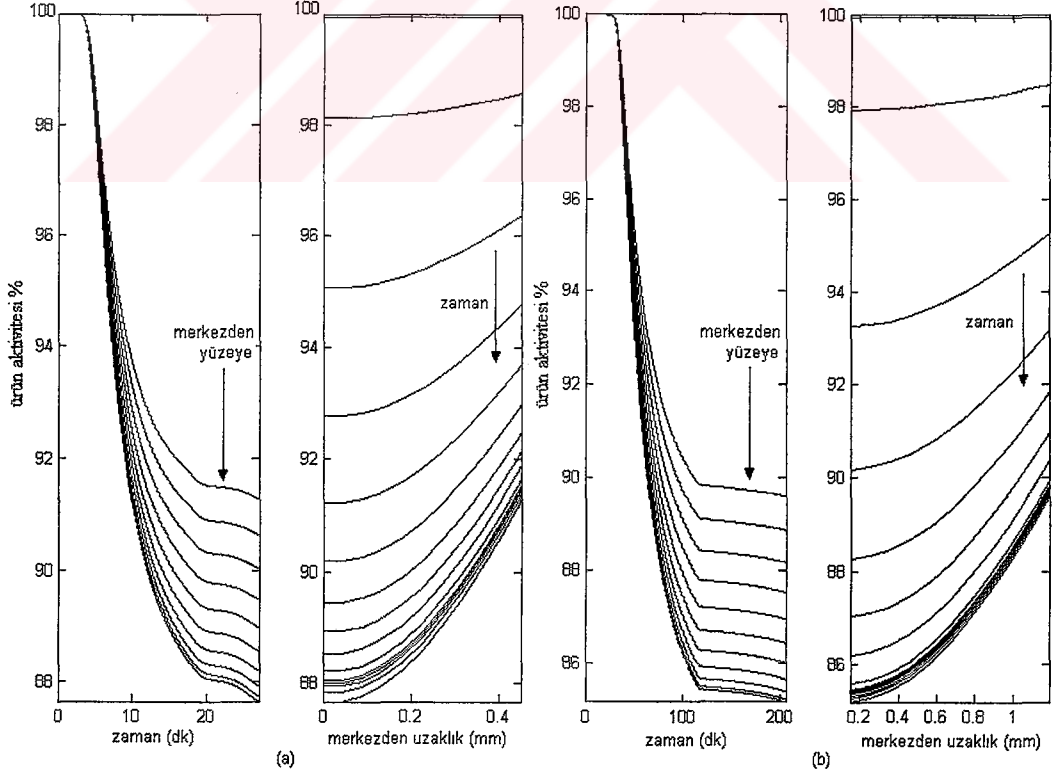
Büzülmeyen granül formları için yapılan benzetim çalışmalarından modelin endüstriyel veriler ile örtüştüğü söylenebilir. Ancak nem kesrindeki ve özellikle kurutma sürecinin üçüncü ve son periyodundaki endüstriyel veriler ile ortaya çıkan farklılıklar, büzülme modelinin de modele ilave edilmesi gerekliliğini bir kez daha açıkça ortaya koymaktadır.

4.7.2. Büzülen granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları

Granül tabanlı matematiksel kurutma modelinin ikinci ve son aşaması büzülme ile ilgili matematiksel ifadelerin modele ilavesi ile bulunan büzülen granül tabanlı kurutma modelidir. Şekil 4.12 ve 4.13'de büzülen silindirik ve küresel granüllü ekmek mayası için granül içerisindeki nem kesrinin ve ürün aktivitesinin değişimleri gösterilmiştir.

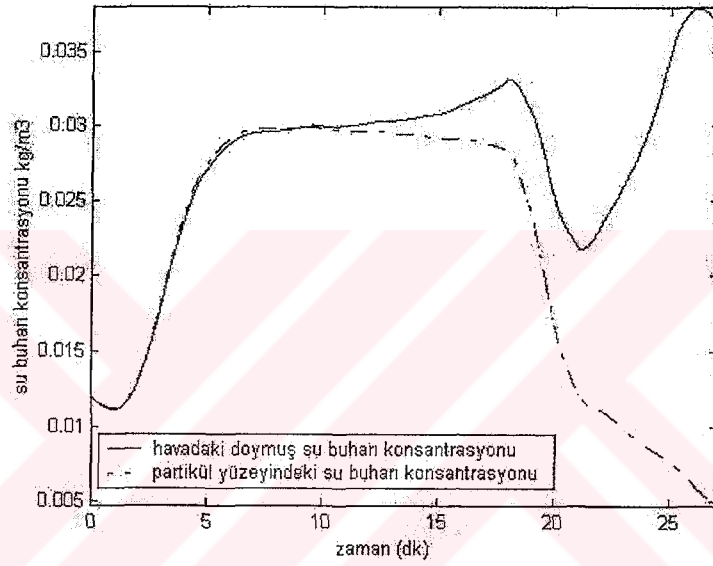


Şekil 4.12. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekme mayası için granül içerisindeki nem kesrinin zamanla ve yarıçapla değişimi.

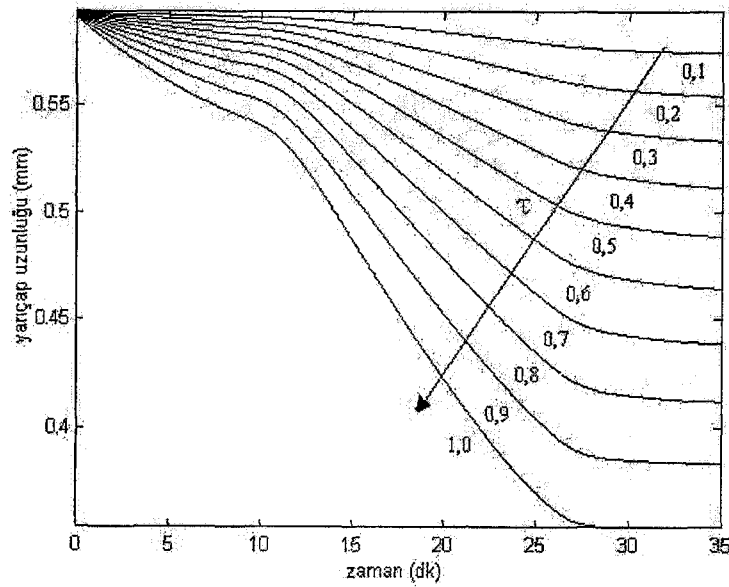


Şekil 4.13. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekme mayası için granül içerisindeki ürün aktivitesinin zamanla ve yarıçapla değişimi.

Granülün yüzeyindeki su buharı konsantrasyonu fırın içindeki havanın doymuş su buharı konsantrasyonu ile yaklaşık 12-13 dakikaya kadar aynıdır. Bunun fiziksel anlamı, kurutulan granülün verebileceği su miktarı, fırındaki ısıtılmış havanın alabileceği doymuş su buharı kadardır. Bu dakikalardan sonra ise büzülmenin yanı sıra granül içerisindeki nem kesrinin de azalması ile birlikte yüzeydeki su buharı konsantrasyonu azalmaya başlar ve kurutmanın sonuna doğru minimum seviyelere iner. Şekil 4.14’de granül yüzeyindeki ve havadaki su buharı konsantrasyonlarına ait değişimler verilmiştir. Kurutulan granülün büzülme katsayısına göre yarıçap değişimi de Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

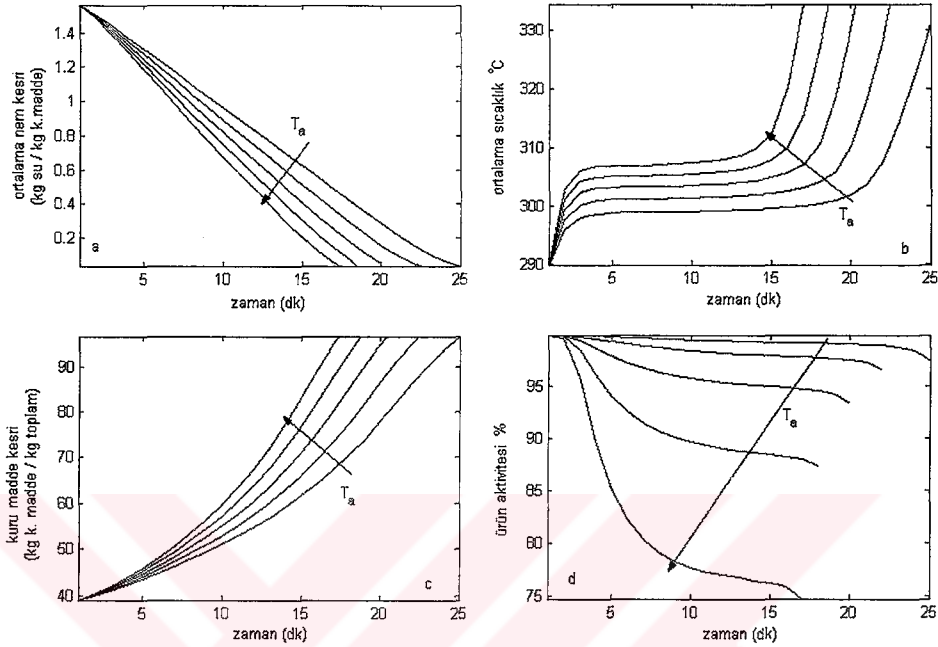


Şekil 4.14. Silindirik büzülen granül yüzeyindeki su buharı konsantrasyonu ile havanın doymuş su buharı konsantrasyonunun değişimleri.

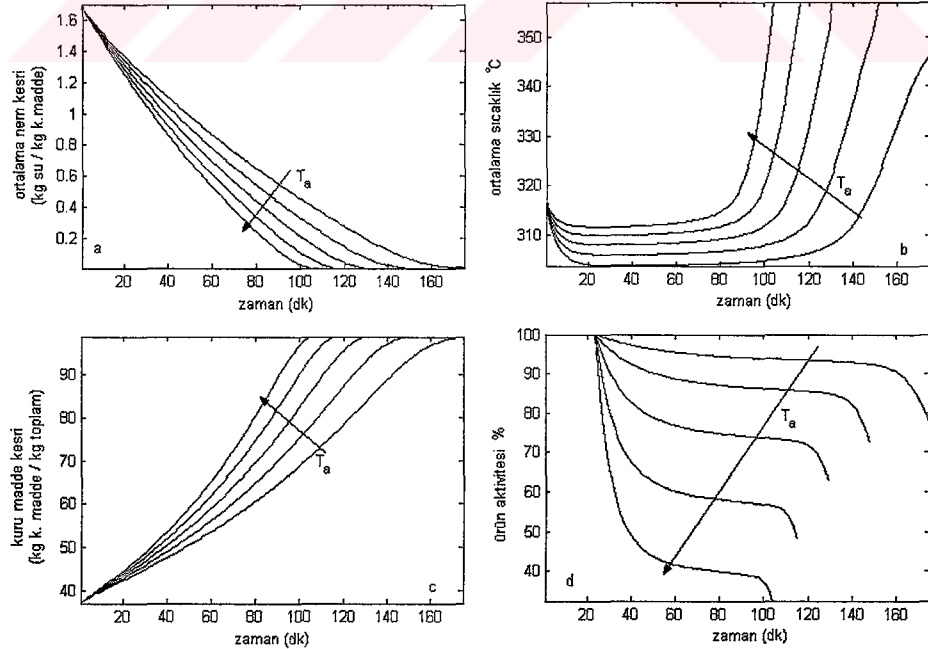


Şekil 4.15. Granülün büzülme katsayısına göre yarıçap değişimi.

Şekil 4.16 ve 4.17’de farklı sabit hava sıcaklıklarında ($80^{\circ}\text{C}–120^{\circ}\text{C}$) modelin her iki granül formu için kurutma benzetimi sonuçları gösterilmiştir. Her iki granül içinde giriş hava sıcaklığının artmasıyla kurutma süresi kısaltmakta, yatak sıcaklığı artmakta, ürün aktivitesi ise azalmaktadır.

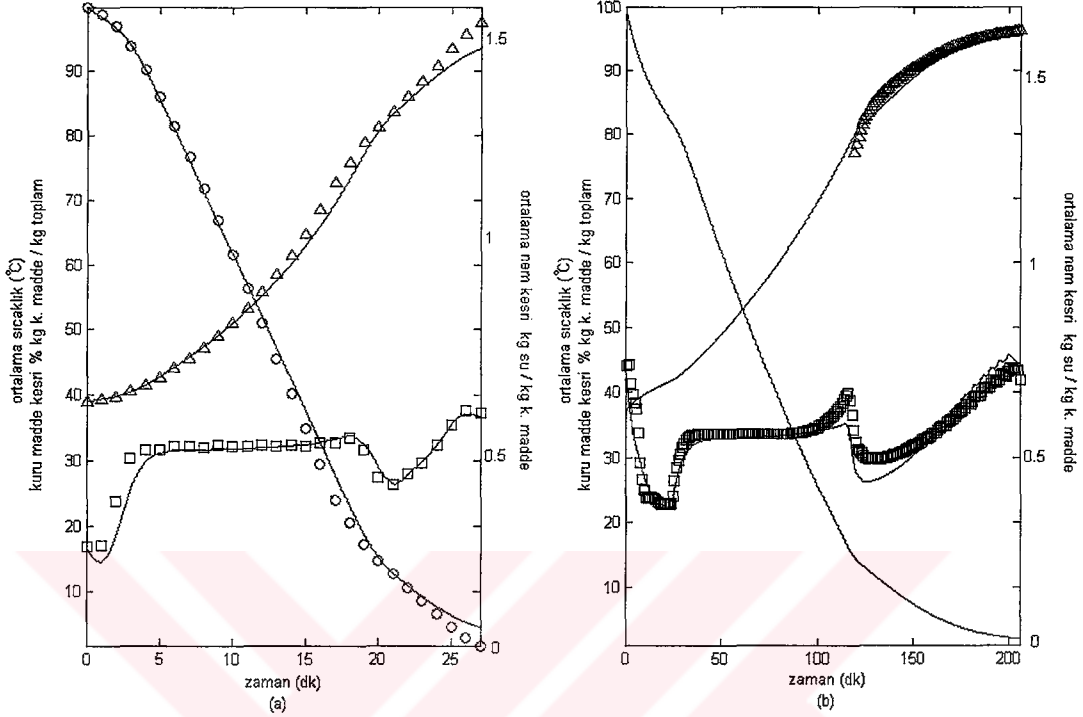


Şekil 4.16. Farklı sabit hava sıcaklıkları ($80^{\circ}\text{C}–120^{\circ}\text{C}$) için silindirik granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. ortalama nem kesri (a), ortalama sıcaklık (b), kuru madde kesri (c), ürün aktivitesi % (d).



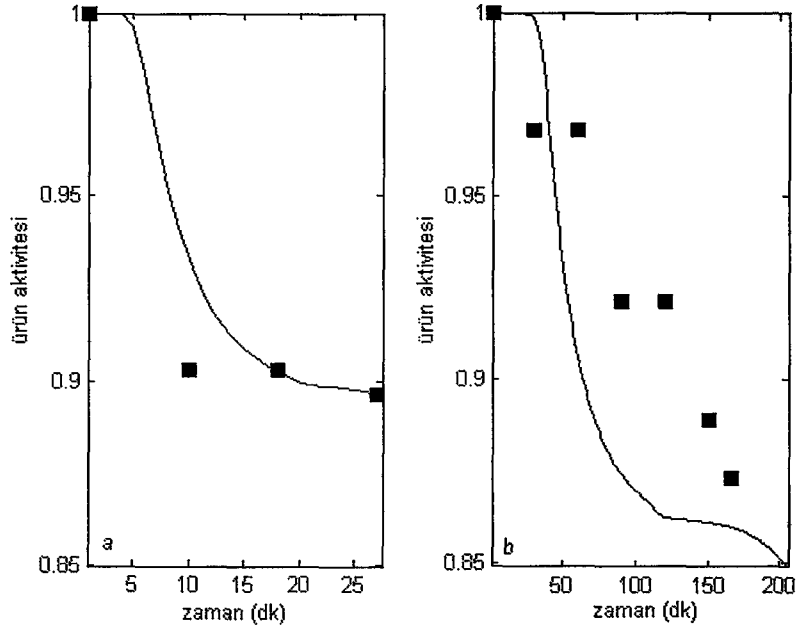
Şekil 4.17. Farklı sabit hava sıcaklıkları ($80^{\circ}\text{C}–120^{\circ}\text{C}$) için küresel granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. ortalama nem kesri (a), ortalama sıcaklık (b), kuru madde kesri (c), ürün aktivitesi % (d).

Şekil 4.18’de büzülen her iki granül formu için matematiksel modelin endüstriyel bir ekmek mayası kurutmasından alınan verilerle karşılaştırıldığı benzetim sonuçları gösterilmektedir.

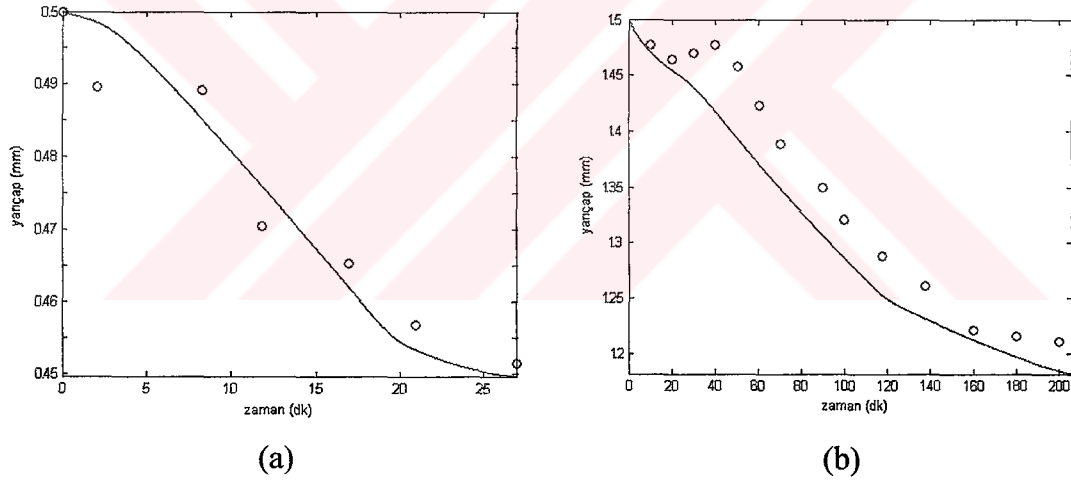


Şekil 4.18. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma modelinin benzetim sonuçları. Endüstriyel veriler: ort. sıcaklık (□), % kuru madde kesri (Δ), ort. nem kesri (O), model benzetim sonucu (-) (silindirik: $R_0 = 0,5\text{mm}$, $X_0 = 1,563$, $T_0 = 16,9^\circ\text{C}$) (küresel: $R_0 = 1,5\text{mm}$, $X_0 = 1,7$, $T_0 = 44,3^\circ\text{C}$)

Büzülmeyen kurutma modeline kıyasla modelin endüstriyel verilerle örtüşmesi daha iyi sağlanmıştır. Her iki granül için alınan benzetim sonuçları yapılan granül tabanlı kurutma modelinin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.19’da ürün aktivitesinin her iki granül formunun kurutma sürecindeki değişimleri ile endüstriyel ekmek mayası kurutma sürecinden alınan veriler bir arada gösterilmiştir. Endüstriyel ortamda ürün aktivitesi sürekli izlenemeyen ve ölçülemeyen bir değişken olup, kurutma sürecinden belirli aralıklarla alınan örneklerin laboratuvarda yapılan analizleri sonucu elde edilen veriler kullanılmıştır. Şekil 4.20’de her iki granül formu için kurutma süresince büzülen granülün yarıçapındaki değişimler ile endüstriyel veriler birlikte gösterilmiştir.

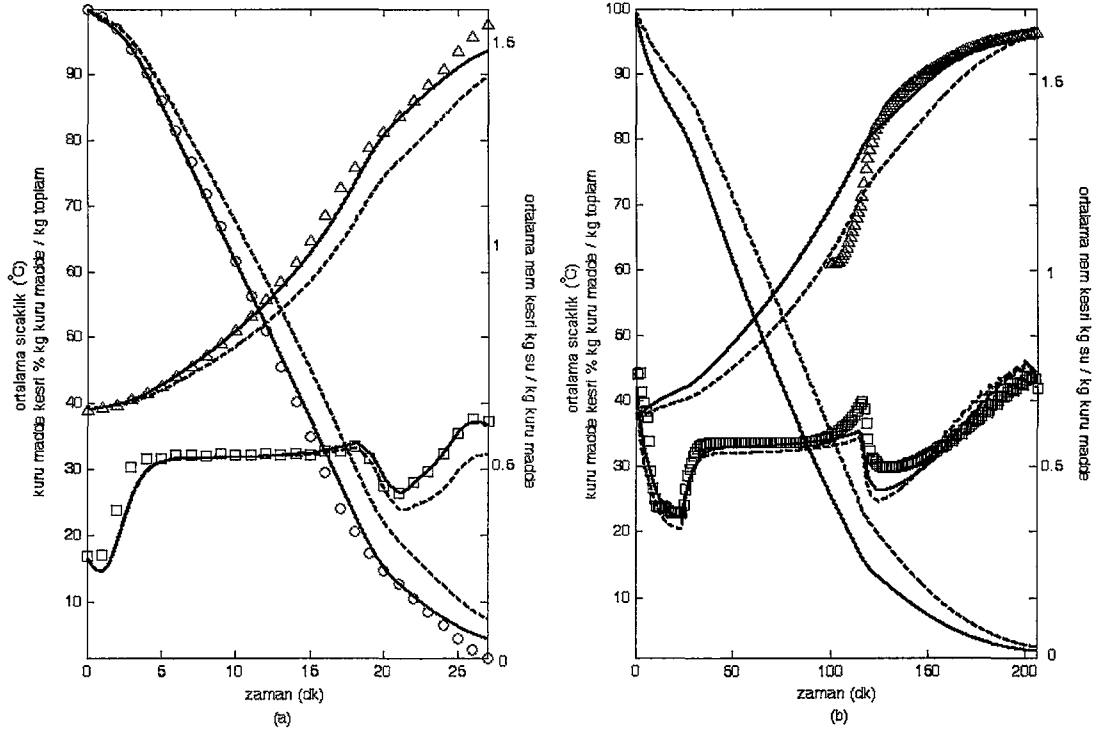


Şekil 4.19. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde ürün aktivitesinin değişimi: model sonuçları (-), endüstriyel veriler (■).



Şekil 4.20. Büzülen silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinde yarıçap değişimi: endüstriyel veri (o), model sonucu (-).

Şekil 4.21’de silindirik ve küresel granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma süreci için yapılan granül tabanlı büzülen ve büzülmeyen modellerin benzetim sonuçları bir arada gösterilmiştir. Şekil 4.21’den de görüleceği üzere granül tabanlı akışkan yatak modelinde büzülen granül yapısının büzülmeyen yapıya modele göre daha başarılı bir performansa sahip olduğu deneysel veriler ile uyumundan açıkça anlaşılmaktadır. Ayrıca bu sonuçlar granül tabanlı modelin akışkan yataklı ekmek mayası kurutma sürecini tam olarak tanımladığını da göstermektedir.



Şekil 4.21. Silindirik (a) ve küresel (b) granüllü ekme mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinin granül tabanlı modeli ile homojen modelinin karşılaştırılması Endüstriyel veriler: yatak sıcaklığı (□), % kuru madde kesri (Δ), nem kesri (O), büzülmeyen granül tabanlı model (kesikli çizgi), büzülen granül tabanlı model (sürekli çizgi).

Bu bölümde akışkan yataklı kurutma süreci için granül tabanlı yeni bir model geliştirilmiştir. Yapılan bu model kurutma sırasında granül içerisindeki nem difüzyonunu temel almakta ve aynı zamanda granüldeki büzülme dinamiğini de içermektedir. Biyolojik bir ürün olan ekme mayasının kurutma sürecinde önemli bir parametre olan ürün aktivitesinin modelleme çalışmaları da bu bölüm içerisinde yer almaktadır. Bu model endüstriyel ekme mayası kurutma sürecinden alınan veriler ile test edilmiş ve modelin başarısı ölçülmeye çalışılmıştır. Benzetim çalışmaları kısmından da görüleceği gibi yapılan matematiksel model özellikle kurutmanın son evresinde çok iyi sonuçlar vermiştir. Yine granül boyutundaki büzülmenin de model tarafından iyi öngörüldüğü, deneysel veriler ile karşılaştırılmasından anlaşılmıştır. Yapılan model değişik boyutlu granüle sahip malzemelerin akışkan yataklı kurutma süreçlerine kolaylıkla uyarlanabilmektedir.

BÖLÜM 5. EKMEK MAYASI KURUTMA SÜRECİNİN GENETİK ALGORİTMA TABANLI DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ

Bu bölümde, ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinin optimizasyon probleminin tanımlanmasına ve problemin çözümünde kullanılan genetik algoritma hakkında genel bilgilere ve son olarak da tasarlanan doğrusal olmayan öngörülü denetleyici ile ilgili benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Kurutma süreçleri, genellikle ürünleri daha kısa sürede kurutabilmek için yüksek enerji maliyetleri ile karşımıza çıkar. Ancak bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi, yüksek sıcaklıklarda özellikle biyolojik ürünlerin kurutulması ürün aktivitesini düşürmektedir. Kurutma süreci koşullarını ve ürün aktivitesini etkileyen en önemli iki unsur, sıcaklık ve nem kesridir (Kerkhof 2000).

Özellikle son yıllarda, biyolojik ürünlerin kurutma süreçlerinin optimizasyonu ile ilgili olarak literatürde bazı çalışmalara rastlanmaktadır. Filho, Wolf & Vasconcelos (1997) tarafından büyük kurutma süreçleri için bir optimal kontrol stratejisi geliştirilmiş, Trelea, Trystram, Courtois (1997) tarafından ise kesikli süreçlerin doğrusal olmayan optimal kontrolü ve bunun bir uygulaması yapılmıştır. Yine kurutma süreçlerinin optimal kontrolü için aktivite modellemesi üzerine çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Quirijns ve diğ. 2000ab).

Optimizasyon problemlerinin analitik çözümlerinin kimi zaman karmaşık olması nedeniyle, çeşitli global arama algoritmaları, problemin çözümünde kullanılır. Bu arama yöntemlerden biri de doğal genetik bilimini temel alan genetik algoritmalarıdır (Goldberg 1989). Genetik arama algoritmaları yaklaşımı son zamanlarda çeşitli optimal kontrol uygulamalarında kullanılmıştır (Sarkar and Modak 2003, Na, Chang, Chung and Lim 2002, Roubos, Straten and Boxtel 1999). Genetik algoritma için olası bütün çözümlerden bir grup seçilir ve belirlenen kurallar ile yeni çözümler üretilip, gruba dahil edilir. Seçim aşamasında, grubun optimum çözüme yakın yüksek

olasılıklı üyeleri seçilir ve bu işlem optimizasyon probleminin çözüm noktasına en yakın yere kadar verilen adım sayısı uyarınca devam eder (Chong ve Zak 1996). Optimizasyonda yapılması gereken ilk işlerden biri maliyet fonksiyonunun belirlenmesidir. Maliyet fonksiyonu sürecin durumu göz önüne alınarak belirlenir. Bu çalışmada maliyet fonksiyonu üç alt maliyet fonksiyonunun birleşiminden oluşmaktadır.

5.1. Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi

Maliyet fonksiyonu, kurutma sürecinin istenen amacını tanımlar. Süreç sonundaki ürün aktivitesi, nem kesri ve sürecin performansı, maliyet fonksiyonunun belirlenmesinde önemli rol oynayan etkenler olarak karşımıza çıkar. Bir sürecin en önemli göstergelerinden biri de enerji maliyetidir. Bu sebeplerden ötürü kurutma süreçlerinde havanın ısıtılması için harcanan enerji, denklem 5.1'de gösterildiği gibi maliyet fonksiyonunun ilk kısmını oluşturur:

$$J_E = \int_0^{t_d} \beta_1 u_a T_a (c_{p,a} + c_{p,wv} Y_a) dt \quad (5.1)$$

Burada u_a akışkan yataklı fırına giren havanın hızını (kg / s), T_a havanın sıcaklığını, $c_{p,a}$ ve $c_{p,wv}$ sırası ile havanın ve su buharının özgül ısısını, Y_a havanın nem oranını (kg su buharı / kg kuru hava), β_1 enerji maliyeti ile ilgili optimizasyon ağırlık değerini, t_d ise toplam kurutma zamanını göstermektedir. Enerji maliyetinin yanı sıra kurutmanın asıl amacı kurutulan ürünün depolanmasını ve saklanmasını garanti edecek bir nem kesri seviyesine kurutma sonunda ulaşabilmek olduğu için nem kesri ile ilgili olarak da bir maliyet fonksiyonu oluşturmak gereklidir. $\bar{X} \geq X_e$ için nem kesrine ait maliyet fonksiyonu denklem 5.2'deki gibidir:

$$J_X = \beta_2 (\bar{X} - X_e) \quad (5.2)$$

Burada \bar{X} ortalama nem kesrini (kg su / kg kuru madde), X_e ise arzulanan nem kesri değerini ve β_2 ise nem kesri maliyeti ile ilgili optimizasyon ağırlık değerini

göstermektedir. Kurutulan ürünün değerini belirleyen göstergelerden biri de ürün aktivitesidir. Kurutma sonunda ürün aktivite kaybının minimum olması istendiğinden, maliyet fonksiyonunda denklem 5.3’de olduğu gibi yazılabilir:

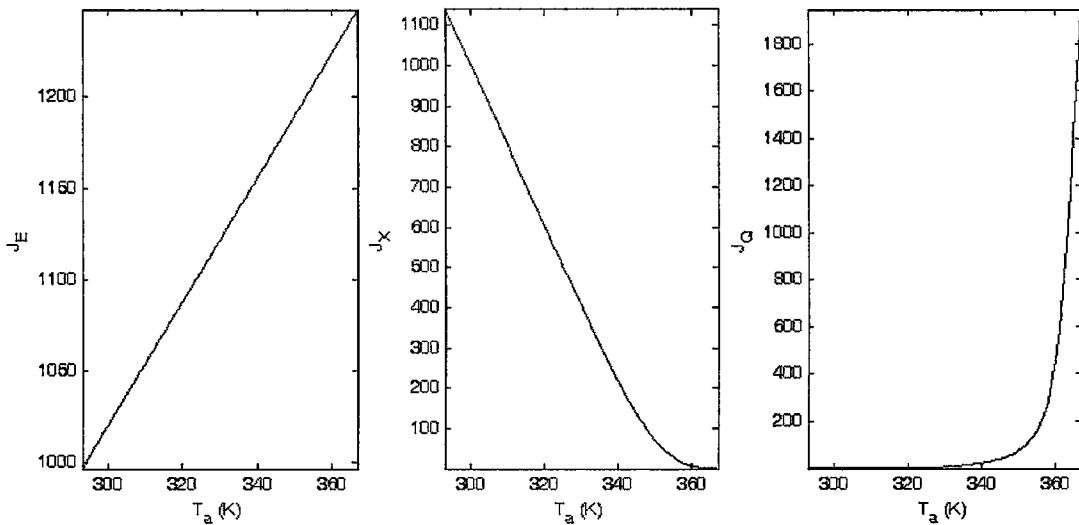
$$J_Q = \beta_3 \cdot (Q_d - Q) \quad (5.3)$$

Burada Q kurutulan malzemenin aktivitesini, Q_d arzu edilen aktivite değerini (% 100) ve β_3 ise ürün aktivitesi ile ilgili optimizasyon ağırlık değerini göstermektedir. Optimizasyon problemini oluşturan ilk kısım olan maliyet fonksiyonunun genel hali denklem 5.1, 5.2 ve denklem 5.3’ün toplamından oluşur ve denklem 5.4’deki gibidir:

$$J = J_E + J_X + J_Q \quad (5.4)$$

$$J = \beta_2 (\bar{X} - X_e) + \beta_3 (Q_d - Q) + \int_0^{t_d} \beta_1 u_a T_a (c_{p,a} + c_{p,wv} Y_a) dt \quad (5.5)$$

Şekil 5.1’de enerji, nem kesri ve aktivite maliyet fonksiyonlarının hava sıcaklığına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Havanın sıcaklığı arttırıldığı zaman grafikten de görüleceği üzere enerji maliyetinin de artması kaçınılmazdır. Enerji maliyetinin aksine, nem kesrine ait maliyet fonksiyonu ise sıcaklık arttırıldıkça azalan bir grafik sergiler. Ürün aktivitesine ait maliyet fonksiyonu da 320 K’den sonra sıcaklıkla artan bir eğri şeklindedir.



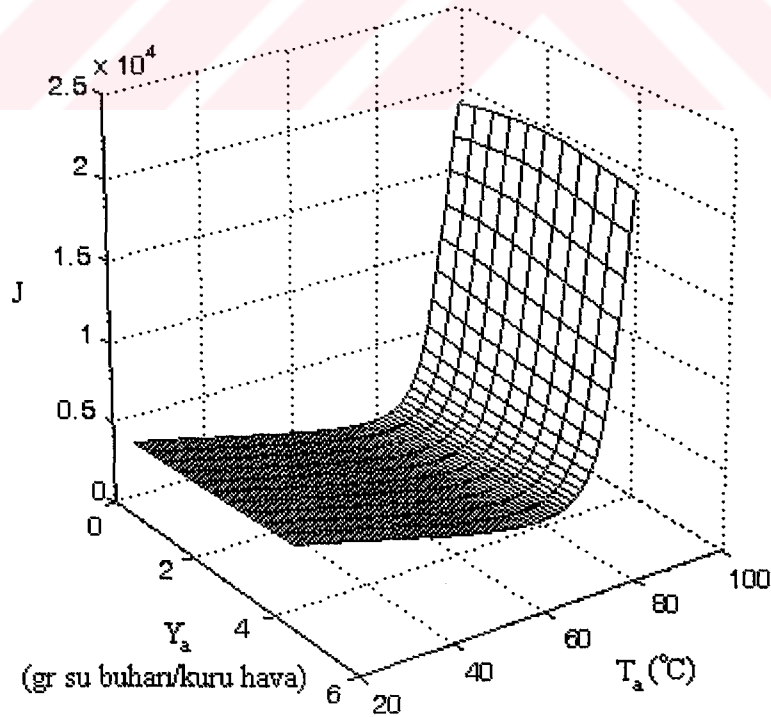
Şekil 5.1. Kurutma sürecinde enerji, nem kesri ve ürün aktivitesi maliyet fonksiyonunun hava sıcaklığına bağlı değişimi. $\beta_1 = 3e-4$, $\beta_2 = 4000$, $\beta_3 = 300$.

Optimizasyon probleminin amacı en uygun kontrol parametre değerlerini belirlemektir ve bu çalışmada kontrol değişkeni olarak havanın sıcaklığı ve havanın nem oranı kullanılmıştır. Optimizasyon problemi denklem 5.6'da ve problemin sınır koşulları ise denklem 5.7'de gösterildiği şekildedir.

$$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a) \quad (5.6)$$

$$293K \leq T_a \leq 373K \text{ ve } 0 \leq Y_a \leq 0.005 \text{ kg su buharı / kg kuru hava} \quad (5.7)$$

Şekil 5.2'de 27 dakikalık kurutma süreci için hava sıcaklığına bağlı maliyet fonksiyonu grafiği verilmiştir. Maliyet fonksiyonunun değişim grafiğinde yalnızca havanın sıcaklığı optimizasyon sürecinde kontrol değişkeni olarak alınmış ve havanın nem oranı sabit 0.005 kg su buharı / kg hava olarak kabul edilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, 347 K optimizasyon probleminin statik çözümünü vermektedir. Optimizasyon probleminin analitik çözümünün karmaşık olması sebebiyle, maliyet fonksiyonunun minimum nokta veya noktalarını bulmak için rasgele arama algoritmaları kullanmak gerekmektedir. Bir sonraki kısımda rasgele arama algoritması olarak kullanılan genetik algoritmalar anlatılacaktır.



Şekil 5.2. Kurutma sürecinde maliyet fonksiyonunun hava sıcaklığına bağlı değişimi.

5.2. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmaların temel fikirleri John Holland tarafından 1960-1970 yılları arasında geliştirilmiştir. Genetik algoritmalar genetik biliminin esaslarına dayanan bir arama algoritmasıdır (Chong ve Zak, 1996). Genetik algoritmalar yapay sinir ağlarından optimizasyona, yapay zekadan birçok alana kadar uygulama alanı bulmuştur.

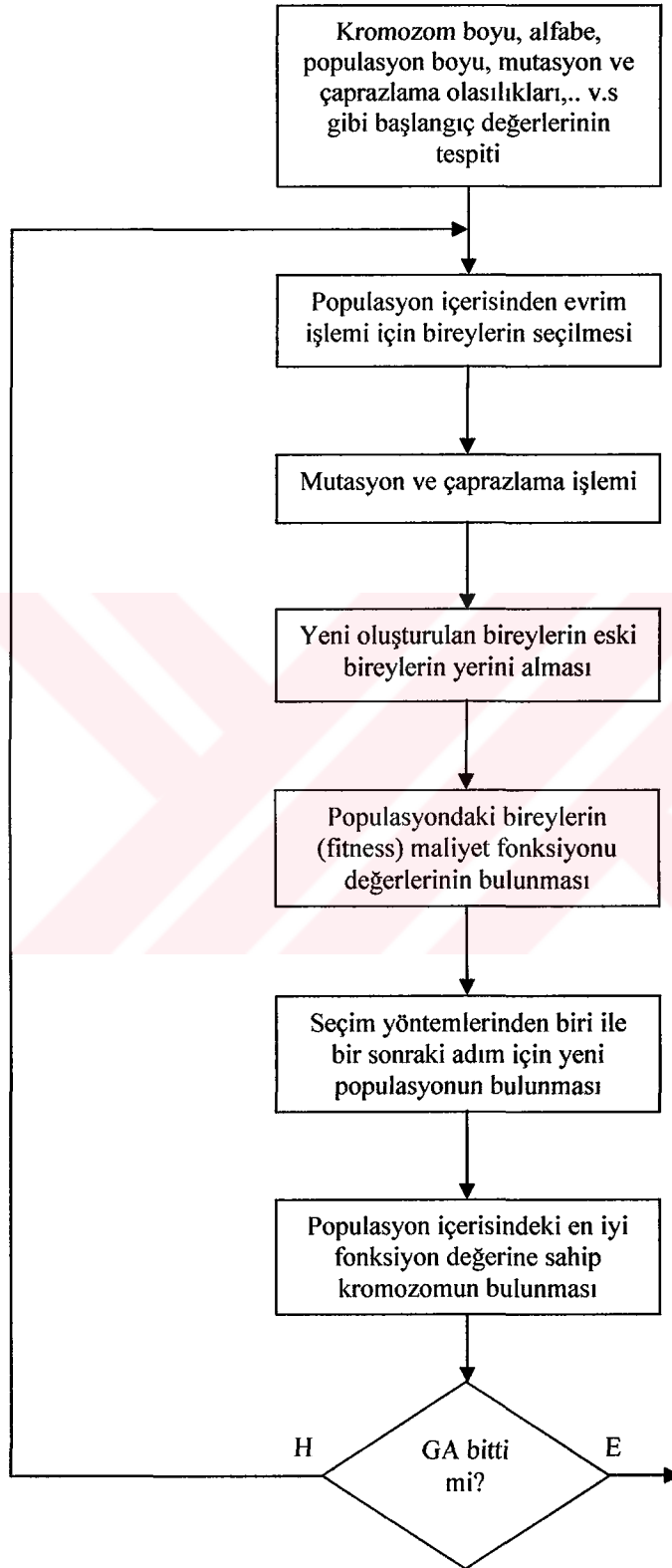
5.2.1. GA ile ilgili bazı tanımlar

1. Kromozom: Bireylerin sembollerle ifade edildiği dizi,
2. Alfabe: Kromozomları oluşturmak için kullanılan sembollerin oluşturduğu harita,
3. Populasyon: Genetik algoritmanın uygulanacağı seçilmiş bireyler topluluğu,
4. Uygunluk (fitness): Kromozomların maliyet fonksiyonundaki değeri,
5. Evrim (evolution): Kromozomların değişime uğradığı bölüm, iki genel evrim tipi vardır: Mutasyon ve çaprazlama (crossover),
6. Aile (parent): Çaprazlama işlemi için anne ve baba kromozomlar,
7. Çocuklar (offspring): Çaprazlama işlemi sonucu oluşan kromozomlar,
8. Seçim (selection): Çeşitli yöntemlerle var olan populasyondan yeni bir populasyon üretmek. Birkaç çeşit seçim yöntemi vardır. Bunlardan bazıları: Rulet yöntemi, sıralama (ranking) yöntemi, turnuva yöntemi.

5.2.2. Genetik algoritmaların temel prensipleri

Genetik algoritmalar populasyondaki bireylere uygulanan mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemleri ile doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılır (Michalewicz 1994). Genetik algoritmanın başlangıcında çözülecek problemin çözüm aralığında kromozom boyu tespit edilir. Daha sonra başlangıç populasyonu rasgele seçilir ve populasyondaki bireylerin uygunluk değerleri (fitness) bulunur. Populasyon içerisindeki seçilmiş bireylere mutasyon ve çaprazlama veya her iki yöntem birden uygulanarak yeni bireyler bulunup populasyona dahil edilir. Seçim işleminde ise çeşitli olasılık tabanlı yöntemler kullanılarak, populasyonda ağırlıklı olarak en iyi fonksiyon değerlerine (fitness) sahip bireylerin kalması sağlanır. Bu işlemler problemin çözümüne kadar veya belirlenen bir adım sayısına kadar devam ederek

çözümüne en yakın nokta veya noktalarla son bulur. Şekil 5.3’de temel olarak bir genetik algoritmanın akış diyagramı gösterilmiştir.



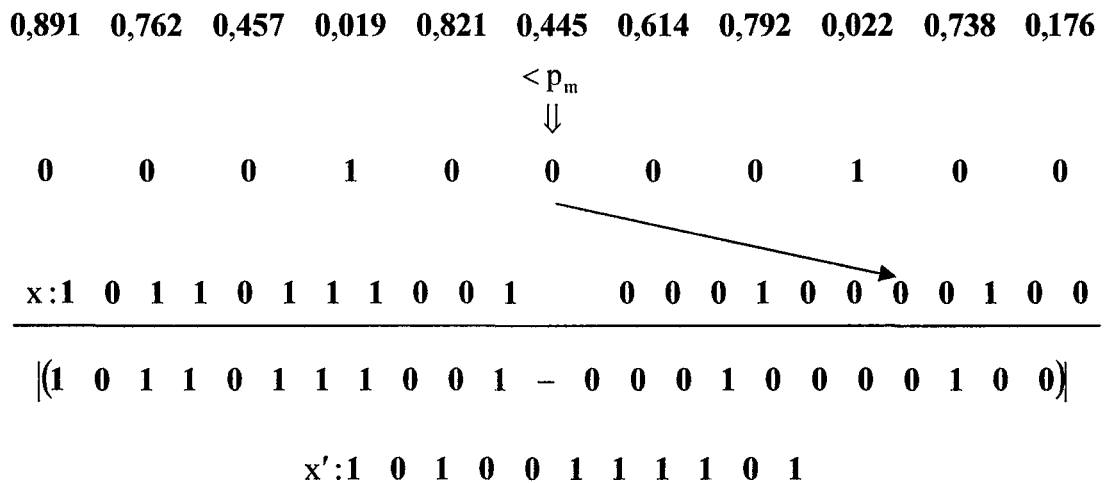
Şekil 5.3. Genetik algoritmanın akış diyagramı.

Genetik arama algoritmalarının bir optimizasyon probleminde kullanılmasında bulunacak olan minimum veya maksimum noktasına yaklaşıldığı zaman algoritma sonlandırılır. Bu sonlandırma, popülasyonda bulunan en iyi kromozomun fonksiyon değeri ile bir önceki adımdaki en iyi kromozomun fonksiyon değerinin farkının önceden belirlenen bir değerin altına düşmesi ile belirlenir. Bunun anlamı genetik arama algoritmasının problemin çözüm noktasına yaklaşık olarak vardığıdır.

Genetik işlemler diye de bilinen çaprazlama ve mutasyon işlemlerinde seçilen kromozomlar değişime uğratılırlar. Mutasyon işleminde popülasyondaki her bir bireye ait kromozomlardaki bitler verilen mutasyon olasılığına göre değişir.

$$x'_i = \begin{cases} 1 - x_i, & \text{rand}(0,1) < p_m \\ x_i & \end{cases} \quad (5.8)$$

Burada x_i mutasyon öncesi bireyi, x'_i ise mutasyon sonrası bireyi temsil etmektedir. Yine aynı denklemde, p_m mutasyon olasılığını göstermektedir. Şekil 5.4'de örnek olarak mutasyon işleminin bir kromozoma uygulanışı gösterilmiştir. Örnek mutasyon işlemi için p_m mutasyon olasılığı 0,05 ve kromozom boyu da 11 olarak alınmıştır. İşlemin ilk satırı denklem 5.8'deki $\text{rand}(0,1)$ ile gösterilen 0 ile 1 arasındaki rastgele sayılardan oluşmaktadır.



Şekil 5.4. Genetik algoritmalarda mutasyon işleminin bir kromozoma uygulanışı ($p_m = 0,05$ ve kromozom boyu = 11).

Genetik işlemlerden çaprazlama işleminde, mutasyon işleminden farklı olarak ebeveyn adı verilen iki kromozom alınır ve yine işlemin sonucunda iki yeni kromozom yada çocuk meydana gelmektedir. Temel olarak çaprazlama işleminde kromozom üzerinde rasgele en az bir kesim noktası seçilir ve bu kesim noktasına göre ebeveyn bireylerin kromozomları çaprazlama olarak yer değiştirilir. Oluşturulan yeni bireyler popülasyonda eski bireylerin yerini alır. Çaprazlama işleminin matematiksel ifadesi denklem 5.9 ile verilmiştir.

$$x'_i = \begin{cases} x_i & i < r \\ y_i & i \geq r \end{cases} \quad \text{ve} \quad y'_i = \begin{cases} y_i & i < r \\ x_i & i \geq r \end{cases} \quad (5.9)$$

Burada x_i ve y_i ebeveyn kromozomları, x'_i ve y'_i çocuk kromozomları, r ise kesim noktasını göstermektedir. Şekil 5.5'de örnek bir çaprazlama işlemi verilmiştir. Bu örnek için kromozom boyu 7, kesim noktası ise 3 seçilmiştir.

$$\begin{array}{cccc|cccc} x_i & : & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ y_i & : & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{cccc|cccc} x'_i & : & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ y'_i & : & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

Şekil 5.5. Genetik algoritmalarda çaprazlama işlemi ($r=3$).

Genetik algoritmadaki önemli işlemlerden birisi de seçim işlemidir. Seçim işlemi için birkaç yöntem vardır: rulet tekerleği, turnuva, ölçekleme, sıralama yöntemleri (Michalewicz, 1994, Goldberg, 1989). Bunlardan Rulet tekerleği, Holland tarafından geliştirilmiş ilk seçim yöntemidir. Bu yöntemde popülasyondaki her bir bireyin olasılıkları öncelikle hesaplanır:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{P_s} F_j} \quad (5.10)$$

Burada P_i i. bireyin olasılık değerini, F_i i. bireyin fonksiyon değerini, P_s ise popülasyondaki bireylerin sayısını göstermektedir. Rulet tekerleği yönteminin kullanılması genellikle optimizasyon problemlerinde maksimum noktasını bulma ile sınırlıdır. Rulet tekerleği yönteminin kullanılması bir maksimum bulma problemi için aşağıdaki örnek de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Örnek: Kromozom boyu = 7,

Populasyondaki birey sayısı = 7,

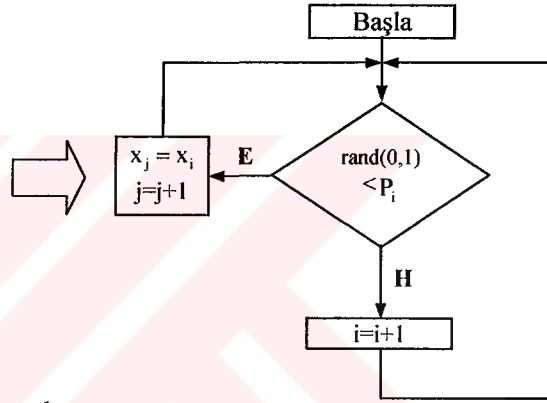
	<u>Kromozomlar</u>							<u>Fonk.değeri</u>	<u>P</u>	<u>toplam</u>
$x_1 : 1$	0	1	1	0	0	0	36	\Rightarrow	0,116129	0,116129
$x_2 : 1$	0	1	0	0	1	1	45	\Rightarrow	0,145161	0,261290
$x_3 : 0$	1	1	1	0	1	0	75	\Rightarrow	0,241935	0,503226
$x_4 : 1$	1	0	1	1	0	0	25	\Rightarrow	0,080645	0,583871
$x_5 : 0$	1	1	0	0	1	0	83	\Rightarrow	0,267742	0,851613
$x_6 : 1$	1	1	0	0	0	1	16	\Rightarrow	0,051613	0,903226
$x_7 : 1$	0	0	0	0	1	1	30	\Rightarrow	0,096774	1

rastgele değerler (0-1)

0,0099
0,1389
0,1987
0,2028
0,3529
0,6038
0,8132

P_i

0,116129
0,261290
0,503226
0,583871
0,851613
0,903226
1



Sonuç Populasyonu

$x_1 : 1$	0	1	1	0	0	0	36
$x_2 : 1$	0	1	0	0	1	1	45
$x_3 : 1$	0	1	0	0	1	1	45
$x_4 : 1$	0	1	0	0	1	1	45
$x_5 : 0$	1	1	1	0	1	0	75
$x_6 : 0$	1	1	0	0	1	0	83
$x_7 : 0$	1	1	0	0	1	0	83

Rulet tekerleği yöntemi için önce denklem 5.10'a göre her bireye ait olasılık değerleri bulunur ve bunlar sırayla toplanır. Populasyon boyuna göre rastgele veriler üretilir ve bu sayılarla olasılık değerleri karşılaştırılarak sonuç populasyonu elde edilir. Genetik algoritmalarda kullanılan diğer seçim yöntemlerinden biri de turnuva yöntemidir. Bu yöntemde adından da belli olacağı üzere, turnuvalar yapılır ve bu turnuvalar arasından probleme göre maksimum için en iyiler veya minimum için de en kötü yarışanlar seçilir ve oluşturulan tablo yardımı ile yeni populasyon oluşturulur.

Örnek: Kromozom boyu = 7,

Populasyondaki birey sayısı = 7,

Turnuva boyu= 3,

$x_1 : 1$	0	1	1	0	0	0	36
$x_2 : 1$	0	1	0	0	1	1	45
$x_3 : 0$	1	1	1	0	1	0	75
$x_4 : 1$	1	0	1	1	0	0	25
$x_5 : 0$	1	1	0	0	1	0	83
$x_6 : 1$	1	1	0	0	0	1	16
$x_7 : 1$	0	0	0	0	1	1	30

Turnuva Sonuçları

1.turnuva 7 4 4 4 7 3 3

2.turnuva 2 7 1 5 6 7 7

3.turnuva 5 6 6 6 2 7 1

Fonksiyon değerleri turnuva sonuçlarına göre yerleştirilirse,

1.turnuva 30 25 25 25 30 75 75

2.turnuva 45 30 36 83 16 30 30

3.turnuva 83 16 16 16 45 30 36

Turnuvanın en iyileri (maksimum) ve fonksiyon değerleri

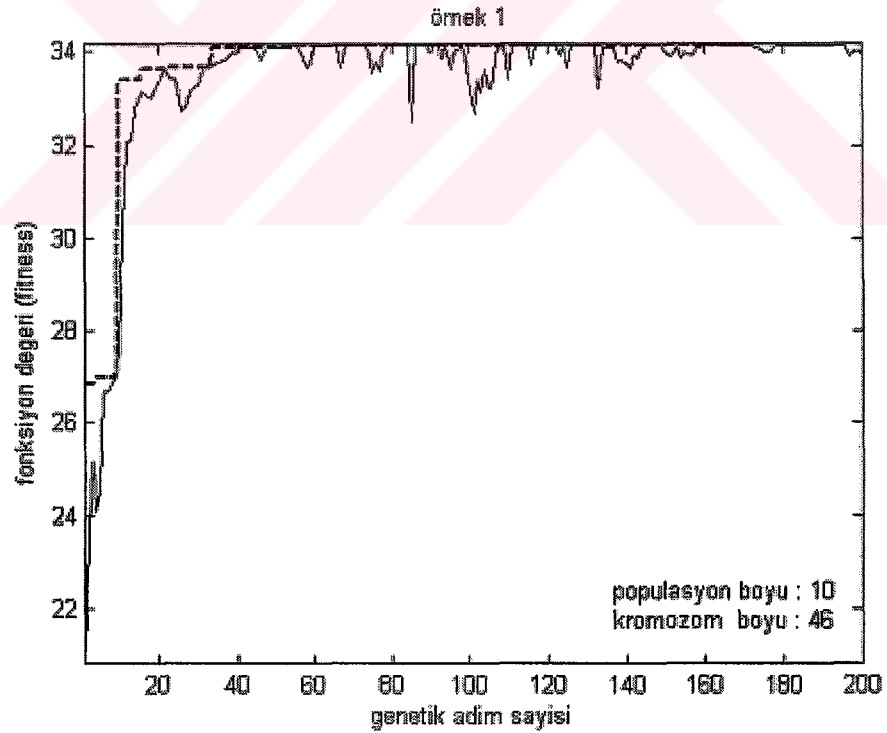
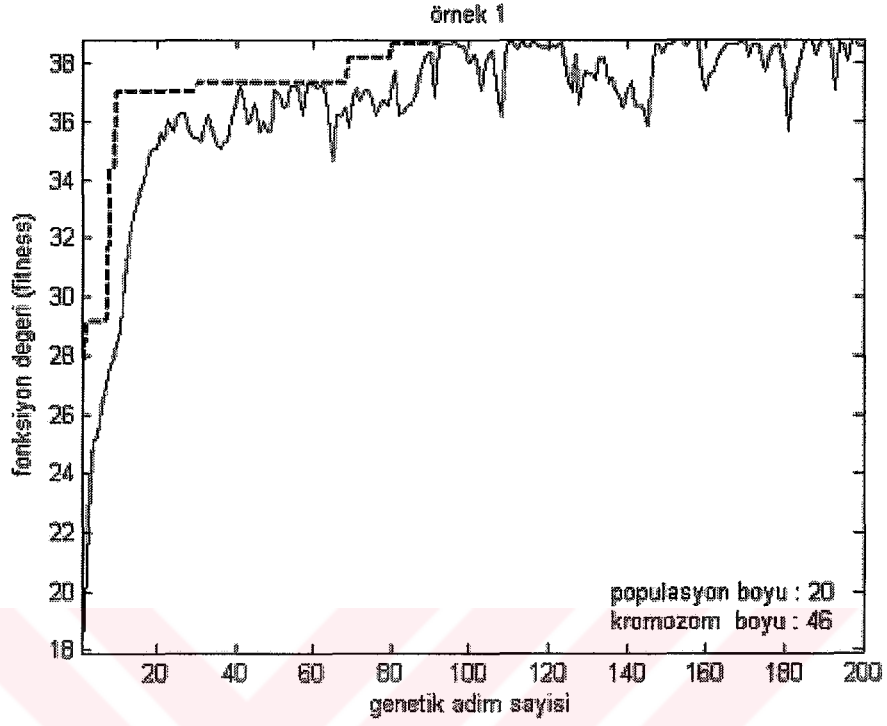
x_5	x_7	x_1	x_5	x_2	x_1	x_1
83	30	36	83	45	75	75

Sonuç Populasyonu

$x_1 : 0$	1	1	0	0	1	0	83
$x_2 : 1$	0	0	0	0	1	1	30
$x_3 : 1$	0	1	1	0	0	0	36
$x_4 : 0$	1	1	0	0	1	0	83
$x_5 : 1$	0	1	0	0	1	1	45
$x_6 : 0$	1	1	1	0	1	0	75
$x_7 : 0$	1	1	1	0	1	0	75

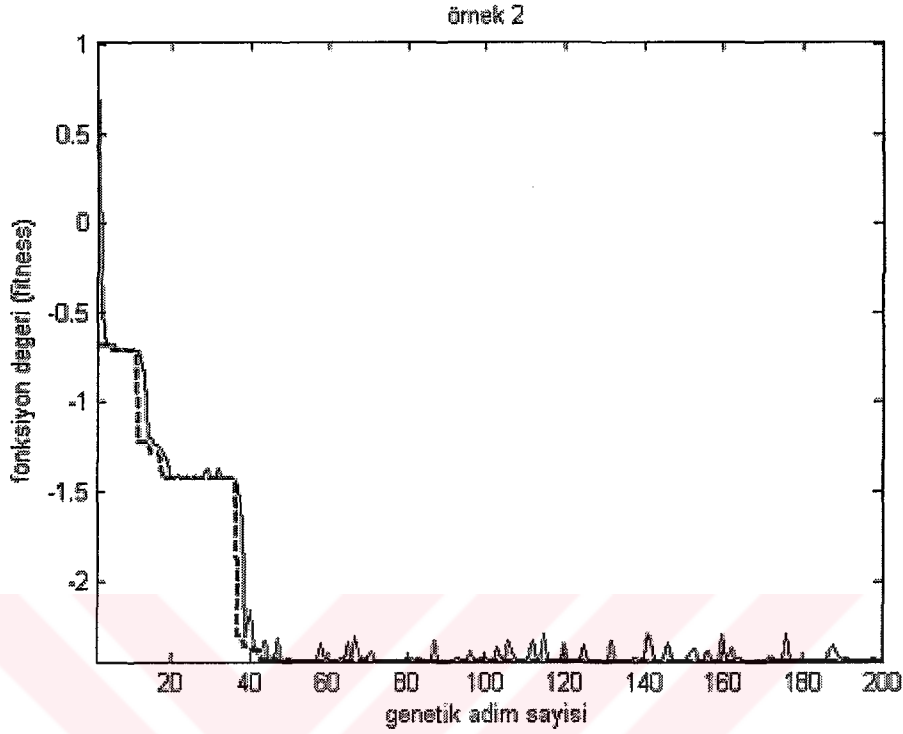
Genetik arama algoritmalarının optimizasyon problemlerinde kullanılması ile ilgili aşağıda iki örnek ele alınacaktır. Bu örneklerin her ikisi için çaprazlama olasılığı (p_s) 0.4 ve mutasyon olasılığı (p_m) ise 0.005 olarak alınmıştır. Seçim yöntemi olarak 1. örnek için rulet yöntemi, 2.örnek için de turnuva yöntemi kullanılmıştır.

Örnek 1: maks_{x,y}(21,5 + x.sin(4πx) + y.sin(20πy)) -3 ≤ x ≤ 12,1 ve 4,1 ≤ y ≤ 5,8



Şekil 5.6. Örnek 1'deki optimizasyon probleminin genetik algoritma ile çözümü. (kesik çizgiler maksimum, düz çizgiler ise ortalama değerlerdir)

$$\text{Örnek 2: } \min_{x,y} \left(3(1-x^2)e^{-x^2-(y+1)^2} - 10 \left(\frac{x}{2} - x^3 - y^4 \right) e^{-x^2-y^2} - \frac{e^{-(x+1)^2-y^2}}{3} \right), -3 \leq x, y \leq 3$$



Şekil 5.7. Örnek 2'deki optimizasyon probleminin genetik algoritma ile çözümü. (kesik çizgiler minimum, düz çizgiler ise ortalama değerlerdir)

Şekil 5.6'da örnek 1'deki maksimum optimizasyon probleminin genetik algoritma ile çözümü verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, popülasyon boyunun azalması çözümden uzaklaşılmasına neden olmuştur. Popülasyon boyu genetik algoritmalarda önemli bir kriterdir. Popülasyon boyunun çok arttırılması problemin çözümüne yaklaştırmakla beraber, ek işlem külfetini de beraberinde getirir. Bu sebeple popülasyon boyu ne çok büyük, ne de çok küçük seçilmelidir. Şekil 5.7'de minimum optimizasyon problemi ile ilgili bir örnek çözüm gösterilmiştir. İlk örnekte rulet tekerleği yöntemi, ikinci örnekte ise turnuva yöntemi kullanılmıştır. Genetik işlemlerin her ikisi de örnek optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Son yıllarda birçok alanda çok yaygın bir şekilde kullanılan genetik algoritmalar, önceki bölümlerde modellenmesi anlatılan kurutma sürecinin optimizasyon probleminin sayısal çözümünde kullanılmıştır.

5.3. Genetik Algoritma Tabanlı Doğrusal olmayan Öngörülü Denetleyici Tasarımı

Bölüm 4’de akışkan yataklı kurutma sürecinin modellenmesinden ve ürün aktivitesinden bahsedilmiştir. Bu bölümde ise kurutma sürecinin en verimli şekilde çalışabilmesi için bir maliyet fonksiyonu oluşturulmuş ve bu maliyet fonksiyonundan yola çıkılarak optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Problemdeki parametrelerin birbiri ile bağlantılı olması analitik çözümü zorlaştırmış ve çözüm için global arama algoritmalarından yararlanılmıştır. Bu arama algoritmalarından birisi olan ve bu bölümde temel prensipleri verilen genetik arama algoritmaları optimizasyon problemlerinin sayısal çözümlerinde kullanılan başarılı bir yöntemdir ve burada denklem 5.6’da verilen ekme mayası kurutma sürecinin optimizasyon probleminin çözümünde kullanılmıştır. Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan genetik arama algoritmasına ilişkin bilgiler tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Optimizasyonda kullanılan genetik algoritma parametreleri.

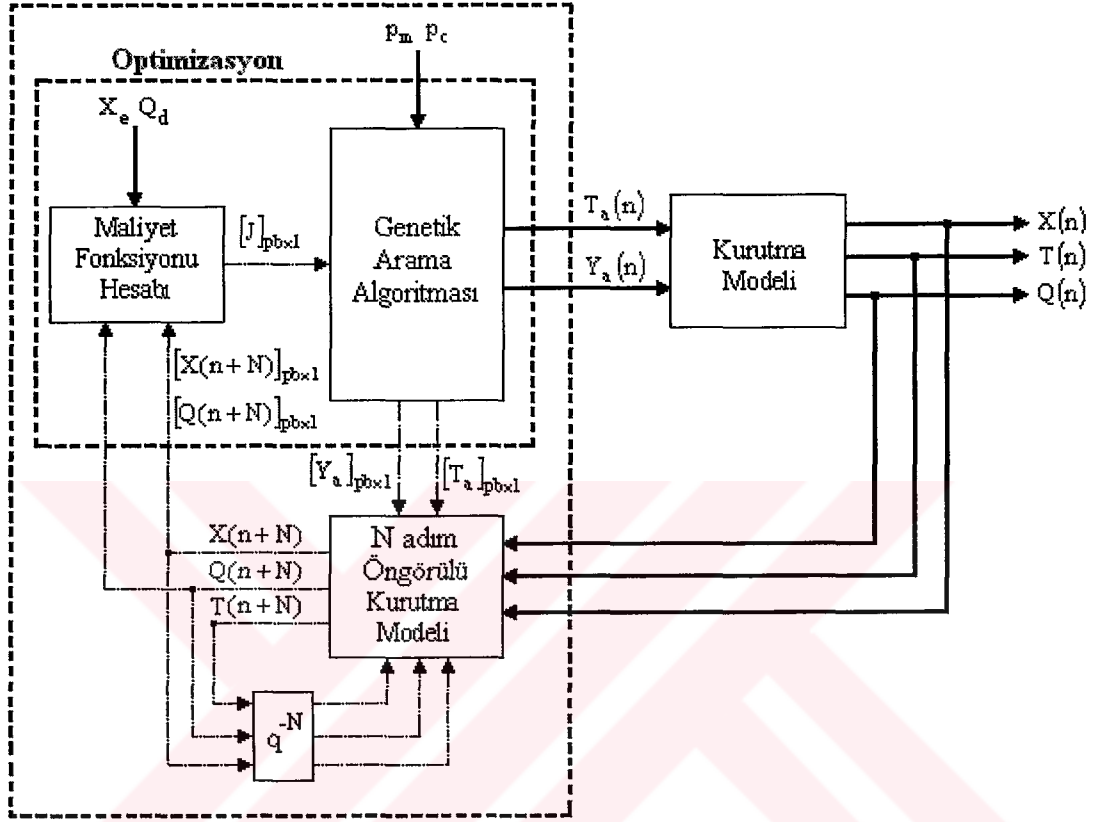
Populasyon boyu	10
Değişim aralığı	0,01
Çaprazlama işlemi olasılık değeri	0,4
Mutasyon işlemi olasılık değeri	0,05
Turnuva sayısı	5

Kontrol probleminin çözümü için kullanılan genetik arama algoritması Matlab programı ile oluşturulmuştur. Denetleyici tasarımı ile ilgili çalışmalarda, iki tip denetleyici düşünülmüş: birinci denetleyicide, kontrol değişkeni olarak havanın sıcaklığı (T_a), ikincisinde ise hem havanın sıcaklığı hem de havanın nem oranı (Y_a kg su buharı / kg kuru hava) kontrol değişkeni olarak ele alınmıştır. Kullanılan genetik algortmada alfabe olarak ikili kodlar (0,1) kullanılmıştır. Populasyondaki bireylerin oluşturulması için kromozom boyunu belirlemek gerektiğinden, denklem 5.11’de kromozom boyunun formülü verilmiştir.

$$L_c = \log_2(\Delta(T_a, Y_a)/\tau) + 1 \quad (5.11)$$

Burada L_c kromozom boyunu, $\Delta(T_a, Y_a)$ sınır koşullarının değişim aralığını, τ ise değişim aralığını göstermektedir. Kromozom boyuna bir eklenmesinin sebebi

kromozomun sonuna (fitness) fonksiyon değerlerinin yerleştirilmesidir. Şekil 5.8’de doğrusal olmayan öngörülü kontrol ile ilgili blok diyagram verilmiştir. Blok diyagramdaki pb populasyon boyunu, N öngörü ufkunu, n benzetim adımını, q^{-N} ise N adım gecikmeyi göstermektedir.



GA Tabanlı Doğrusal Olmayan Öngörülü Kontrol

Şekil 5.8. Ekmek mayası kurutma sürecinin doğrusal olmayan öngörülü kontrolü.

Blok diyagramda iki tane kurutma modeli verilmiştir. Bir tanesi kurutma sürecinin modeli, diğeri ise N adım öngörülü kurutma modelidir. İkinci modelin amacı, belirlenen bir N öngörü ufkuna kadar genetik algoritma ile populasyon içinden seçilen kontrol değişkenleri (T_a, Y_a) için maliyet fonksiyonunu bulmakta kullanılacak model çıktıları üretmektir. Modelin populasyon boyu kadar N adım sonrasında bulunduğu çıkışlar $[X(n+N)]_{pbx1}$, $[Q(n+N)]_{pbx1}$ için maliyet fonksiyon değerleri hesaplanır. Son adım olarak genetik algoritma bloğuna, bulunan maliyet fonksiyonu değerleri girilir ve genetik adımlar sonrası populasyon içindeki en iyi bireyler yani kontrol değişkenleri bulunur. Populasyon içindeki bireyler GA yardımı ile güncellenir ve bu döngü devam eder. Her döngü sonrası ve bir önceki bulunan en

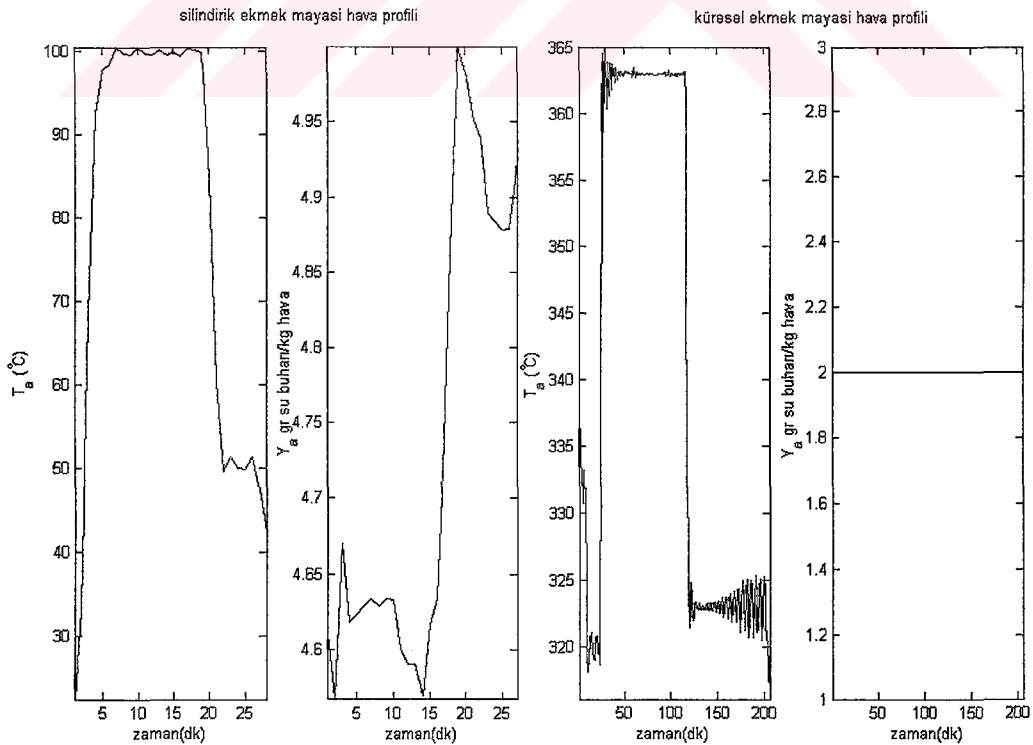
iyi bireye ait değerlerin farkına bakılır ve belirlenen bir eşik seviyesinin altına inilmişse, GA sonlandırılır, en iyi bireyler kontrol değişkeni olarak kurutma modeline uygulanır.

5.4. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler

Ekmek mayası kurutma sürecinin genetik algoritma tabanlı doğrusal olmayan öngörülü denetimi ile ilgili olarak, sırasıyla kontrol benzetim alışmaları I ve II, tasarlanan denetleyicinin geliştirilmesi ve bozucu durum etkisi başlıkları altında dört kısım ele alınmıştır. Kurutma sürecinin kontrolü ile ilgili bilgisayar programları Matlab 6.5 (Matlab® 2000) ile yapılmış olup EK E’de ayrıntı olarak verilmiştir.

5.4.1. Kontrol benzetim alışmaları I

Bu kısımda havanın sıcaklığı kontrol değişkeni olarak dşnlm ve optimizasyon problemi GA ile bu şartlar için zlmştir. Benzetimler iki tip ekmek mayası için yapılmıştır: Silindirik ve küresel granüllü maya. Bu iki tip maya için kullanılan deneysel hava profilleri şekil 5.9’da gösterilmiştir.



şekil 5.9. Kurutma sürecinde kullanılan deneysel hava profilleri.

Denklem 5.11 yardımı ile kromozom boyu 14 olarak hesaplanmıştır. Kurutucu görevi gören havanın enerji maliyeti, oluşan ürünün aktivitesi ve toplam kurutma zamanı kurutma süreçlerinde önemli rol oynar. Havanın enerji maliyeti denklem 5.12’de gösterildiği gibi bulunur.

$$J_a = \int_0^{t_d} u_a T_a (c_{p,a} + c_{p,wv} Y_a) dt \quad (5.12)$$

Denklem 5.12 yardımı ile şekil 5.9’daki hava profillerinin enerji maliyetleri sırasıyla, silindirik granüllü ekmek mayası için 1.944.500 kJ ve küresel granüllü ekmek mayası için ise 14.243.000 kJ olarak bulunur. Yine şekil 5.9’dan da anlaşılacağı üzere, silindirik granüllü ekmek mayasının kurutulma süresi, yükleme evresi hariç 27 dakika ve küresel granüllü ekmek mayası için ise 206 dakikadır. Kurutma sonunda elde edilen ürünün aktivitesi, deneysel ortamda silindirik granül için % 89,6 ve küresel granül için de % 86 olarak ölçülmüştür. Denklem 5.13’de optimizasyon probleminin tanımı ve denklem 5.14’de ise sınır koşulu verilmiştir:

$$\min_{T_a} J(T_a) \quad (5.13)$$

$$\text{sınır koşulu: } 293K \leq T_a \leq 373K \quad (5.14)$$

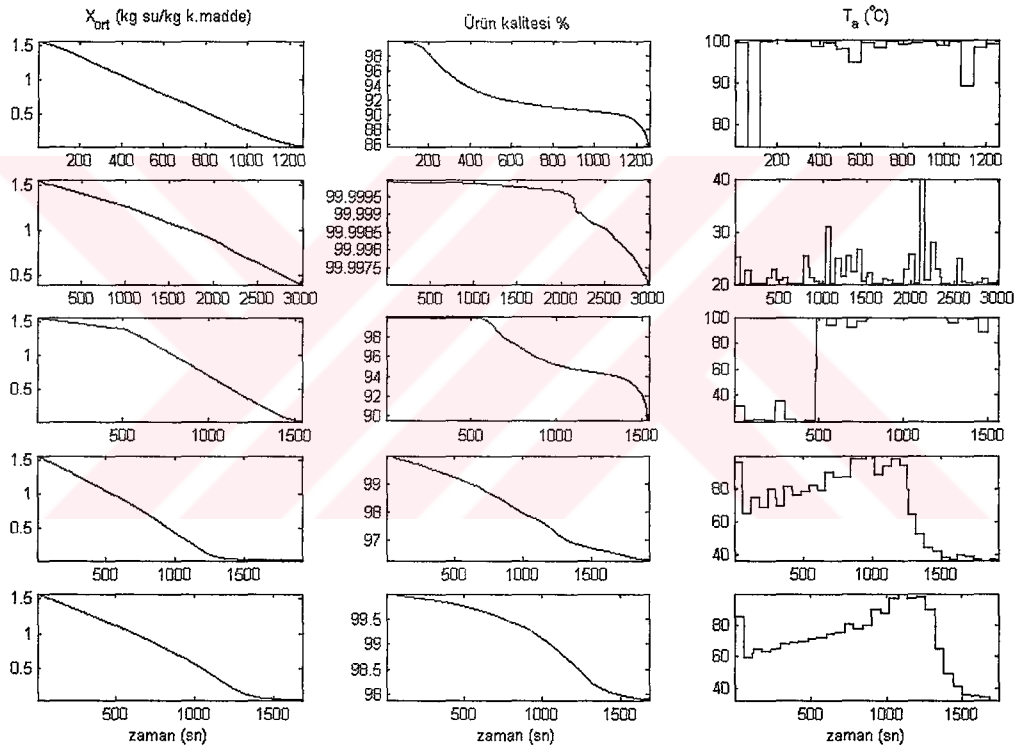
Tablo 5.2’de silindirik granüllü ekmek mayası için değişik maliyet fonksiyonları yardımı ile yapılan optimizasyon benzetim sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.2. Silindirik granüllü ekmek mayası için değişik maliyet fonksiyonları yardımı ile yapılan optimizasyon benzetim sonuçları.

Maliyet fonksiyonu	Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Silindirik granüllü ekmek mayası	89,6	1.944.500	1620
$\beta_2 \cdot (\bar{X} - X_e)$	85,7376	1.588.600	1260
$\beta_3 \cdot (100 - Q)$	99,997	3.011.600	3600
$\beta_1 \cdot u_a \cdot T_a \cdot (c_{p,a} + c_{p,wv} \cdot Y_a) + \beta_2 \cdot (\bar{X} - X_e)$	89,478	1.817.500	1537
$\beta_2 \cdot (\bar{X} - X_e) + \beta_3 \cdot (100 - Q)$	96,2841	2.244.400	1920
$\beta_1 \cdot u_a \cdot T_a \cdot (c_{p,a} + c_{p,wv} \cdot Y_a) + \beta_2 \cdot (\bar{X} - X_e) + \beta_3 \cdot (100 - Q)$	97,8956	1.967.600	1682

Tablo 5.2’den de görüleceği üzere optimizasyon problemlerinde maliyet fonksiyonunu belirlemek en temel ve en önemli kriterlerden biridir. İlk maliyet

fonksiyonunda yalnızca nem kesrinin istenilen değere ulaşması arzu edilmiş ve bunun neticesinde de benzetim sonucunda aktivitesi nispeten düşük bir ürün (%85,7376) ortaya çıkmıştır. Buna karşılık havanın enerji maliyeti, kısalan kurutma süresi ile birlikte düşmüştür. İkinci fonksiyon tanımında ise çıkacak ürünün aktivitesi yalnızca düşünülmüş ve benzetim sonunda ürün aktivitesi yüksek (%99,997), fakat enerji maliyeti yüksek (3.011.600 kJ) ve kurutma süresi (3000sn) oldukça uzun bir sonuç bulunmuştur. Tablodaki en iyi benzetim sonucu son satırda yer alan ve havanın enerji maliyeti, ürün aktivitesi ve nem kesrini de içine alan maliyet fonksiyonuna aittir. Şekil 5.10'da Tablo 5.1'de verilen maliyet fonksiyonları ile yapılan benzetim sonuçları gösterilmiştir.

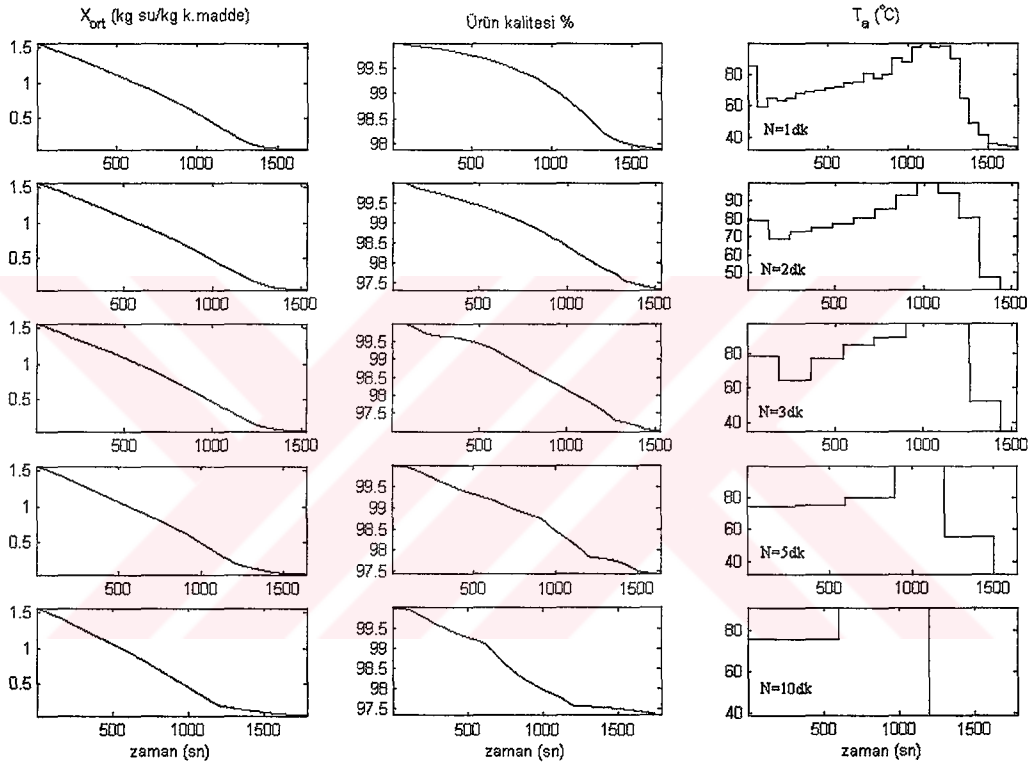


Şekil 5.10. Silindirik granüllü ekme mayası için değişik maliyet fonksiyonları yardımı ile yapılan optimizasyon benzetim sonuçları.

Optimizasyon problemi çözümünde N öngörü ufku 1 dakika, havanın nem oranı ise 0,005 kg su buharı/kg hava olarak alınmıştır. Tablo 5.3'de silindirik granüllü ekme mayasının değişik öngörü ufku değerleri için benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 5.11'de ortalama nem kesrine, ürün aktivitesine ve kontrol değişkeni havanın sıcaklığına ait grafikler gösterilmiştir. Tablo 5.3 ve Şekil 5.11'den N=2 dk ve N=3 dk öngörü ufkuları için denetleyicinin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir.

Tablo 5.3. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufku değerleri için kontrol sonuçları.

$\min_{T_a} J(T_a)$ $Y_a = 0,005$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K$	Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)	
Silindirik granüllü ekmek mayası	89,6	1.944.500	1620	
B1	N=1 dk	97,8956	1.967.600	1682
B2	N=2 dk	97,3186	1.825.500	1534
B3	N=3 dk	97,0119	1.818.500	1526
B4	N=5dk	97,4201	1.927.300	1637
B5	N=10 dk	97,3167	2.073.200	1784

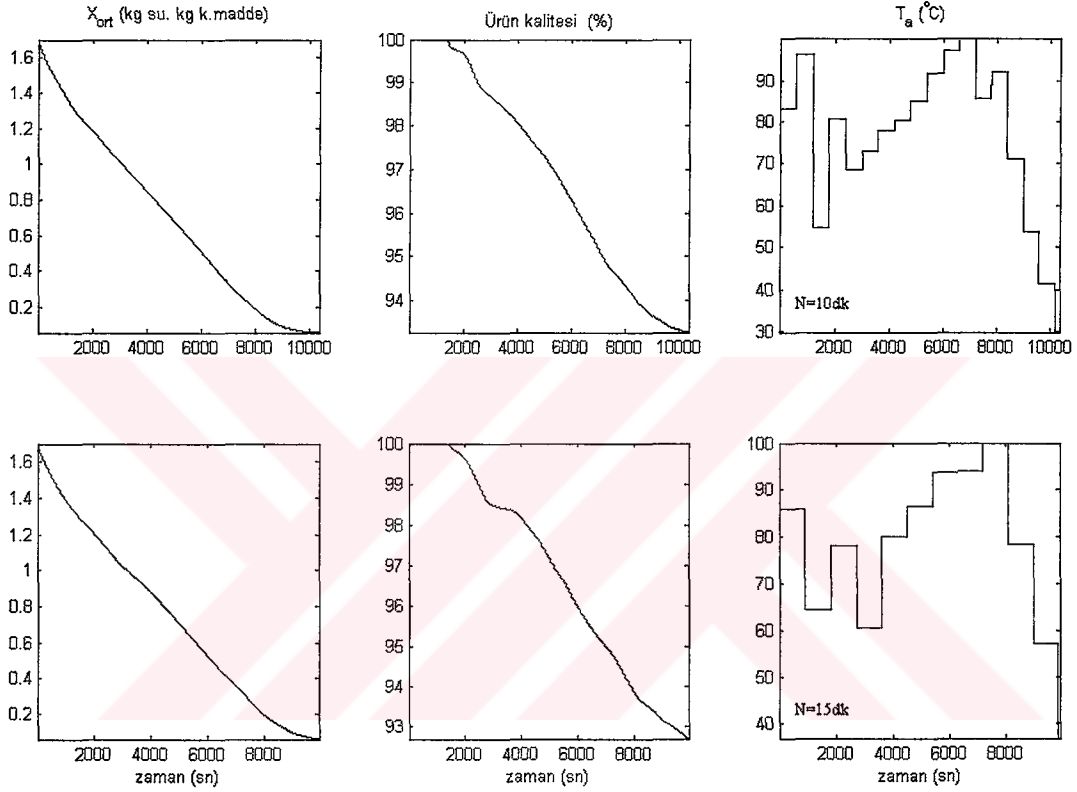


Şekil 5.11. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufku değerleri için ortalama nem kesri, ürün aktivitesi ve hava sıcaklığı değişimleri.

Kurutma sürecinin kontrolünde, öngörü ufkunu artırmak çözümü iyileştirdiği kadar belirli bir seviyeden sonra da çözümü kötüye götürmektedir. (Şekil 5.11) Dikkat edilecek olunursa, öngörü ufku etkisi kurutma havasının enerji maliyetinde ve kurutma zamanında ürün aktivitesine göre daha fazladır ve bulunan hava sıcaklık profilleri de benzer biçimde değişim gösterirler. Küresel granüllü ekmek mayasının kurutulma işlemi silindirik granüle göre daha uzundur. Tablo 5.4’de küresel granül için N=10dk ve N=15dk için bulunan benzetim sonuçları verilmiştir.

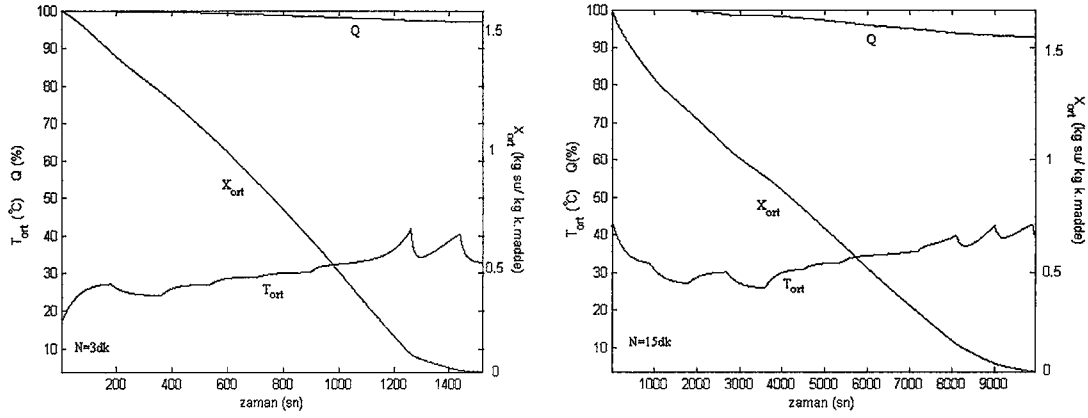
Tablo 5.4. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin iki öngörü ufku değeri için kontrol sonuçları.

$\min_{T_a} J(T_a) \quad Y_a = 0,005 \quad \text{s.t.} \quad 293K \leq T_a \leq 373K$		Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Küresel granüllü ekmek mayası		86	14.243.000	12.360
A1	N=10 dk	93,2768	12.361.000	10.369
A2	N=15 dk	92,6859	11.934.000	9953



Şekil 5.12. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin iki öngörü ufku değeri için ortalama nem kesri, ürün aktivitesi ve hava sıcaklığı değişimleri.

Küresel granüllü ekmek mayasının iki öngörü ufku için benzetim sonuçları şekil 5.12’de gösterilmiştir. N=10dk ve N=15dk için yapılan benzetim sonuçlarından, ürün aktivitesinin (%93,2768 ve %92,6859) deneysel veriden (%86) daha iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kurutma zamanı (9953sn) ve enerji maliyetinde (11.934.000kJ) en başarılı performansı N=15dk’lık benzetim sonucu sergilemiştir. Şekil 5.13’de bulunan en iyi benzetim sonuçları silindirik granüllü ekmek mayasının N=3dk için, küresel granüllü ekmek mayasının da N=15dk için elde edilen ürün aktivitesi, ortalama nem kesri ve ortalama sıcaklık değişimleri bir arada gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Silindirik ve küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde N=3dk ve N=15dk için ürün aktivitesi, ortalama nem kesri ve ortalama sıcaklık değişimleri.

5.4.2. Kontrol benzetim çalışmaları II

Doğrusal olmayan öngörülü denetleyicide kontrol değişkeni olarak havanın sıcaklığına nem oranı da ilave edildiğinde, optimizasyon probleminin tanımı denklem 5.15'deki ve sınır koşulu ise denklem 5.16'daki gibi değişir:

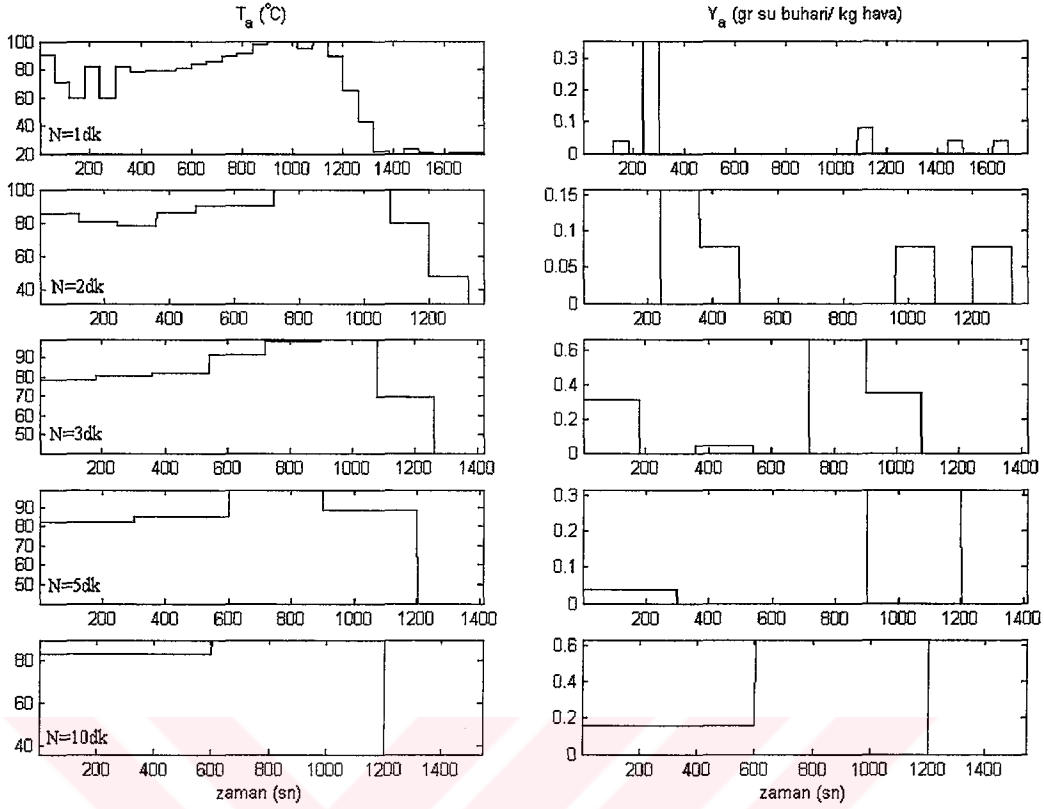
$$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a) \quad (5.15)$$

$$\text{s.t. } 293K \leq T_a \leq 373K \text{ ve } 0 \leq Y_a \leq 0.005 \quad (5.16)$$

Tanımlanan yeni denetleyici ile silindirik ve küresel granüllü ekmek mayasının kurutma süreçleri için hava sıcaklık ve nem oranı profilleri değişik öngörü ufuklarına bağlı olarak hesap edilmiştir. Tablo 5.5'de silindirik granül için kontrol sonuçları verilmiştir. Denetleyicinin değişik öngörü ufuk değerlerine verdiği cevaplar Şekil 5.14'de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.5. Silindirik granüllü ekmek mayasının değişik öngörü ufku değerleri için iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.

$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a)$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K, 0 \leq Y_a \leq 0.005$		Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Silindirik granüllü ekmek mayası		89,6	1.944.500	1620
B6	N=1 dk	98,5103	2.008.900	1757
B7	N=2 dk	97,8126	1.642.400	1369
B8	N=3 dk	98,0032	1.692.500	1421
B9	N=5 dk	97,8068	1.683.700	1411
B10	N=10 dk	98,1463	1.813.500	1545

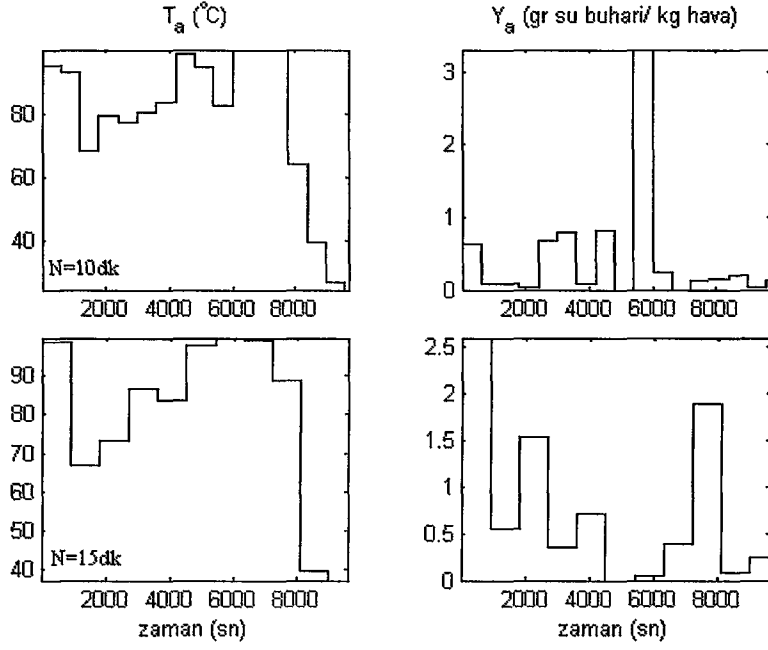


Şekil 5.14. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufukları için denetleyici çıkışları.

Genetik tabanlı doğrusal olmayan öngörülü denetleyiciye ikinci kontrol değişkeninin ilave edilmesi ile benzetim sonuçları biraz daha iyileştirilmiştir. Örneğin N=2 dk için, tek kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonucu, ürün aktivitesi % 97,3186, kurutma süresi 1534 sn ve enerji maliyeti 1.825.500 kJ (Tablo 5.3) bulunmasına karşın, ikinci kontrol değişkeninin ilavesi ile yapılan kontrol sonuçlarında ise ürün aktivitesi % 97,8126, kurutma süresi 1369 sn ve enerji maliyeti de 1.642.400 kJ olarak (Tablo 5.5) karşımıza çıkmaktadır. Tablo 5.6'da ise küresel ekmek mayası kurutma sürecinin kontrol sonuçları verilmiştir.

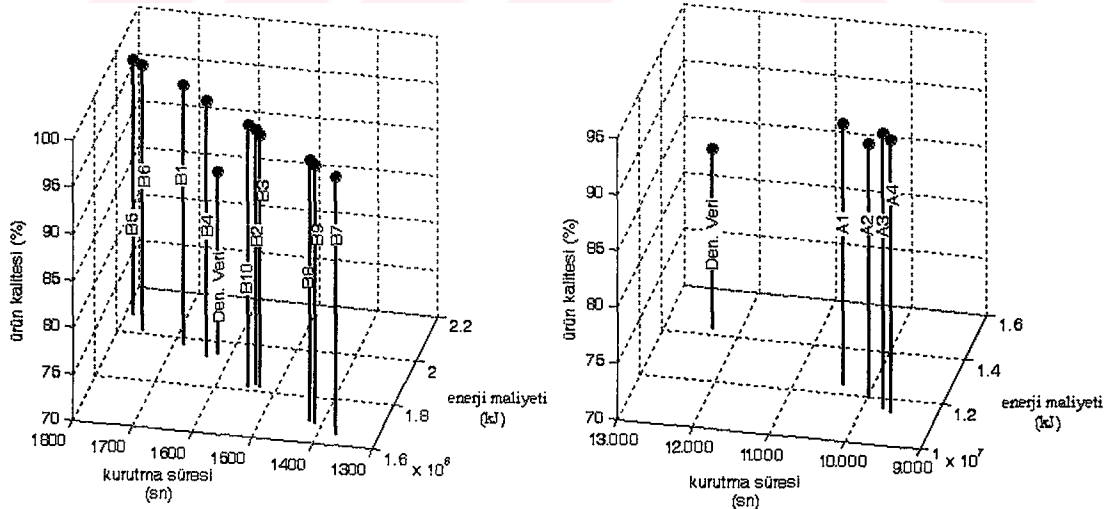
Tablo 5.6. Küresel granüllü ekmek mayasının öngörü ufku değerlerine bağlı iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.

$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a)$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K, 0 \leq Y_a \leq 0.005$	Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Küresel granüllü ekmek mayası	86	14.243.000	12.360
A3 N=10 dk	94,5115	11.535.000	9713
A4 N=15 dk	94,2801	11.432.000	9585



Şekil 5.15. Küresel granüllü ekmeğın mayası kurutma sürecinin değişik öngörü ufukları için denetleyici çıkışları.

Şekil 5.15’de küresel granüllü ekmeğın mayasının N=10 dk ve N=15 dk için bulunan kontrol değişkeni profilleri gösterilmiştir. Yine silindirik granül de olduğu gibi küresel granülde de geliştirilen denetleyicinin verdiği benzetim sonuçlarının denetleyicinin ilk haline göre daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Silindirik ve küresel granül için yapılan kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.16'da sırasıyla silindirik ve küresel granüllü ekmek mayası kurutma süreçlerinin doğrusal olmayan öngörülü kontrolü ile ilgili benzetim sonuçları 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. Ürün aktivitesinin her iki granül için de birbirine yakın değerlerde ve yüksek aktivite sınırlarında olduğu Şekil 5.16'dan açıkça anlaşılmaktadır. Kurutma süreçlerinde enerji maliyeti ve kurutma süresinin minimum, ürün aktivitesinin ise maksimum olması arzu edildiğinden, benzetim sonuçları içinden silindirik granül için B7, küresel granül için ise A4 en iyi kontrol sonuçları olarak karşımıza çıkmaktadır. İki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan denetleyicinin tek değişkenli denetleyiciye oranla daha başarılı olduğu benzetim sonuçlarından anlaşılmaktadır.

5.4.3. Denetleyicinin geliştirilmesi

Ekmek mayasının kurutma süreci için tasarlanmış olan denetleyicinin bulunduğu kontrol profilleri incelenecek olunursa, kontrol değişkenindeki değişik seviyeler arasındaki geçişlerin sert ve keskin olduğu görülmektedir. Gerçek sistemlerde ise bu geçişler daha yumuşaktır ve kontrol hava sıcaklığının saniye bazlı değişiminin negatif $\Delta u_T \leq 0$ veya pozitif $\Delta u_T > 0$ olması durumunda, bir sonraki kontrol değişkeni $u_T(t+1)$ sırasıyla denklem 5.17 ve 5.18'deki gibi yazılabilir:

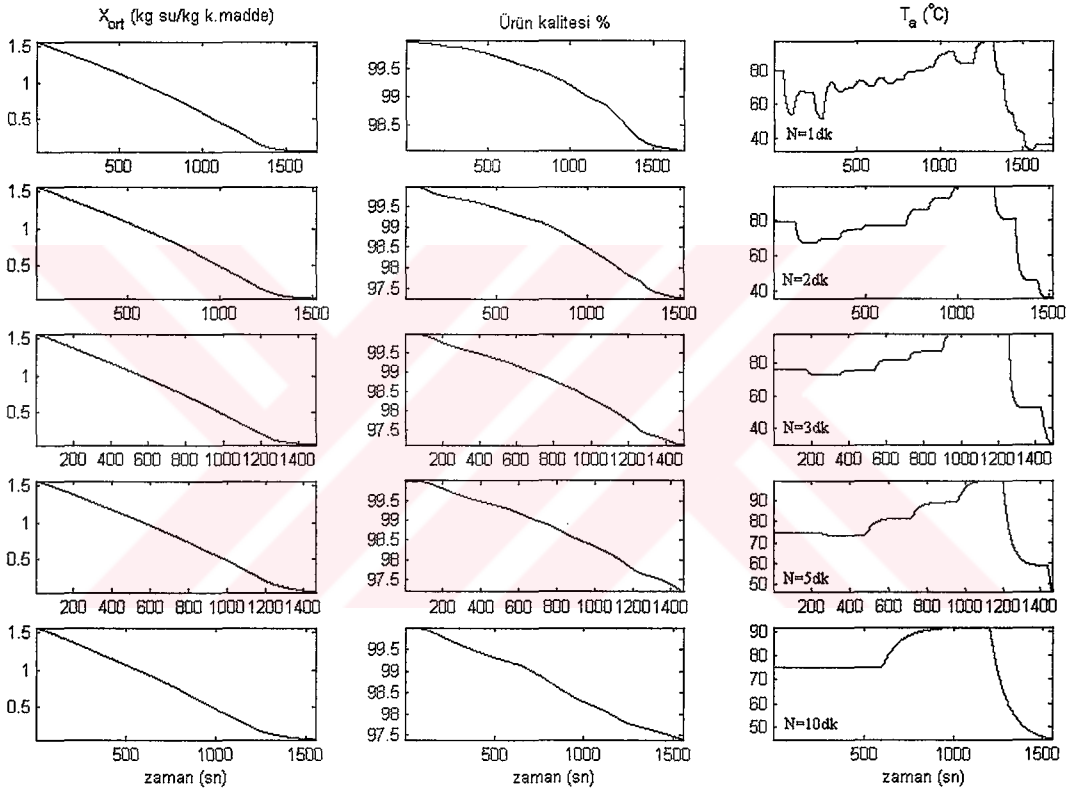
$$\Delta u_T \leq 0 \Rightarrow u_T(t+1) = u_T(t) + (e^{-at} - 1)\Delta u_T \quad (5.17)$$

$$\Delta u_T > 0 \Rightarrow u_T(t+1) = u_T(t) + (1 - e^{-at})\Delta u_T \quad (5.18)$$

burada a geçiş faktörü diye tanımlanabilir. Tablo 5.7'de silindirik granüllü ekmek mayasının tek kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol benzetim sonuçları, değişik öngörü ufukları ve geçiş faktörleri için verilmiştir. Öngörü ufku değeri artırıldıkça optimizasyon sonucu sürekli iyi bir trendi takip etmemekte, belirli bir ufuk değerinden sonra geri dönmektedir. Bunun sebebi zaten normal şartlar altında yapılan silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin başlangıç nem kesri ve granül boyutuna bağlı olarak 27 dakika gibi kısa bir sürede bitiyor olmasıdır. Şekil 5.17'de silindirik granül için kurutma sürecinde oluşan ortalama nem kesri, ürün aktivitesi ve sürecin giriş hava sıcaklığı profillerinin öngörü ufuk değerlerine bağlı değişimleri gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Silindirik granüllü ekmek mayasının tek kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.

$\min_{T_a} J(T_a)$ $Y_a = 0,005$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K$	Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)	
Silindirik granüllü ekmek mayası	89,6	1.944.500	1620	
C1	N=1 dk	98,036	1.961.700	1679
C2	N=2 dk	97,2529	1.809.900	1519
C5	N=3 dk	97,1185	1.782.600	1491
C8	N=5 dk	97,1953	1.751.500	1461
C9	N=10 dk	97,4051	1.842.700	1552

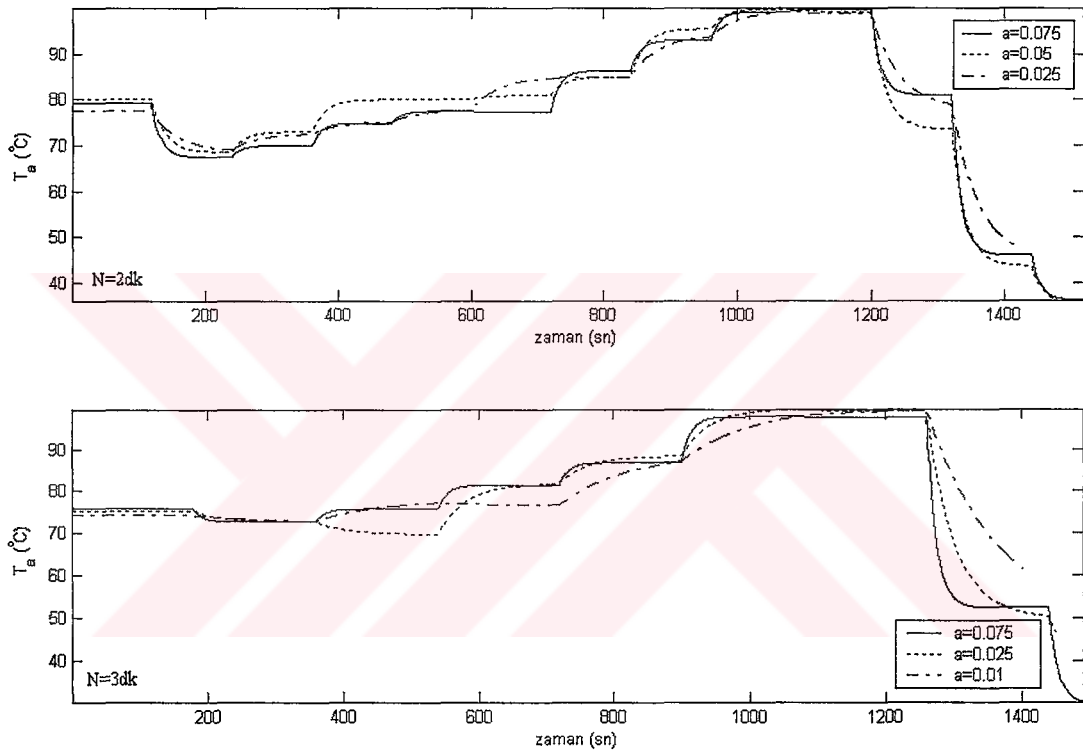


Şekil 5.17. Silindirik granül için yapılan kontrol benzetim sonuçları.

Şekil 5.17'den de görüleceği üzere, tek çıkışlı denetleyicide yapılan değişiklik, kurutma sürecinin optimizasyon çalışmalarını bir adım daha ileriye götürmüştür. Denetleyici çıkışı grafiklerinden hava sıcaklığı profillerinin gerçek sistemdekilere benzerliği görülmektedir. Tablo 5.8'de geçiş faktörünün kontrol sonuçlarına etkisi verilmiştir. N=2dk ve N=3dk öngörü ufuk değerleri için geçiş faktörünün azalması optimizasyon sonuçlarında ürün aktivitesini yaklaşık aynı oranda tutmasına rağmen, enerji maliyeti ve kurutma sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır.

Tablo 5.8. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin geçiş faktörüne bağlı olarak yapılan kontrol benzetim sonuçları.

Silindirik granüllü ekmek mayası			Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
N=2dk	C2	a = 0,075	97,2529	1.809.900	1519
	C3	a = 0,050	97,0834	1.769.800	1477
	C4	a = 0,025	97,0096	1.717.300	1427
N=3dk	C5	a = 0,075	97,1185	1.782.600	1491
	C6	a = 0,025	97,1314	1.741.300	1451
	C7	a = 0,010	97,0835	1.691.600	1403

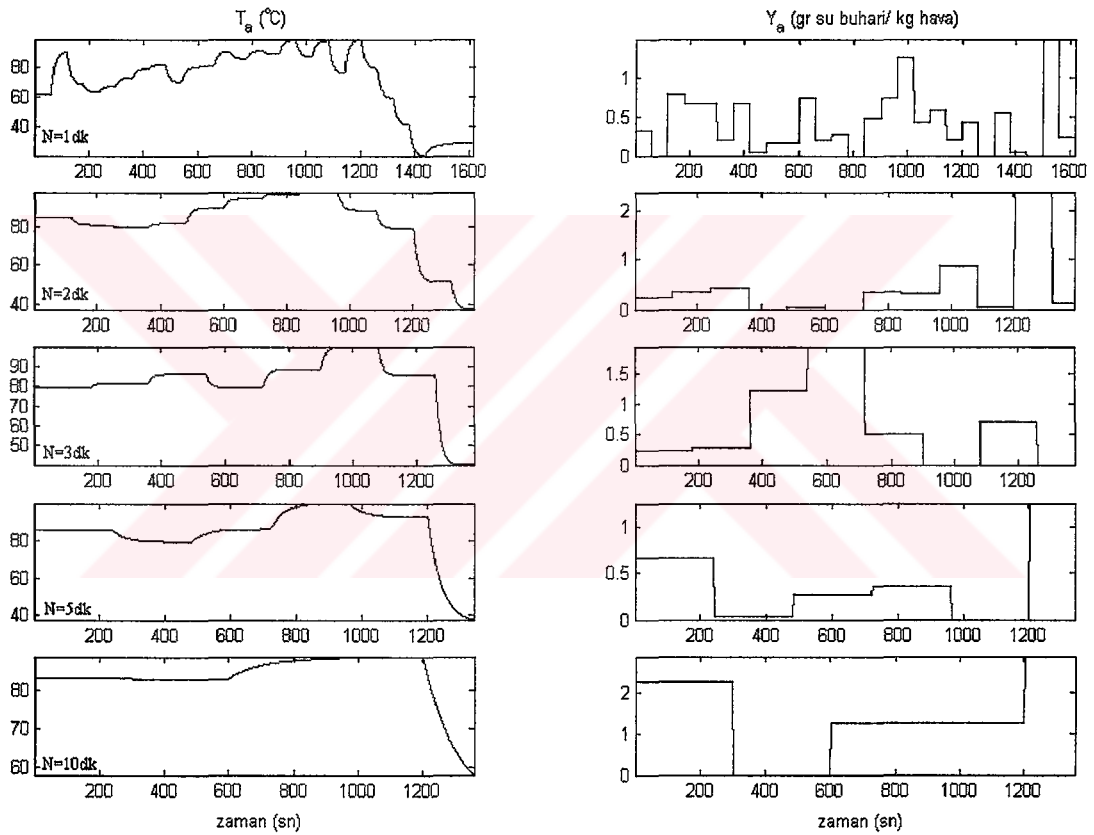


Şekil 5.18. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde hava sıcaklığı profiline göre geçiş faktörüne bağlı olarak değişimi.

Denetleyici çıkışının geçiş faktörüne bağlı olarak değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir. Geçiş faktörünün azalması kurutma süresini azaltmakla birlikte hava sıcaklık profiline her öngörü ufku için oturma süresini de azaltmaktadır. Tablo 5.9’da değişik öngörü ufuk değerleri için silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde 2. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları verilmiştir. Kontrol değişkenleri havanın sıcaklığı ve havanın nem oranı profillerinin öngörü ufuklarına bağlı olarak değişimleri Şekil 5.19’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Silindirik granüllü ekmek mayasının iki kontrol değişkeni kullanılarak yapılan kontrol sonuçları.

$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a)$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K, 0 \leq Y_a \leq 0.005$		Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Silindirik granüllü ekmek mayası		89,6	1.944.500	1620
D1	N=1 dk	98,5747	1.878.100	1619
D2	N=2 dk	97,8726	1.665.400	1391
D5	N=3 dk	97,9416	1.651.800	1380
D8	N=5 dk	97,6413	1.615.500	1341
D9	N=10 dk	97,6158	1.635.000	1358

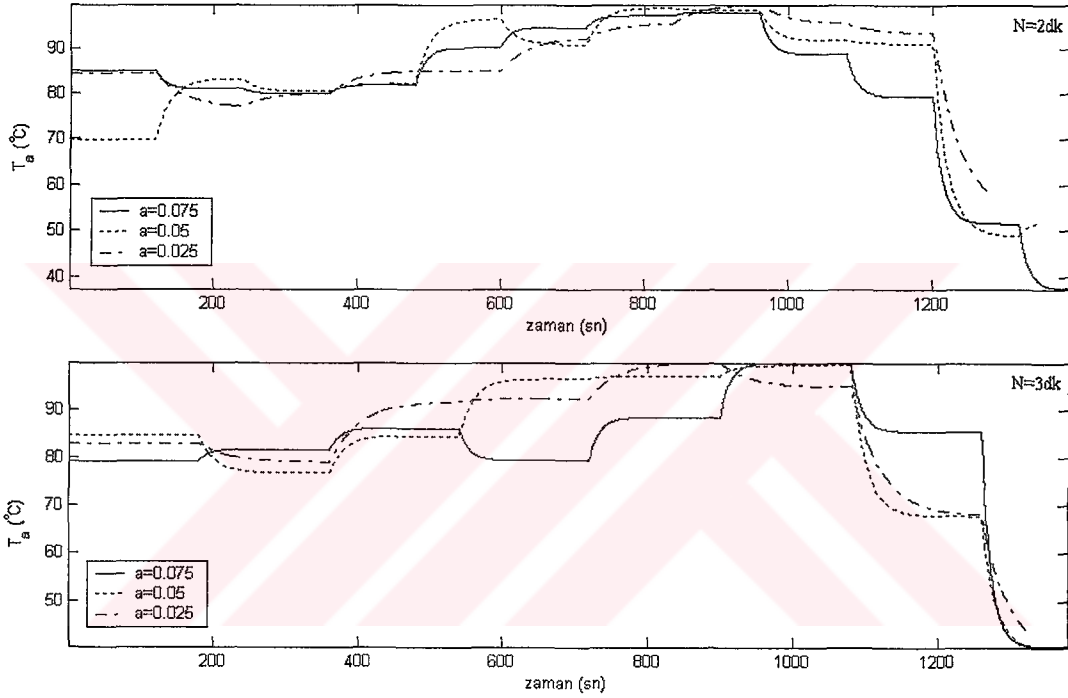


Şekil 5.19. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinde değişik öngörü ufukları için bulunan kontrol profilleri.

Tablo 5.10'da 2. denetleyici için yapılan geçiş faktörüne bağlı kontrol benzetim sonuçları, Şekil 5.20'de ise hava sıcaklığının geçiş faktörüne bağlı profilleri verilmiştir. Yapılan benzetimlerde $a=0,025$ geçiş faktörü ve $N=2$ dk öngörü ufku için enerji maliyeti 1.555.400 kJ ve kurutma süresi de 1282 sn olarak en iyi çözüm elde edilmiştir.

Tablo 5.10. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2. denetleyici kullanılarak yapılan geçiş faktörüne bağlı benzetim sonuçları.

Silindirik granüllü ekmek mayası			Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
N=2dk	D2	a = 0,075	97,8726	1.665.400	1391
	D3	a = 0,050	97,6199	1.623.500	1348
	D4	a = 0,025	97,6865	1.555.400	1282
N=3dk	D5	a = 0,075	97,9416	1.651.800	1380
	D6	a = 0,050	97,6278	1.651.900	1375
	D7	a = 0,025	97,5951	1.601.000	1325



Şekil 5.20. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma süreci için 2. denetleyici çıkışı hava sıcaklığı profilinin geçiş faktörüne bağlı olarak değişimi.

Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin her iki denetleyici ile yapılan benzetim sonuçları sırasıyla Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'de verilmiştir.

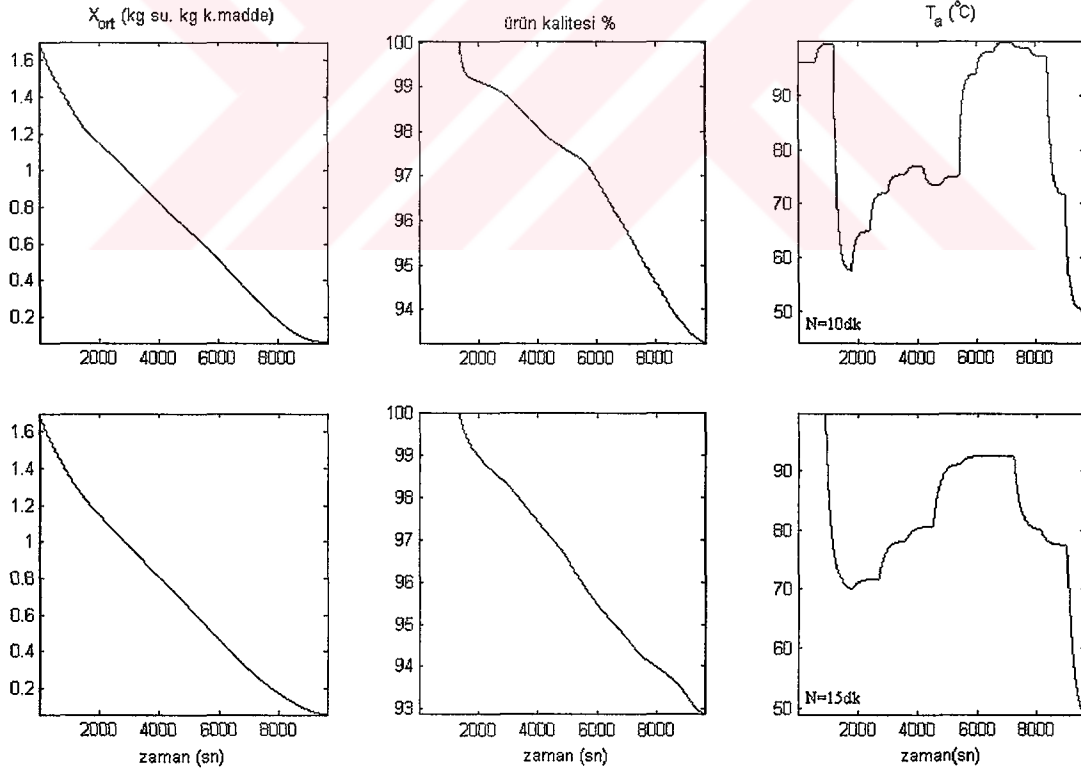
Tablo 5.11. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 1. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.

$\min J(T_a)$ $Y_a = 0,005$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K$	Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)	
Küresel granüllü ekmek mayası	86	14.243.000	12360	
E1	N=10 dk	93,2512	11.638.000	9652
E2	N=15 dk	92,8637	11.573.000	9583

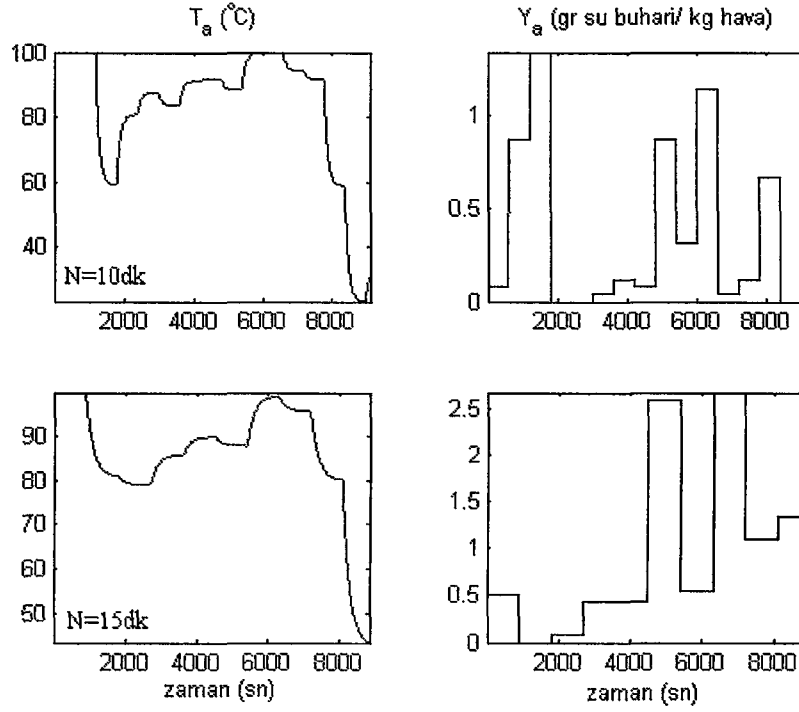
Tablo 5.12. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.

$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a),$ s.t. $293K \leq T_a \leq 373K, 0 \leq Y_a \leq 0.005$		Q (%)	J_a (kJ)	t (sn)
Küresel granüllü ekmek mayası		86	14.243.000	12360
E3	N=10 dk	94,1516	10.970.000	9139
E4	N=15 dk	93,5243	10.735.000	8866

Şekil 5.21’de tek kontrol değişkenine bağlı denetleyicinin, küresel granüllü ekmek mayasının kurutma sürecinde N=10 dk ve N=15 dk öngörü ufuk değerleri için kullanılmasıyla elde edilen benzetim sonuçları gösterilmiştir. Havanın sıcaklığının yanında nem oranının da kullanıldığı iki kontrol değişkenli denetleyici ile yapılan benzetimlerde elde edilen kontrol profilleri ise Şekil 5.22’de verilmiştir. Yapılan benzetimlerde N=10dk öngörü ufku için geçiş faktörü 0,01 ve N=15 dk öngörü ufku için de geçiş faktörü 0,005 olarak alınmıştır.

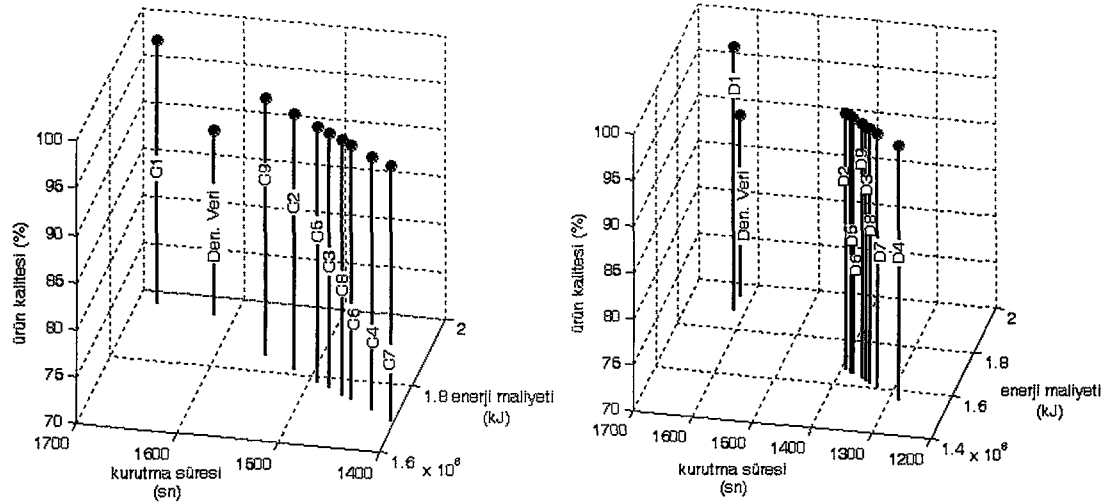


Şekil 5.21. Küresel granüllü ekmek mayası kurutma süreci için 1. denetleyici kullanılarak yapılan benzetim sonuçları.



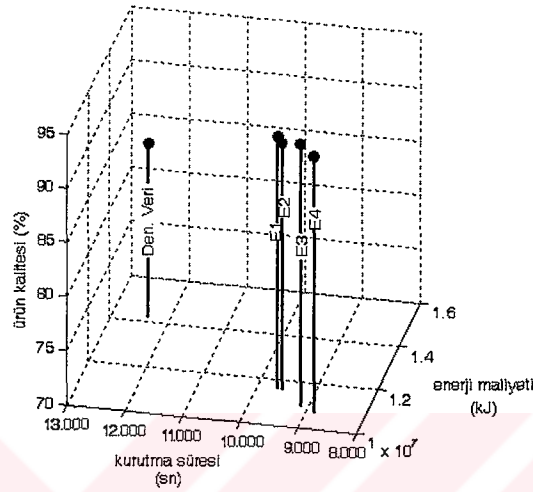
Şekil 5.22. 2. denetleyicinin iki öngörü ufku için verdiği çıkış profilleri.

Geliştirilen denetleyici ile silindirik granüllü ekmek mayasının kurutma süreci için yapılan benzetim sonuçları üç boyutlu olarak Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Silindirik granüllü kurutma sürecinin kontrol benzetimlerinde 1. denetleyici kullanılarak yapılan en iyi sonuç şekilden de görüleceği gibi C7 benzetimi ile elde edilmiştir. Havanın sıcaklığı ve nem oranının kullanıldığı 2. denetleyicide ise en iyi benzetim sonucu D4 olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.23. Silindirik granül için yapılan 1. ve 2. kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

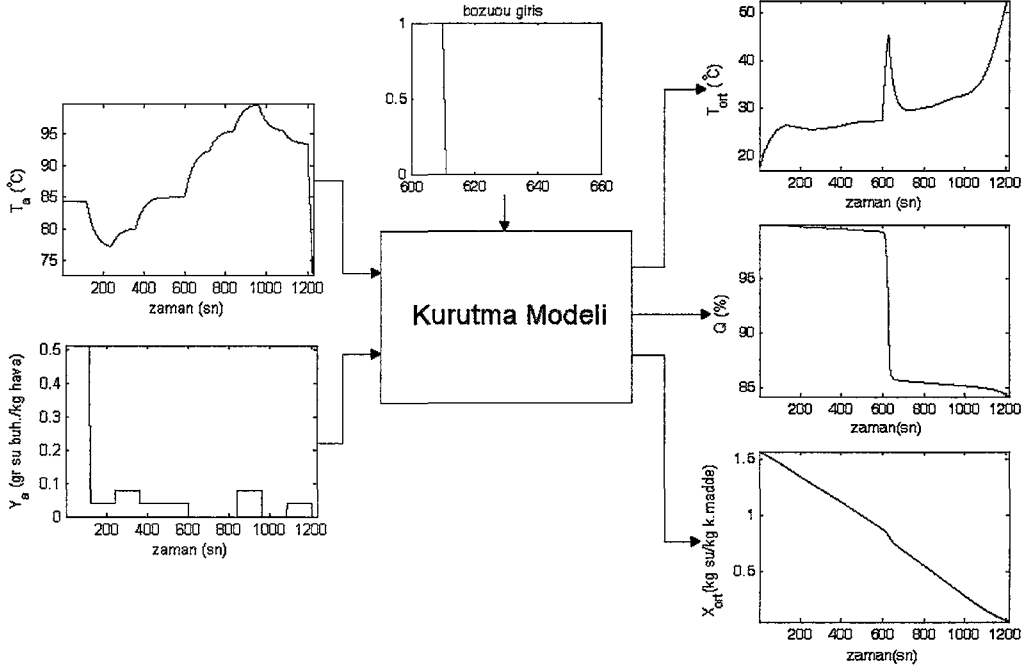
Her iki denetleyici için yapılan benzetimlerden yola çıkarak, öngörü ufkunun N=2 dk veya N=3 dk, geçiş faktörünün de 0.025-0.001 arasında bir değer seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.24’de ise küresel granüllü ekmek mayasının kurutma süreci için yapılan kontrol benzetimleri sonucu 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere 2. denetleyici N=15 dk öngörü ufkü için en iyi sonucu vermiştir.



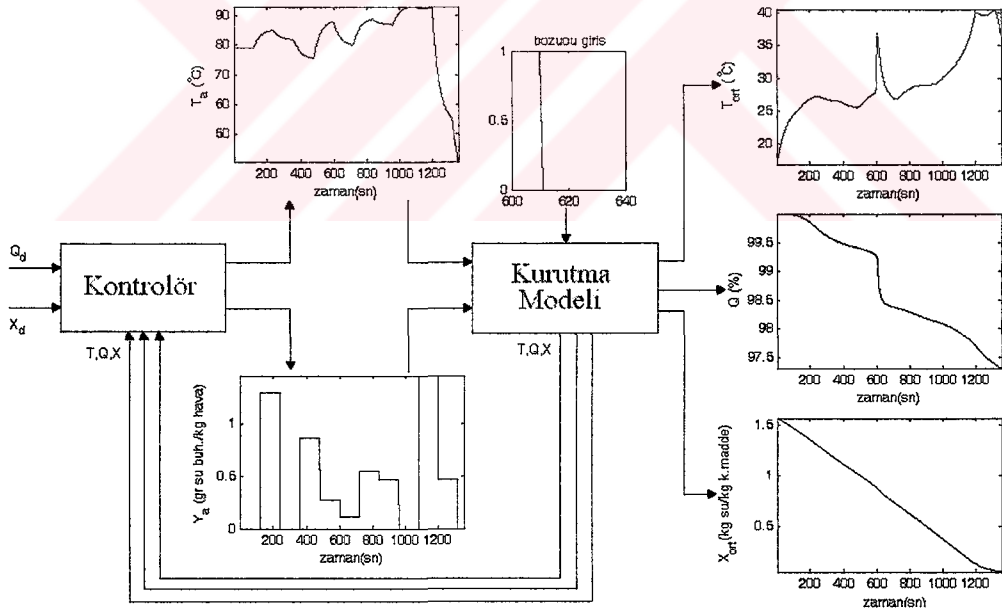
Şekil 5.24. Küresel granül için yapılan 1. ve 2. kontrol benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

5.4.4. Bozucu durum etkisi

Silindirik granül için kurutma modelinde yatak sıcaklığına 600 sn ile 610 sn arasında birim basamak bir bozucu giriş ilave edildiğinde oluşacak durum Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Bozucu işaretin etkisi kurutma sonunda oluşan ürün aktivitesinin ve kurutma zamanının düşmesine neden olmaktadır. Bozucu etken cevabı benzetimlerinde hava profili, önceki benzetimlerde elde edilmiş en iyi denetleyici çıkışı (D4) olarak seçilmiştir. Şekil 5.26’da geliştirilen denetleyicinin bozucu girişe karşı verdiği cevap gösterilmiştir. Yatak sıcaklığına ilave edilen bozucu girişten dolayı ürün aktivitesi % 84’e kadar düşmekte (Şekil 5.25) iken, denetleyici ile bu seviye % 97 civarında tutulmuş ve bozucu sıcaklık etkisi ile ürün aktivitesinde oluşabilecek bir azalma da yine denetleyici ile engellenmiştir.



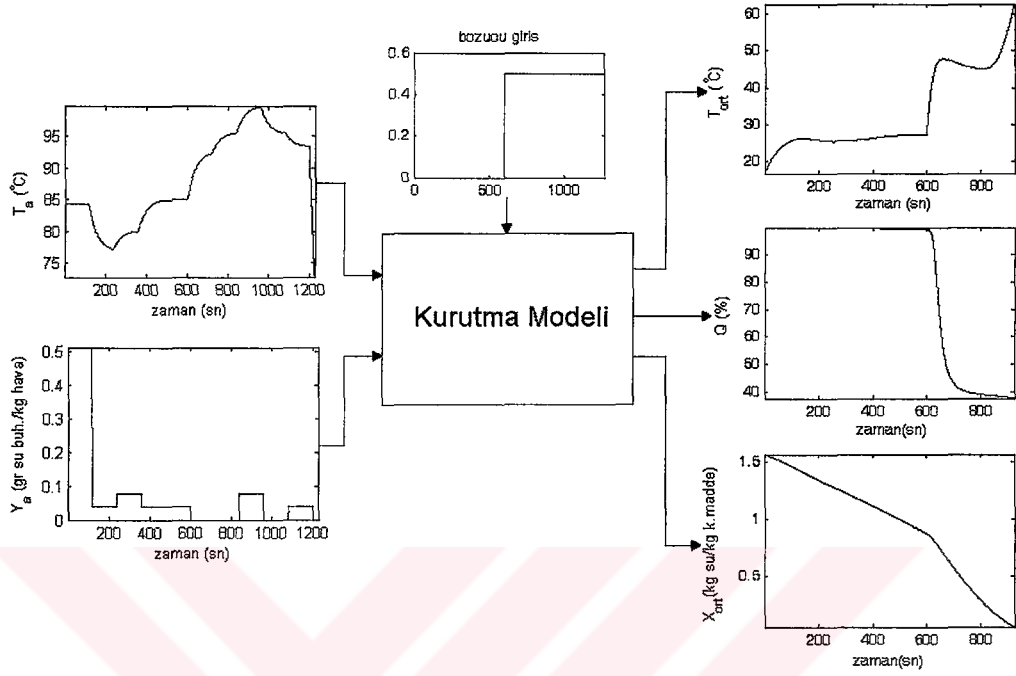
Şekil 5.25. Silindirik granüllü ekme mayası kurutma modelinin 1. bozucu etken karşısındaki benzetim sonuçları.



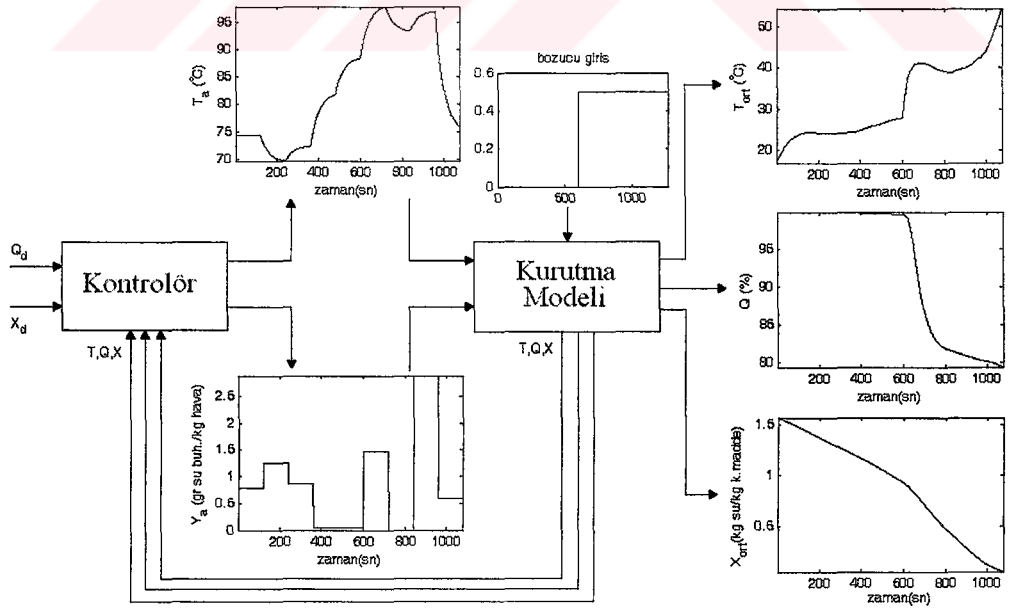
Şekil 5.26. Silindirik granüllü ekme mayası için denetleyicinin 1. bozucu etken karşısında verdiği benzetim yanıtları.

Yatak sıcaklığı için kurutma süreci modeline ilave edilen bozucu girişi $0,5u(t - 600)$ şeklinde seçilirse, kurutma modelinin bu bozucu giriş altındaki çıkışları Şekil 5.27'de gösterildiği gibi oluşur. Dikkat edilecek olunursa, bozucu etken sonucu yatak sıcaklığının artması ile birlikte kurutma süresi 880 sn civarına kadar düşmesine

karşın, oluşan ürünün aktivitesi (% 40) inanılmaz bir şekilde düşmüştür. Denetleyicinin aynı bozucu girişe karşı bulduğu kontrol çıkış profilleri ve kurutma modeli çıkışları Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



Şekil 5.27. Silindirik granüllü ekmek mayası kurutma modelinin 2. bozucu etken karşısındaki benzetim sonuçları.



Şekil 5.28. Silindirik granüllü ekmek mayası için denetleyicinin 2. bozucu etken karşısındaki benzetim yanıtları.

Şekil 5.28'den de görüleceği üzere denetleyicinin 2. bozucu etki için bulduğu yeni hava profilleri ile kurutma sonunda ürün aktivitesi %80 civarlarında tutulmuştur.

Bu bölümde bir önceki bölümde granül tabanlı modellemesi yapılan ekmeç mayası kurutma süreci için bir denetleyici tasarlanmış ve bu denetleyici geliştirilerek benzetim bazında test edilmiştir. Yapılan benzetim sonuçlarından, tasarlanan denetleyicinin her iki granül formu için de gayet iyi sonuçlar verdiği ve kurutma süreçlerinde enerji maliyetini ve toplam kurutma süresini düşürerek, oluşan ürün aktivitesini de artırdığı görülmektedir. Yine bölümün en sonunda kurutma sürecinde yatak sıcaklığına bir bozucu giriş ilavesinin yapıldığı benzetim çalışmasında da denetleyici beklendiği gibi iyi sonuçlar vermiştir. Böylece istenmeyen durumlara karşı kontrol yapısının, başarılı bir performans sergilediği gösterilmiştir.



BÖLÜM 6. YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK BİR EKMEK MAYASI KURUTMA SÜRECİNİN MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ

Bu bölümde günümüzde kontrol uygulamalarında sıkça kullanılan model tabanlı öngörülü kontrolün akışkan yataklı kurutma sürecine uygulanmasına yer verilmiştir. Kontrol sistemlerine süreç modelini dahil etmek için birçok model tabanlı kontrol şemaları önerilmiştir. Hussain (1999) bu kontrol şemalarını üç sınıfa ayırmıştır: öngörülü kontrol (predictive control), ters model tabanlı kontrol (control based on inverse model) ve adaptif kontrol. Bu kontrol şemalarından öngörülü kontrol akademik ve endüstriyel alanlardaki uygulamalarda kullanılarak geliştirilmiştir (Clarke ve diğ. 1987, 1989, Demircioğlu ve diğ.. 1991, Li ve diğ. 2000, Ozkan ve diğ. 2000, Rusnak ve diğ. 2001, Ghazzawi ve diğ. 2001). Model tabanlı öngörülü kontrolde iki ana problem karşımıza çıkmaktadır: Doğrusal olmayan sürecin öngörü modelini oluşturmak ve bu modeli kontrol sistemine adapte etmektir. (Clarke ve diğ. 1991).

Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde gösterdiği başarı nedeniyle öngörü modelleri yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılmıştır. İleri beslemeli YSA ve dinamik YSA kurutma sürecinin önemli parametrelerinden nem kesri ve ürün aktivitesinin öngörülmesinde kullanılmıştır. Bu öngörü modelleri test verileri ile denenmiş ve böylece öngörü modelinin başarısı görülmüştür. Ayrıca YSA tabanlı öngörü modeli ile işlem süreleri de bir önceki bölümdeki kontrol yapısına göre kısalmıştır.

Bu bölümün amacı akışkan yataklı ekmek mayası kurutma süreci için YSA tabanlı model öngörülü bir denetleyici geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda önce model tabanlı öngörülü kontrol ardından da YSA temel bilgi düzeyinde verilecektir. YSA ile yapılan öngörü çalışmalarının yer aldığı kısımdan sonra benzetim çalışmaları ve sonuçlar ile değerlendirmeler sırasıyla yer almaktadır.

6.1. Model Tabanlı Öngörülü Kontrol (MPC)

Webster öngörü yada prediksyonu “belirgin yada olası sistem çıkışlarının gözlemleri sonucunda, bir sistemin gelecekteki çıkışlarını önceden kestirebilme” şeklinde tanımlamıştır (Bir 1975). Hem iyi bir başarımların göstermeleri hem de anlaşılabilirliklerinin, formüle edilmelerinin ve ayarlanmalarının kolay olmasından dolayı, gelecekteki sistem çıkışının öngörülmesine dayalı denetim yöntemleri 1970’lerin sonundan itibaren büyük ilgi görmüştür (Demircioğlu ve diğ., 1991). İlk yöntemler dürtü yada basamak tepkisi modellerine dayanırken sonraki yöntemlerde daha etkili modeller esas alınmıştır. Bu yöntemler genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Belirli bir zaman aralığında sistem çıkışı öngörülür.
- Gelecekteki istenen sistem çıkışının bilindiği varsayımıyla, bu çıkışla öngörülen gelecek çıkışı arasındaki farkı minimum yapacak şekilde bir gelecek giriş dizisi seçilir.
- Seçilen giriş dizisinin ilki sisteme uygulanır ve bu adımlar bir sonraki örnekleme anında tekrarlanır.

MPC özel bir kontrol şekli değildir; fakat kontrol metodlarının birçok alanından daha fazla alanda belirli genel bir fikir etrafında geliştirilmiştir. Bu tasarım yöntemleri uygulamalı olarak aynı yapıya sahip doğrusal denetleyicilere yol gösterir ve yeterli derecede serbestlik sunar. Çeşitli MPC algoritmaları, maliyet fonksiyonu, gürültü ve sürecin gösterilmesinde kullanılan modele göre aralarında küçük farklılıklar gösterirler. Şu anda başarıyla kullanılan birçok MPC denetimi vardır. Yalnızca süreç endüstrisinde (Camacho 1989) değil, aynı zamanda robot manipülatörlerinden (Temurtas 2003), klinik anesteziye kadar birçok farklı alanlarda uygulamalarına rastlanmaktadır.

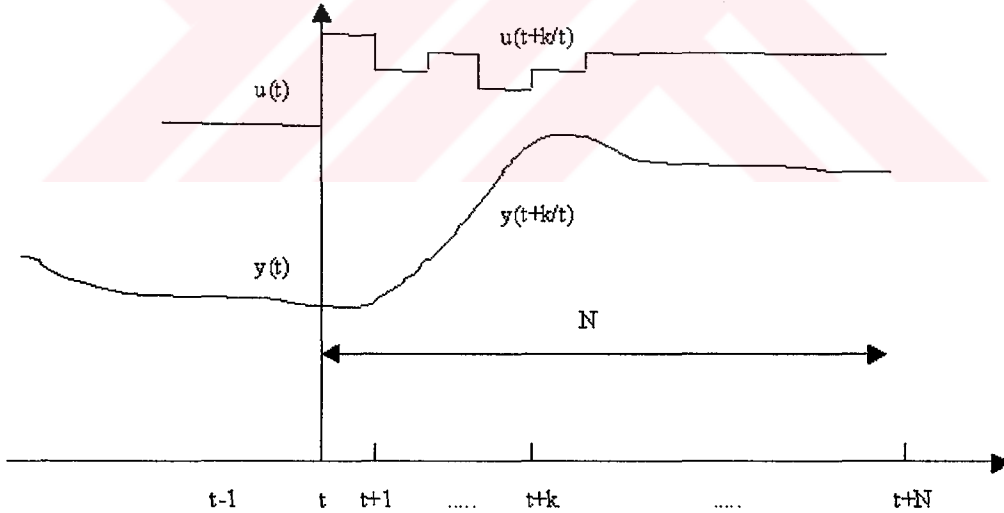
6.1.1. MPC stratejisi

Şekil 6.1’de model öngörülü kontrole ait MPC stratejisi gösterilmiştir. MPC stratejisi kısaca şöyledir:

1. N ufku ile tanımlı gelecek çıkışlar (öngörülü ufuk diye adlandırılır) süreç modeli kullanılarak her t anında önceden bulunur. Bu öngörülü çıkışlar $k=1, \dots, N$ için

$y(t+k/t)$, t 'den hemen önceki bilinen değerlere, hesaplanmış ve sisteme gönderilmiş olan $u(t+k/t)$, $k=0.....N-1$ gelecek kontrol sinyallerine bağlıdır.

2. Gelecek kontrol sinyali, süreci referans yörüngeye $y_r(t+k)$ mümkün olduğunca yakın tutmak için kesin bir ölçütün optimizasyonu ile hesaplanır. Bu ölçüt genellikle öngörülü referans yörünge ve öngörülü çıkış sinyali arasındaki hataların karesel bir fonksiyonu şeklindedir. Kontrolün amacı pek çok durumda nesnel fonksiyonda yer alır. Model doğrusal ise ve sınırlama yoksa ve ölçüt karesel hatadan oluşursa, kesin bir çözüm elde edilir. Bu durumun aksinde bir tekrarlanmış fonksiyon yöntemi kullanılmalıdır.
3. Kontrol sinyali $u(t/t)$, hesaplanan gelecek kontrol sinyalleri alınmadığı halde, sürece gönderilir; çünkü gelecek örnekleme anında $y(t+1)$ zaten bilinmektedir ve 1.adım bu yeni değerle tekrarlanır ve tüm diziler yenilenerek alınır. Böylece $u(t+1/t+1)$ kayan ufuk stratejisi kullanılarak hesaplanabilir (prensipte mevcut yeni bilgiden dolayı $u(t+1/t)$ 'den farklı olacaktır) (Maciejowski 2002).

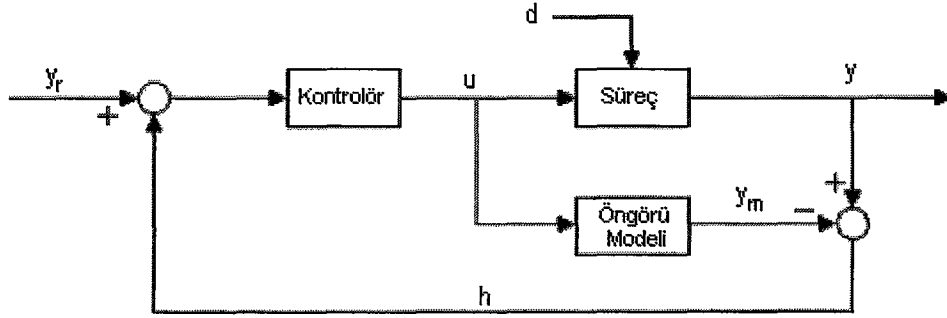


Şekil 6.1. MPC stratejisi.

6.1.2. MPC elemanları

Tüm MPC algoritmalarının sahip olduğu genel elemanlar vardır. Bu elemanlar: öngörü modeli, nesnel fonksiyon ve kontrol kuralını elde etmektir. Genel bir MPC yapısı Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Burada y_r referans yörüngeyi, y_m model çıkışını, u

kontrol işaretini, y süreç çıkışını, h model çıkışı ile süreç çıkışı arasındaki hatayı ve d ise süreçteki gürültüyü temsil etmektedir.



Şekil 6.2. Genel bir MPC yapısı.

6.1.2.1. Öngörü modeli (Predictive Model)

Öngörü modeli MPC'nin temel taşıdır. Bu yüzden eksiksiz bir dizayna sahip, süreç dinamiklerini tam olarak yakalayabilen en iyi olası modelin kullanılması zorunludur. Süreç modeli gelecek durumlarda $y(t+k/t)$ öngörülen çıkışları hesaplamak için kullanılır. MPC'de ölçülebilen girişler ve çıkışlar arasındaki ilişkiyi belirtmek için çeşitli modeller mevcuttur. Bir gürültü modeli, ölçülemeyen girişlerin etkisini içeren süreç modelininin davranışlarını tanımlayabilmek için kullanılır. Model iki kısma ayrılabilir: asıl süreç modeli ve gürültü modeli. Her iki kısım da öngörülmeye ihtiyaç duyar. Doğrusal süreçlerin modellenmesi en genel haliyle birkaç sınıfa ayrılabilir: dürtü yanıtı, basamak cevabı, transfer fonksiyonu ve durum uzayı (Maciejowski 2002). Bir sistemin dürtü (impuls) yanıtı aynı zamanda ağırlıklı dizi yada konvolüsyon modeli olarak da bilinir. Bu model, MAC'de (Model Algorithmic Control), özel bir durum olarak da GPC (Generalized Predictive Control) (Clarke ve diğ. 1987,1989) ve EPSAC'da (Extended Prediction Self-Adaptive Control) görülebilir. Dürtü yanıtı aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(t-i) \quad (6.1)$$

Burada h_i örneklenmiş çıkıştır. Bu toplam kısaltılır ve yalnızca N değerleri dikkate alınır,

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) = H(z^{-1})u(t) \quad (6.2)$$

$$H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-N} \quad (6.3)$$

z^{-1} burada gecikdirme operatörüdür. Bu metodun bir dezavantajı, genellikle N değerinin yüksek bir değer olması gibi gerektirir. Öngörü şu şekilde verilebilir:

$$y(t+k/t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+k-i/t) = H(z^{-1})u(t+k/t) \quad (6.4)$$

Bu yöntem endüstriyel uygulamalarda kabul edilebilir bir yöntemdir Çünkü çok hassastır ve kesin olarak belirlenmiş bir çıkış üzerinde saptanan algılamaların etkisini yansıtır.

Basamak cevabı yöntemi DMC (Dynamic Matrix Control) ve onun değişimleriyle kullanılır. Girişin bir basamak sinyali olmasının dışında dürtü (impulse) yanıtıyla benzerdir. Kararlı sistemler için kısaltılmış cevap,

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1}).(1-z^{-1}).u(t) \quad (6.5)$$

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (6.6)$$

g_i , basamak girişleri için örneklenmiş çıkış değerleridir ve öngörü ifadesi denklem 6.7'deki gibi elde edilebilir:

$$y(t+k/t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t+k-i/t) \quad (6.7)$$

Transfer fonksiyonu GPC (Generalized Predictive Control), UPC (Unified Predictive Control), EPSAC (Extended Prediction Self-Adaptive Control), EHAC (Extended Horizon Adaptive Control), MUSMAC (Multi-Step Multivariable Adaptive Control), MURHAC (Multipredictor Receding Horizon Adaptive Control) tarafından kullanılır. $G=B/A$ transfer fonksiyonu ifadesi kullanılır (Maciejowski 2002). Transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$y(t) = \frac{B}{A}u(t) \quad (6.8)$$

Öngörü modeli ise denklem 6.9'daki gibidir:

$$y(t + k/t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t + k/t) \quad (6.9)$$

Bu gösterim aynı zamanda kararsız süreçler içinde geçerlidir ve sürecin bir ön bilgisi temel alınmasına rağmen, özellikle A ve B polinomlarının katsayıları gibi birkaç parametreye ihtiyaç duyulmasından dolayı avantajlı bir öngeri modelidir. Çok değişkenli süreçler için ise durum uzayı yöntemi ile öngörü modeli elde edilebilir.

Doğrusal olmayan süreçleri modellemek oldukça karmaşık ve zor bir iştir. Günümüzde doğrusal olmayan süreçlerin matematiksel modellemesinde en çok kullanılan yöntem olarak karşımıza yapay sinir ağları çıkmaktadır (Bkz. 6.2).

6.1.2.2. Nesnel fonksiyon

Çeşitli MPC algoritmaları kontrol kuralını geçerli kılmak için farklı maliyet fonksiyonları kullanır. Genel amaç, ilgili ufuktaki gelecek çıkışın (y) bir referans sinyalinin (w) takip etmesidir ve aynı zamanda kontrol etkisi (Δu) söndürme işleminde gereklidir. Nesnel fonksiyonunu genel olarak aşağıdaki eşitlik ile tanımlamak mümkündür:

$$J(N_1, N_2, N_U) = \sum_{i=N_1}^{N_2} Q(i)[y(t+i/t) - y_r(t+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_U} R(i)[\Delta u(t+i-1)]^2 \quad (6.10)$$

Burada N_1 , N_2 sırasıyla minimum ve maksimum öngörü ufuklarını, N_U öngörü ufukunu, Q ve R nesnel fonksiyona ait ağırlık değerleridir. Tüm süreçlerin pratikte belirli sınırlamaları vardır. Tahrik edici cihazlar belirlenmiş sönümlü oran gibi sınırlı bir hareket alanına sahiptir ve cevap oranıyla açık yada kapalı durumlarla sınırlıdır. Yardımcı sebepler, güvenlik yada çevresel bir şeyler yada kendilerini ölçen sensörler, tanklardaki seviyeler, borulardaki akışkanlar yada maksimum sıcaklıklar ve basınçlar gibi süreç değişkenleri içinde sınırlamalara sebep olur; daha da ötesi, çalışma koşulları normalde ekonomik şartlarla belirli kısıtlamalar ile tanımlanır. Yani

kontrol sistemi sınırlara yakın çalışacaktır. Çoğu öngörülü algoritmalar gerçekte belirli kısıtlamalar içerir ve bu nedenle endüstride çok başarılıdır (Camacho ve diğ. 1989). Nesnel fonksiyona ait sınırlamalar aşağıdaki denklemler ile verilmiştir:

$$N_U \leq N_{1,2} \quad (6.11)$$

$$|\Delta u(t)| \leq \Delta u_{\max} \quad (6.12)$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} \quad (6.13)$$

$$y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max} \quad (6.14)$$

Sınırlama olmaksızın nesnel fonksiyon çözüme ulaşamayabilir. Nesnel fonksiyona bu sınırlamalar eklendiğinde ise çözüme daha rahat ve kararlı bir şekilde ulaşmak mümkündür.

6.1.2.3. Kontrol kuralını elde etmek

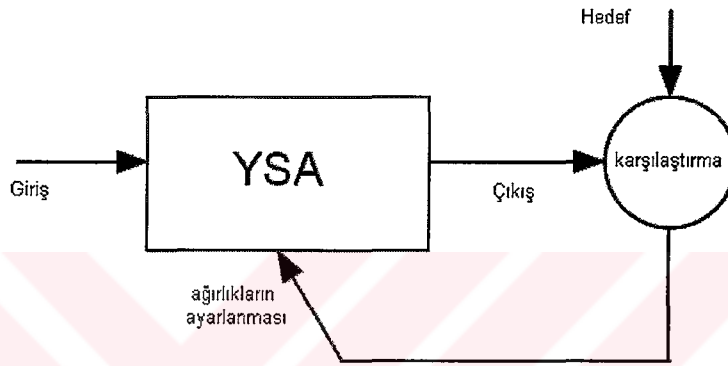
$u(t+k/t)$ değerlerini elde edebilmek için J nesnel fonksiyonunu minimize etmek gereklidir. Bunu yapmak için öngörülü model çıkışları, referans işareti ve kontrol sinyalinin geçmiş değerleri nesnel fonksiyonda yerine konular ve minimizasyon probleminin çözümünden gelecek kontrol girişleri hesaplanır. Analitik bir çözüm eğer model doğrusal ise ve sınırlama yoksa elde edilebilir. Her tür metotta çözümü elde etmek kolay değildir. Çünkü bir değer yüksek olması gibi $N_2 - N_1 + 1$ bağımsız değişkenleri var olacaktır. Bu serbestlik derecesini azaltmak için belirli bir yapı kontrol kuralında önerilebilir. Ayrıca, kontrol kuralının yapılaştırılması sistemin genel davranışında ve dayanıklılığında da bir gelişim oluşturur. Temel olarak kullanılan değişkenlerin serbestçe değişimine izin verilmesinden dolayı bu değişkenler arzu edilmeyen kontrol işaretlerine yol açar. Bu kontrol kanununun yapısı öngörü ufuk genel kavramının kullanılmasında meydana çıkar. Belirli bir aralıktan sonra $N_U < N_2$ önerilen kontrol sinyalleri içinde değişim yoktur:

$$\Delta u(t+i-1) = 0 \Leftrightarrow i > N_U \quad (6.15)$$

Bu kısımda akışkan yataklı kurutma sürecinin kontrolünde kullanılan MPC yapısı genel olarak anlatılmıştır. Bir sonraki bölümde ise doğrusal olmayan süreçlerin öngörü modellemesinde kullanılan yapay sinir ağları genel hatları ile verilecektir.

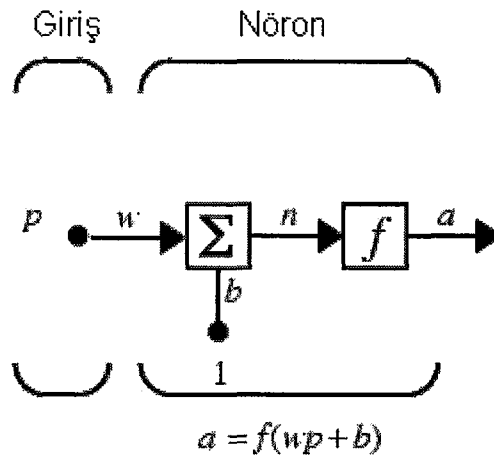
6.2. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları birbirine paralel bağlı çalışan basit elemanlardan (nöron) oluşur. Bu elemanlar biyolojik sinir sistemlerinden esinlenerek ortaya çıkmıştır. Bir YSA'nın eğitilmesi elemanları arasındaki bağlantıların (ağırlıkların) değerleri ayarlanarak sağlanabilir (Haykin 1999). Bu eğitimde YSA'nın çıkışı ile hedef çıkışı karşılaştırılarak YSA'nın elemanlarının ağırlıkları hedef çıkışa ulaşmaya kadar adım adım ayarlanır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. YSA'nın eğitilmesi.

Bir YSA nöronu temel olarak bir toplayıcı ve geçiş (aktivasyon) fonksiyonundan oluşur. Çalışma mantığı ise şu şekildedir: giriş (p) belirli bir ağırlıkla (w) çarpılarak, bias (b) adı verilen özel girişlerle toplanır ve elde edilen toplam işareti de (n) geçiş fonksiyonuna (f) girerek nöron çıkışı (a) elde edilir (Şekil 6.4). Nöron yapısındaki ağırlık (w) ve bias (b) ayarlanabilir parametrelerdir. Geçiş fonksiyonu, nöron çıkışını izin verilen bir aralıkta tutar (Karakuzu 2003).



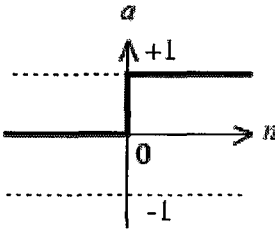
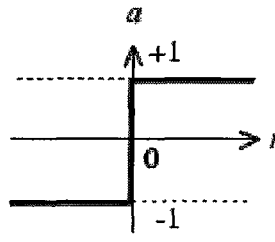
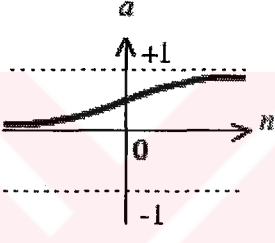
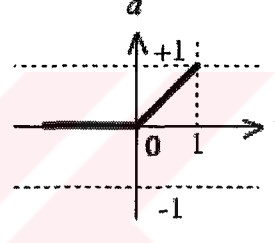
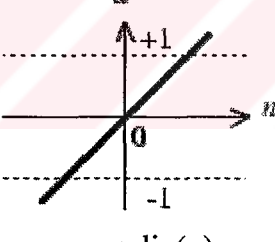
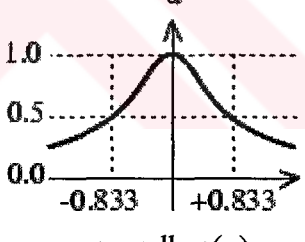
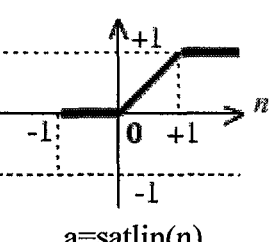
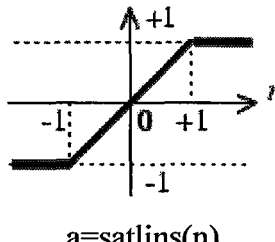
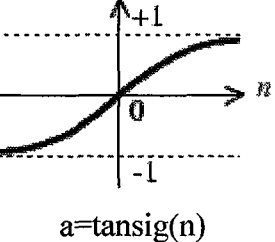
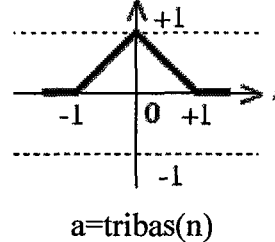
Şekil 6.4. Basit bir nöron yapısı.

Basit bir nöronun çıkış ifadesi denklem 6.16'daki gibi yazılabilir:

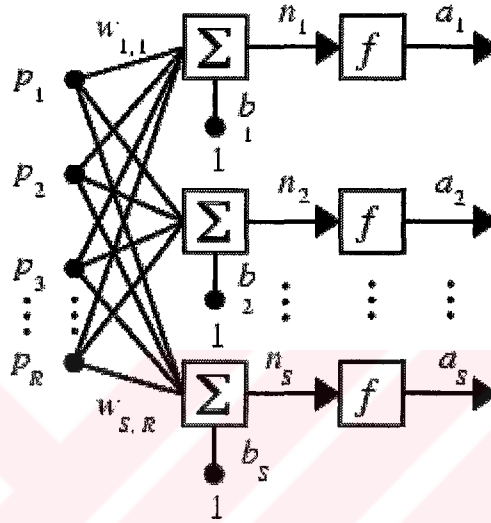
$$a = f(wp + b) \quad (6.16)$$

Tablo 6.1'de YSA'da kullanılan temel geçiş fonksiyonları verilmiştir.

Tablo 6.1. YSA'da kullanılan temel geçiş fonksiyonları (Matlab® 2002).

Hard-Limit Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{hardlim}(n)$</p>	Simetrik Hard-Limit Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{hardlims}(n)$</p>
Log-Sigmoid Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{logsig}(n)$</p>	Pozitif Doğrusal Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{poslin}(n)$</p>
Doğrusal Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{purelin}(n)$</p>	Radyal Temelli Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{radbas}(n)$</p>
Satlin Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{satlin}(n)$</p>	Simetrik Satlin Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{satlins}(n)$</p>
Tan-Sigmoid Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{tansig}(n)$</p>	Üçgen Geçiş Fonksiyonu	 <p>$a = \text{tribas}(n)$</p>

YSA her birinin değişik sayıda nöronların sıralandığı giriş, çıkış ve gizli katmanlardan oluşur (Şekil 6.5). Bir YSA’da bir veya birden fazla sayıda gizli katman bulunabilir. Genel olarak çözülecek problemin karmaşıklığına, giriş ve çıkış sayısına bağlı olarak katman ve katmanlar içindeki nöron sayıları belirlenir. Fakat ne nöron sayısı ne de katman sayısı hakkında genel bir kural yada formül literatürlerde yer almamaktadır (Chu ve diğ. 2003).



Şekil 6.5. Tek katmanlı bir YSA’nın genel gösterimi.

Şekil 6.5’de R giriş sayısını, S ise girişteki nöron sayısını göstermekte olup, giriş katmanına ait $S \times R$ boyutlu ağırlık matrisi (W) ve $S \times 1$ boyutlu bias vektörü (b) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \cdots & w_{S,R} \end{bmatrix} \text{ ve } b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_S \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Günümüze kadar gelmiş olan çok çeşitli YSA yapıları mevcuttur: Bu yapıları algılayıcılar (perceptrons) (Rosenblatt 1961, Hagan ve diğ. 1996), ileri beslemeli sinir ağları, radyal tabanlı sinir ağları (Chen ve diğ. 1991, Haykin 1999) ve dinamik sinir ağları (Elman 1990, Konar ve diğ. 1997, Becerikli 1998, Haykin 1999) şeklinde sıralamak mümkündür.

Bir YSA içerisindeki ayarlanabilir parametreler olan bağlantı ağırlıklarının ve bias değerlerinin belirlendiği sürece YSA'nın eğitim yada öğrenme adı verilir. Öğrenme YSA'da iki farklı şekilde yapılabilir: eğitici ve eğitici olmayan öğrenme. Eğitici öğrenmede, sinir ağına giriş değerleri ve çıkış hedef değerleri verilir ve hedef çıkış ile YSA çıkışı arasındaki hata değerine göre geriye yayılım (backpropagation) yöntemi (GY) ile YSA'nın ağırlıkları ve bias değerleri değiştirilir. Eğitici olmayan öğrenmede ise, sinir ağına yalnızca giriş değerleri verilir, parametre ayarları bu girişlere ve YSA çıkışına dayalı olarak belirlenir (Karakuzu 2003). Literatürde YSA'da öğrenme algoritmaları olarak birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları BFGS Quasi-Newton (Rumelhart ve diğ. 1996, Haykin 1999), Gradyen azalımlı (Hagan ve diğ. 1996, Haykin 1999) Levenberg- Marquardt (Levenberg 1944, Marquardt 1963, Gill ve diğ. 1981), Conjugate Gradyen (Haykin 1999) olarak sayılabilir.

6.3. YSA Tabanlı Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı

Biyolojik ürünlerin akışkan yataklı kurutma süreçlerinde sıcaklık, nem kesri ve özellikle ürün aktivitesi doğrusal olarak değişmez. Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi YSA yöntemidir. Bu nedenle bu çalışmada MPC'nin önemli yapı taşlarından biri olan öngörü modeli için YSA düşünülmüş ve ürün aktivitesi ile nem kesri için öngörü modelleri tasarlanmıştır. Bu YSA modelleri klasik ileri beslemeli sinir ağı (feedforward neural network: FFN) ve dinamik yinelenen sinir ağı (recurrent neural network:RNN) olarak iki çeşittir. Öngörü modelinden sonra kurutma süreci için maliyet fonksiyonu oluşturulmuş ve çözümünün karmaşıklığı nedeniyle bir önceki bölümde olduğu gibi kontrol probleminin çözümünde genetik algoritmalar (GA) kullanılmıştır.

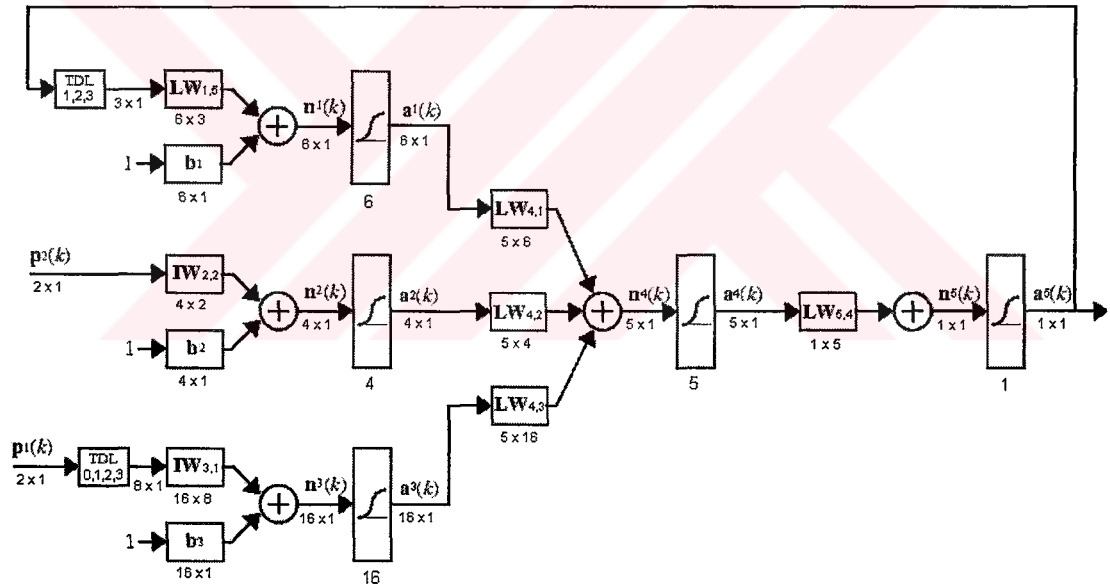
6.3.1. YSA ile nem kesri ve ürün aktivitesinin öngörü modeli

Bu çalışmada YSA modeli olarak FFN ve RNN kullanılmıştır. Tablo 6.2'de nem kesri ve ürün aktivitesi için tasarlanan FFN modelleri ile ilgili parametreler verilmiştir. Tablodaki T_a havanın sıcaklığını, Y_a havanın nem kesrini, X_o biyolojik ürünün ortalama nem kesrini ve N_y ise öngörü ufkunu göstermektedir.

Tablo 6.2. ¹Nem kesri ve ²ürün aktivitesi öngörü modelleri için YSA parametreleri.

YSA parametreleri	FFN ¹			FFN ²		
katman sayısı	3			3		
katmanlardaki nöron sayıları	12	5	1	15	5	1
geçiş fonksiyonu	logsig			logsig		
girişler	$T_a(t-i), Y_a(t-i), X_o(t-i)$ $i = 0,1,2,3$			$T_a(t-i), Y_a(t-i), X_o(t-i),$ $Q(t-i), i = 0,1,2,3,4$		
çıkışlar	$X_o(t+N_y)$			$Q(t+N_y)$		

FFN ve RNN eğitimlerinde kullanılan giriş ve çıkış verileri normalize edilerek YSA'ya uygulanmıştır. Şekil 6.6'da ürün aktivitesinin öngörü modeli için tasarlanan RNN modeli gösterilmiştir. RNN modelinde gösterilen TDL zaman gecikmesini (time delay), IW giriş katmanı ağırlık matrisini (input weight), LW gizli katmanların ağırlık matrisini (layer weight), p giriş vektörünü, n geçiş fonksiyonu giriş vektörünü, a ise katman çıkış vektörünü temsil etmektedir.



Şekil 6.6. Ürün aktivitesinin öngörülmesi için tasarlanan RNN model yapısı.

Kullanılan RNN öngörü modelinin girişleri denklem 6.18'de verilmiştir:

$$p_1(k) = \begin{bmatrix} T_a(k) \\ Y_a(k) \end{bmatrix} \text{ ve } p_2(k) = \begin{bmatrix} X(k) \\ Q(k) \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

RNN modeline dikkat edilecek olunursa, 3.katman girişinde 3.dereceden bir TDL kullanılmıştır. Bu nedenle 3. katman girişi $p_1(k)$, $p_1(k-1)$, $p_1(k-2)$ ve $p_1(k-3)$ elemanlarından oluşur.

Tüm katmanların çıkış ifadeleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir:

$$a^1(k) = \log \text{sig} \left(LW_{1,5} \begin{bmatrix} a^5(k-1) \\ a^5(k-2) \\ a^5(k-3) \end{bmatrix} + b^1 \right) \quad (6.19)$$

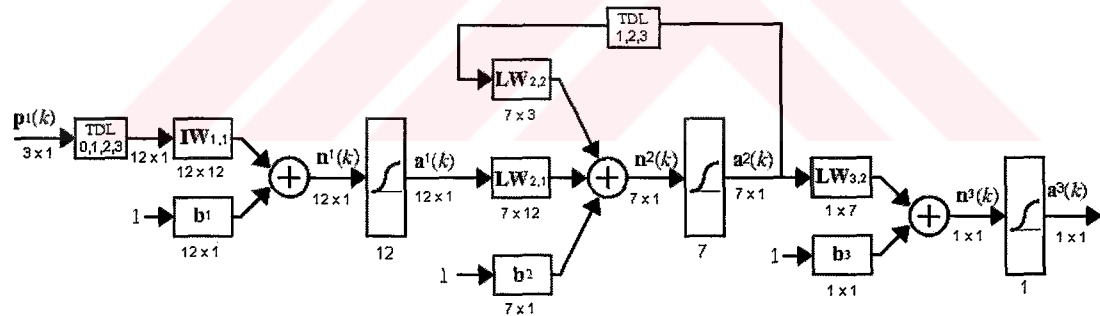
$$a^2(k) = \log \text{sig}(IW_{2,2}p^2(k) + b^2) \quad (6.20)$$

$$a^3(k) = \log \text{sig} \left(IW_{3,1} \begin{bmatrix} p^1(k) \\ p^1(k-1) \\ p^1(k-2) \\ p^1(k-3) \end{bmatrix} + b^3 \right) \quad (6.21)$$

$$a^4(k) = \log \text{sig}(LW_{4,1}a^1(k) + LW_{4,2}a^2(k) + LW_{4,3}a^3(k)) \quad (6.22)$$

$$a^5(k) = \log \text{sig}(LW_{5,4}a^4(k)) \quad (6.23)$$

Nem kesrinin öngörü modeli için tasarlanan RNN modeli Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Nem kesri öngörü modelinde T_a , Y_a ve X giriş vektörü elemanları olarak alınmış, ilk katmanda 3. dereceden bir TDL kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Nem kesrinin öngörülmesi için tasarlanan RNN model yapısı.

RNN modelinin tüm katmanları için çıkış ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

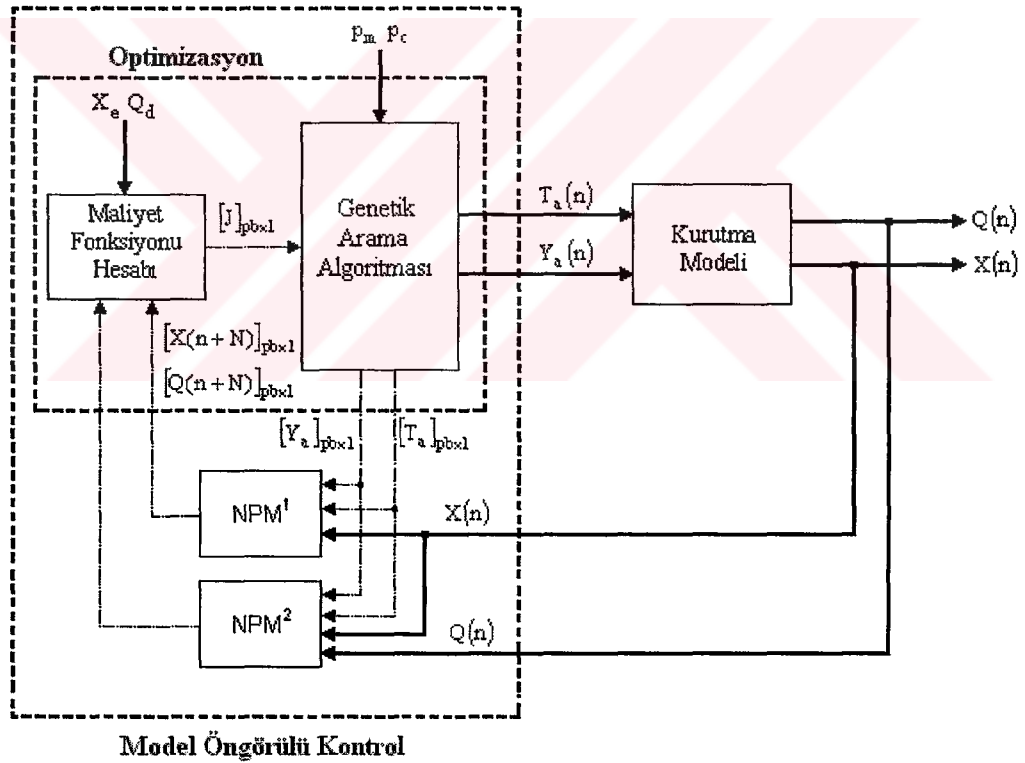
$$a^1(k) = \log \text{sig} \left(IW_{1,1} \begin{bmatrix} p^1(k) \\ p^1(k-1) \\ p^1(k-2) \\ p^1(k-3) \end{bmatrix} + b^1 \right) \quad (6.24)$$

$$a^2(k) = \log \operatorname{sig} \left(LW_{2,1} a^1(k) + LW_{2,2} \begin{bmatrix} a^2(k-1) \\ a^2(k-2) \\ a^2(k-3) \end{bmatrix} + b^2 \right) \quad (6.25)$$

$$a^3(k) = \log \operatorname{sig} (LW_{3,2} a^2(k) + b^3) \quad (6.26)$$

6.3.2. Model öngörülü kontrol yapısı

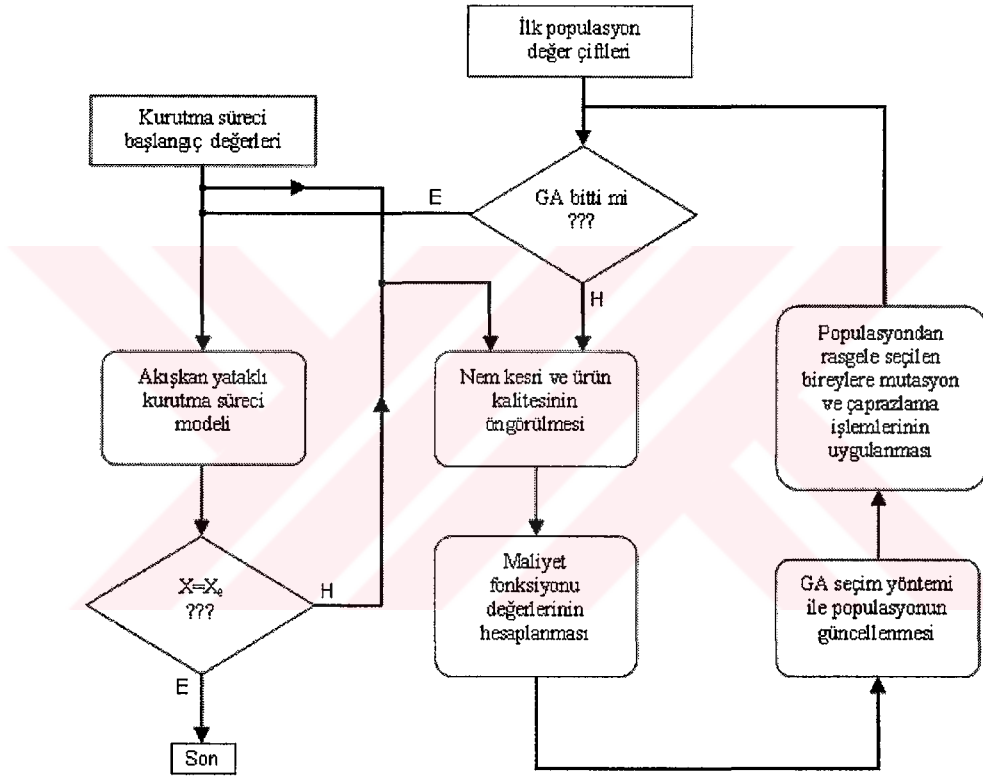
Akışkan yataklı kurutma süreci için tasarlanan YSA tabanlı model öngörülü kontrol blok diyagramı Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Burada genetik algoritma (GA) ile ilgili olarak p_m mutasyon işlemi olasılık değerini, p_c çaprazlama işlemi olasılık değerini, p_b ise popülasyon boyunu göstermektedir. NPM^1 ve NPM^2 sırasıyla nem kesri ve ürün aktivitesi için YSA ile tasarlanan öngörü modelleridir.



Şekil 6.8. YSA tabanlı model öngörülü kontrol yapısı.

Kontrol yapısının çalışması kurutma modelinden herhangi bir t anındaki nem kesri (X) ve ürün aktivitesi (Q) değerlerinin YSA tabanlı öngörü modellerine (NPM^1 ve NPM^2) girmesi ile başlar. Genetik arama algoritması ile belirlenen ilk T_a ve Y_a değer çiftleri için nem kesri ve ürün aktivitesinin N adım sonraki öngörü değerleri bulunur.

Öngörü değerleri maliyet fonksiyonunda yerine konularak, T_a ve Y_a değer çiftleri için ağırlık değerleri (fitness) hesaplanır. GA maliyet fonksiyon değerlerine göre populasyon içerisindeki en iyi bireyi tespit eder. Daha sonra populasyondaki bireyler turnuva yöntemi ile seçilir ve genetik işlemler yardımıyla populasyon güncellenir. Güncellenen T_a ve Y_a değer çiftleri için tekrar nem kesri ve ürün aktivitesinin N adım sonraki öngörü değerleri bulunur. Bu adımlar genetik arama algoritmasının maliyet fonksiyonunun çözümü olan T_a ve Y_a değer çiftlerini bulması ile son bulur. Şekil 6.9'da YSA tabanlı model öngörülü kontrol yapısının akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.9. YSA tabanlı model öngörülü kontrol akış diyagramı.

Model öngörülü kontrolde kullanılan maliyet fonksiyonu aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir:

$$J = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N p_{i,j} (r_{i,t+j} - y_{i,t+j})^2 + \sum_{k=1}^2 q_k \Delta u_{k,t}^2 \quad (6.27)$$

Burada p ve q optimizasyon ağırlık değerlerini, N öngörü ufkunu, r hedef değerini, y öngörülen çıkış değerlerini, u ise kontrol değişkenlerini göstermektedir. Öngörülen değerler (y) nem kesri (X) ve ürün aktivitesi, kontrol değişkenleri (u) de havanın

sıcaklığı (T_a) ve havanın nem kesri (Y_a) olarak kullanılacağından denklem 6.27 tekrar düzenlenecek olursa denklem 6.28'deki ifade elde edilir:

$$J = q_1 \Delta T_a^2 + q_2 \Delta Y_a^2 + \sum_{i=1}^N p_{1,i} (X_{t+i} - X_c)^2 + p_{2,i} (Q_{t+i} - Q_d)^2 \quad (6.28)$$

Kurutma sürecinin optimizasyon problemi ve sınır koşulları sırasıyla denklem 6.29 ve 6.30'daki şekilde tanımlanmıştır.

$$\min_{T_a, Y_a} J(T_a, Y_a) \quad (6.29)$$

$$293K \leq T_a \leq 393K \text{ ve } 0 \leq Y_a \leq 0.005 \text{ kg su buharı / kg kuru hava} \quad (6.30)$$

6.4. Benzetim Sonuçları ve Değerlendirmeler

Akışkan yataklı kurutma sürecinin YSA tabanlı model öngörülü denetimi için yapılan bilgisayar programları Matlab 6.5 (Matlab® 2000) ile yapılmış olup EK F'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları YSA ile yapılan öngörü çalışmaları ve YSA tabanlı model öngörülü denetim çalışmaları şeklinde iki kısımdan oluşmaktadır.

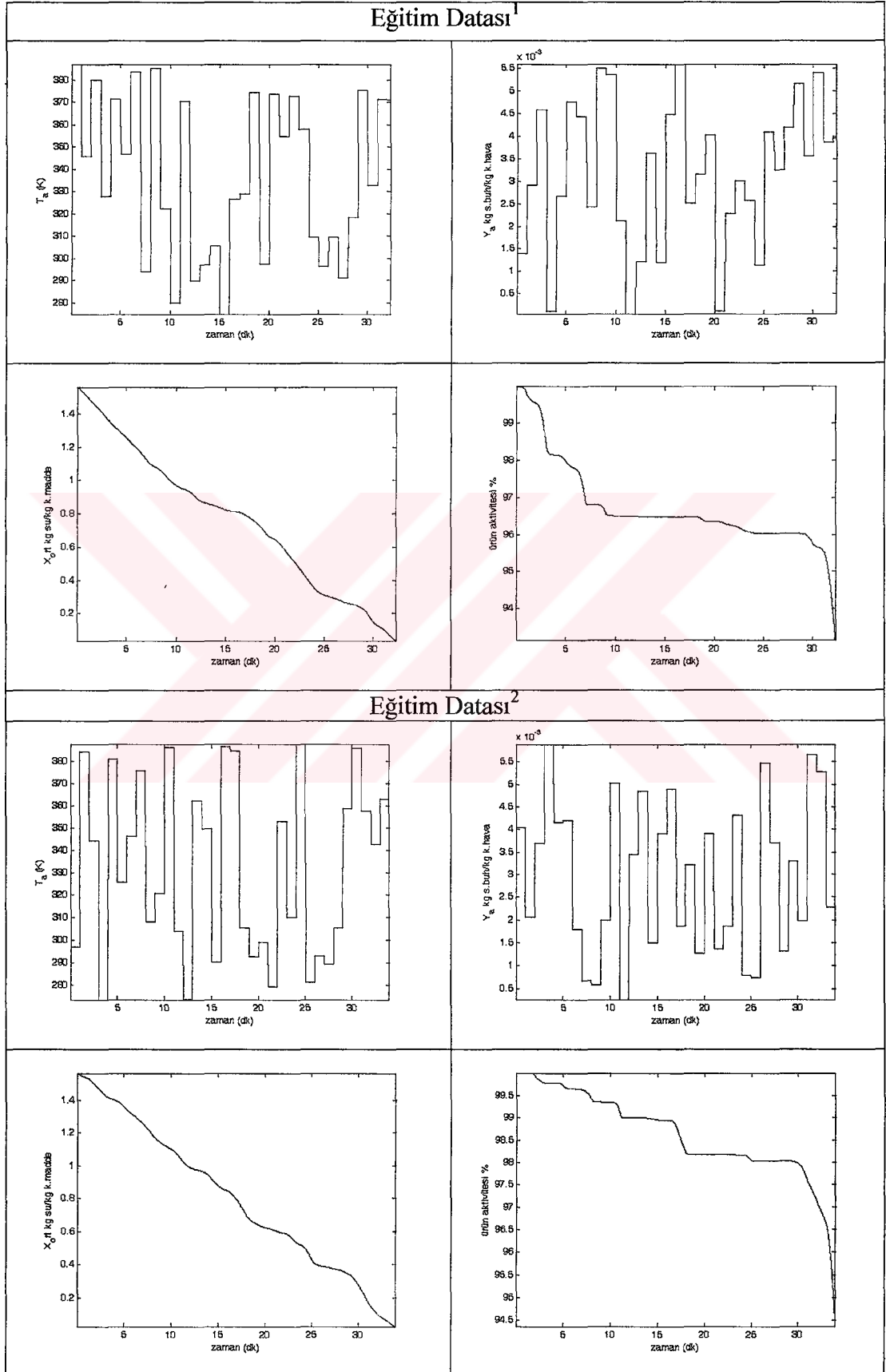
6.4.1. YSA ile yapılan öngörü modeli benzetim sonuçları

YSA ile ürün aktivitesi ve nem kesrinin N adım sonraki öngörü değerinin bulunması hedeflenmiş ve bu amaç doğrultusunda önce FFN ile öngörü modeli yapısı oluşturulmuş ve test edilmiş, daha sonra ise dinamik YSA modeli kullanılarak öngörü modeli geliştirilmiştir.

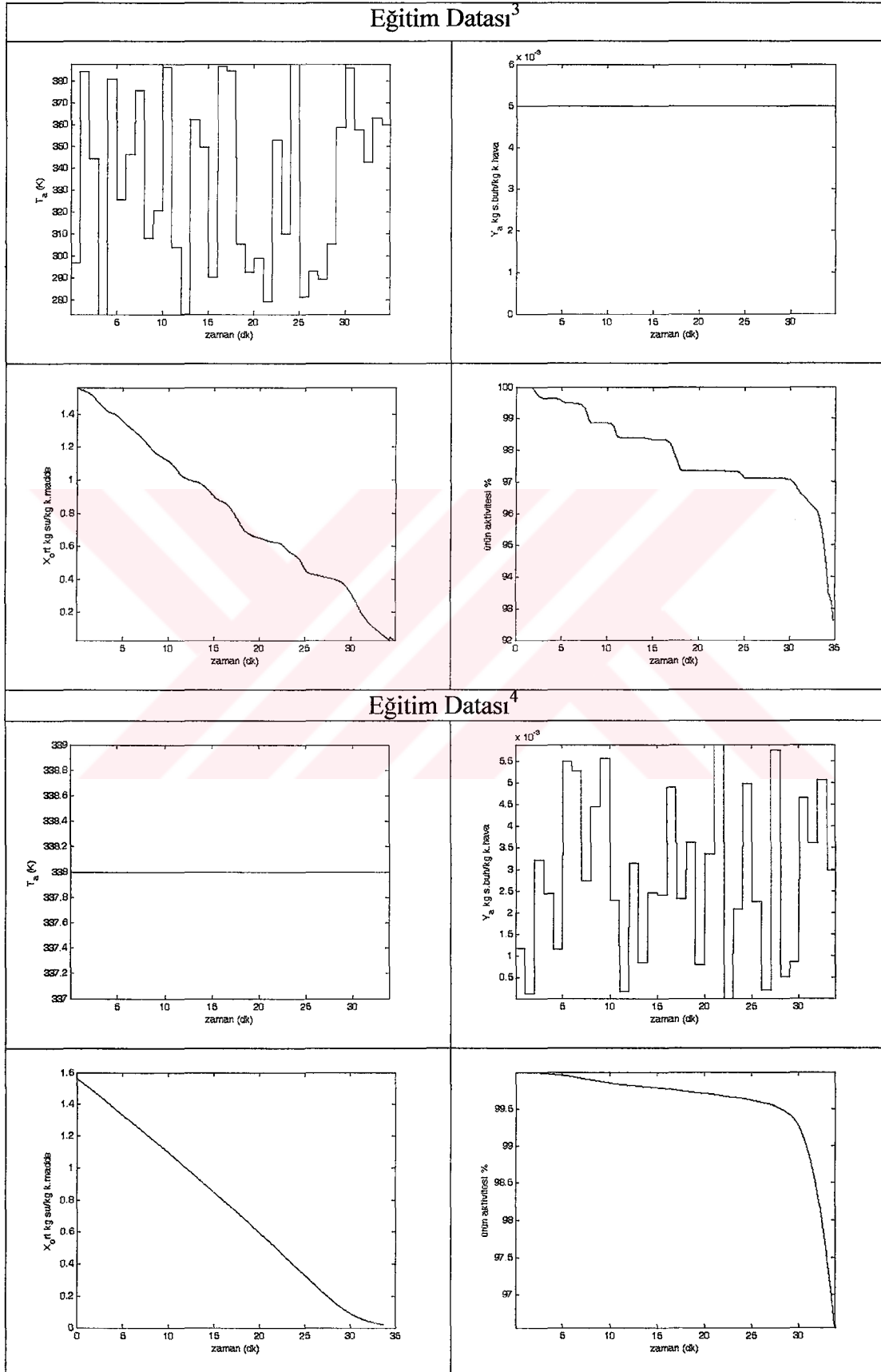
6.4.1.1. FFN tabanlı öngörü modeli sonuçları

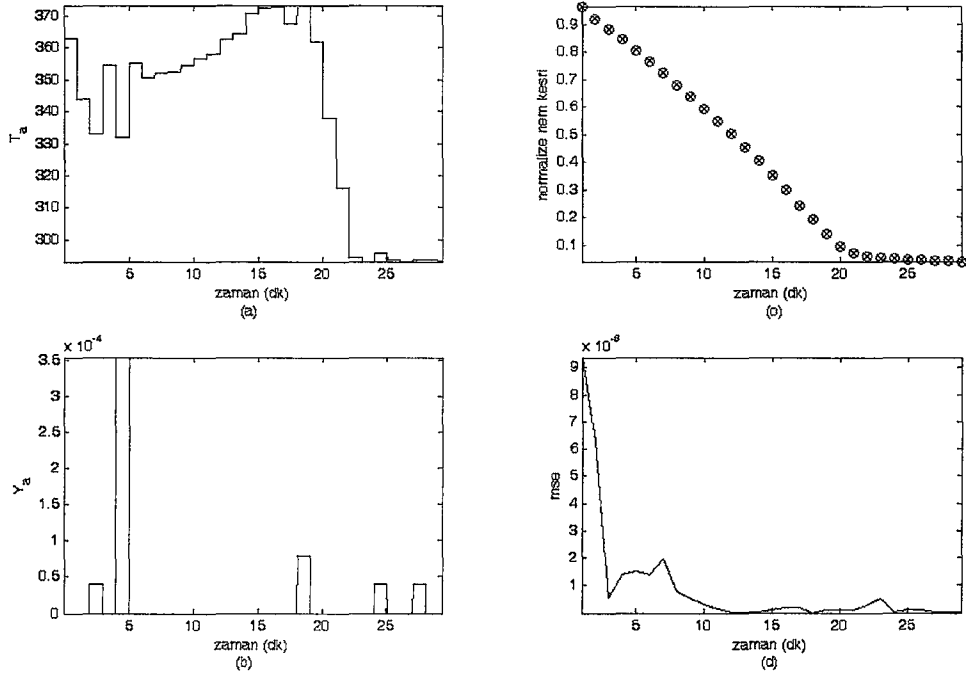
FFN tabanlı öngörü modeli için eğitimde Levenberg- Marquardt yöntemi kullanılmıştır. Bu eğitim yönteminin seçilmesinin sebebi YSA'nın eğitimindeki hızıdır. Yapılan benzetimlerde toplam 10 data seti eğitim için 5 data seti ise test için kullanılmıştır. Tablo 6.3'de eğitim için kullanılan data setlerinden birkaçı gösterilmiştir. Üç test datası için FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test benzetim sonuçları Şekil 6.10, 6.11, 6.12'de ve ürün kalitesi öngörü modelinin test benzetim sonuçları ise Şekil 6.13, 6.14, 6.15'de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. FFN tabanlı nem kesri ve ürün kalitesi öngörü modelleri için kullanılan eğitim datalarından birkaçı.

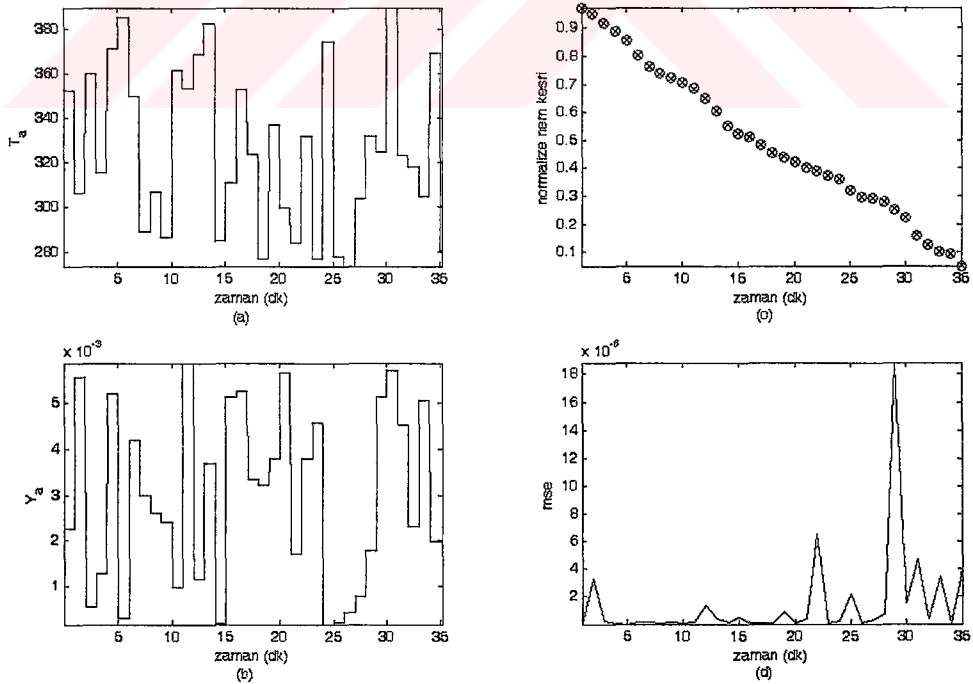


Tablo 6.3.(Devam) FFN tabanlı nem kesri ve ürün kalitesi öngörü modelleri için kullanılan eğitim datarından birkaçı.

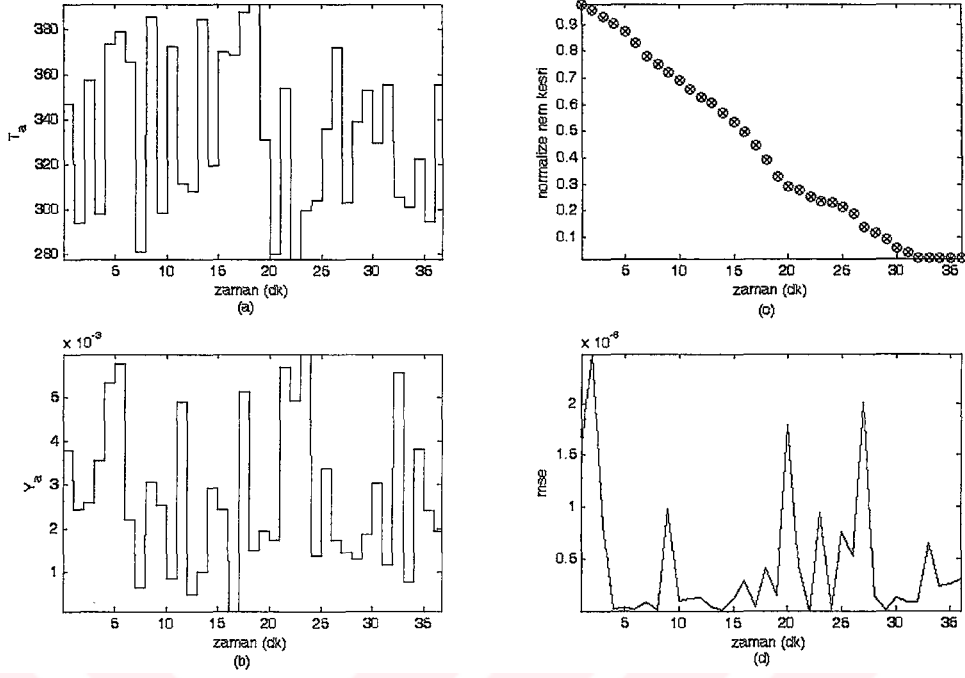




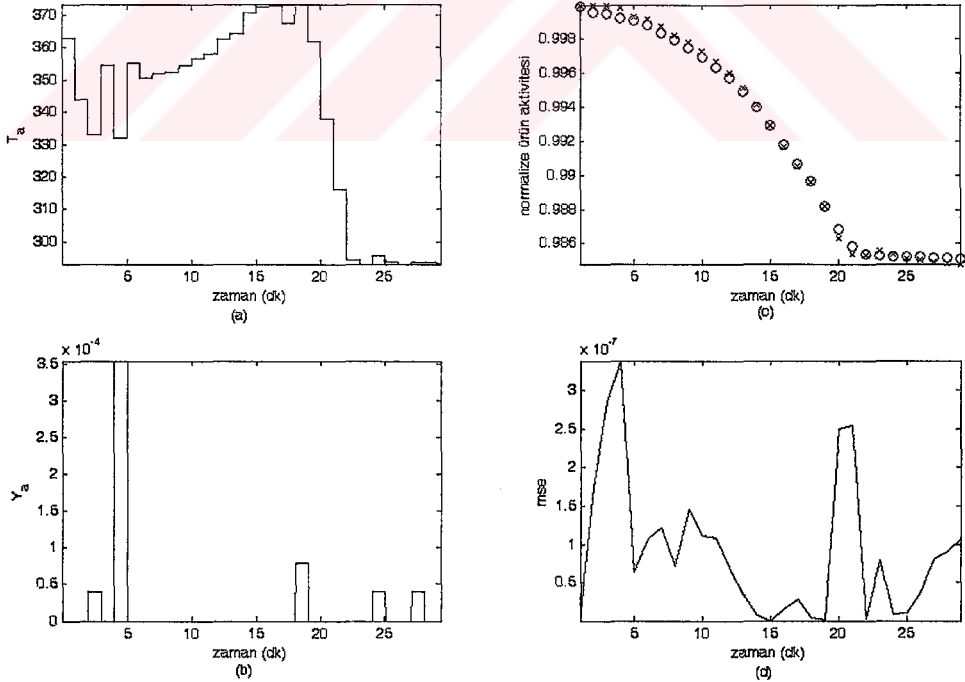
Şekil 6.10. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu¹: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).



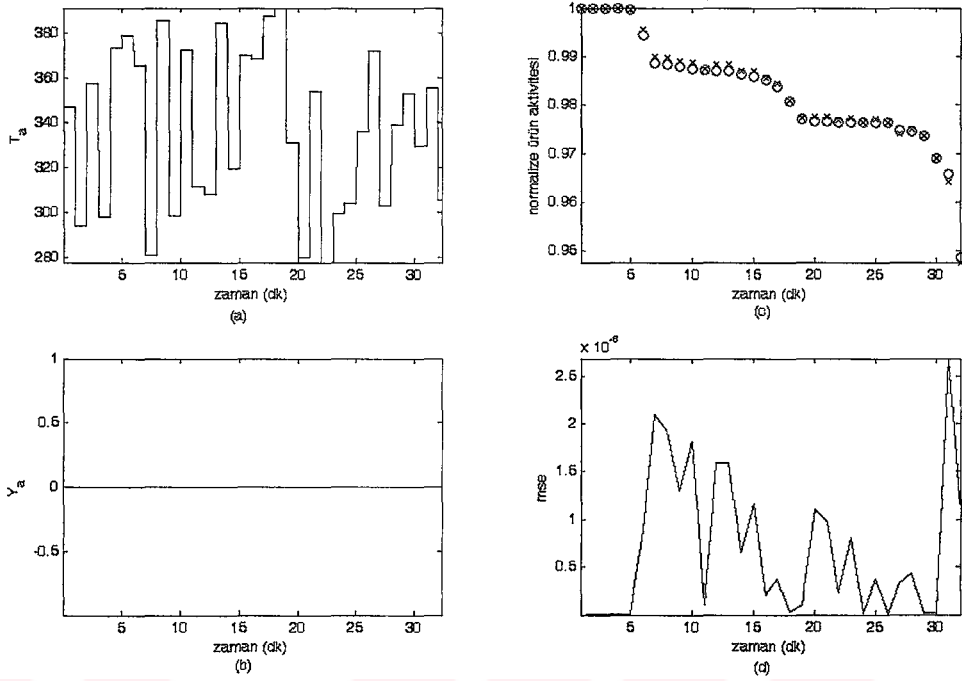
Şekil 6.11. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu²: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).



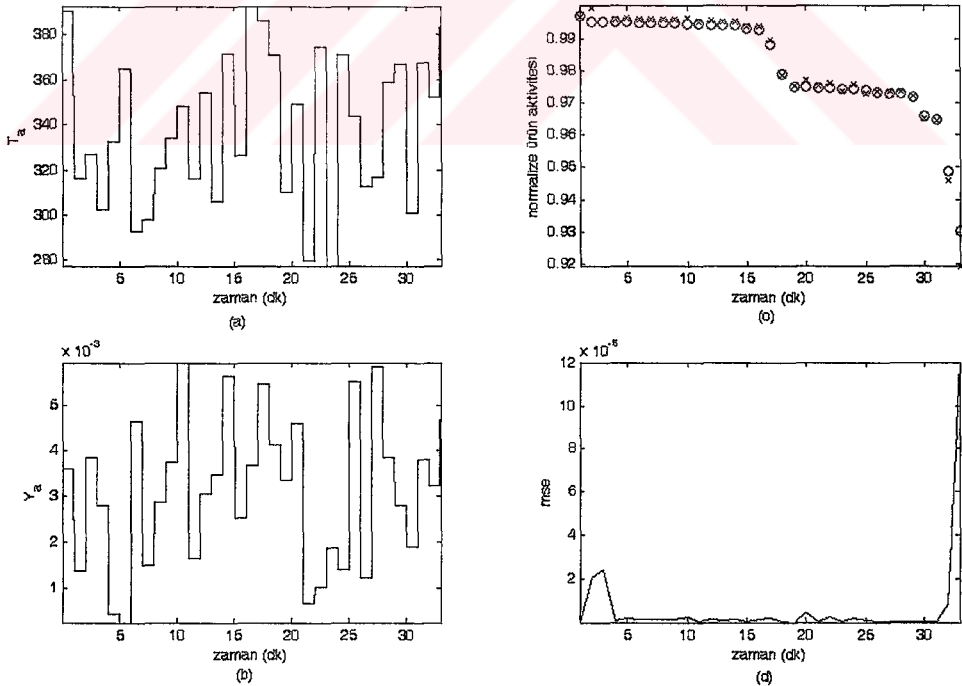
Şekil 6.12. FFN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu³: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize nem kesri (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).



Şekil 6.13. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu¹: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).



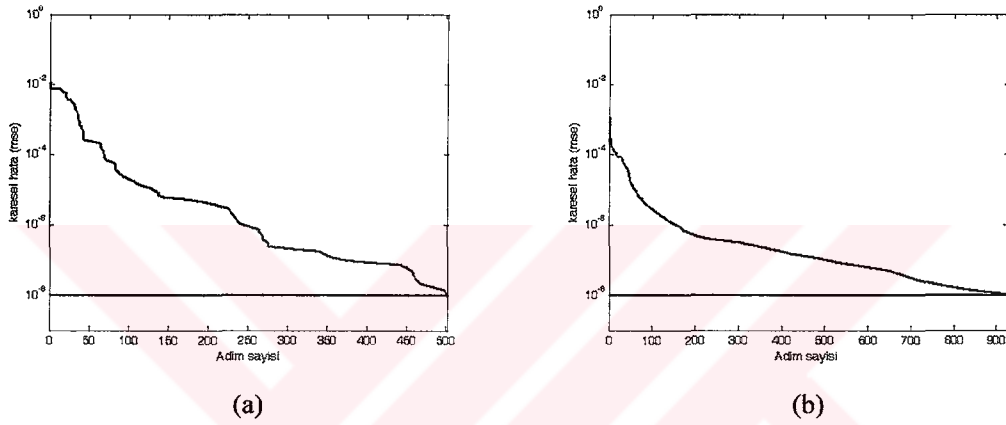
Şekil 6.14. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu²: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).



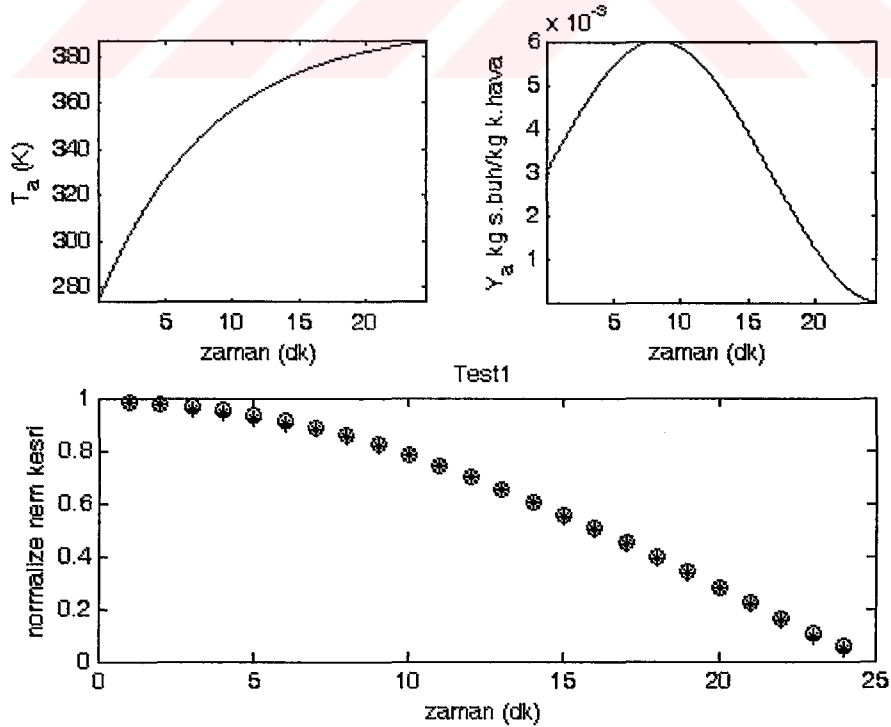
Şekil 6.15. FFN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu³: (a) havanın sıcaklığı (T_a), (b) havanın nem kesri (Y_a), (c) normalize ürün aktivitesi (x:FFN çıkışı, o:test datası), (d) FFN modelinin karesel hatası ($N=1$).

6.4.1.2. Dinamik YSA tabanlı öngörü modeli sonuçları

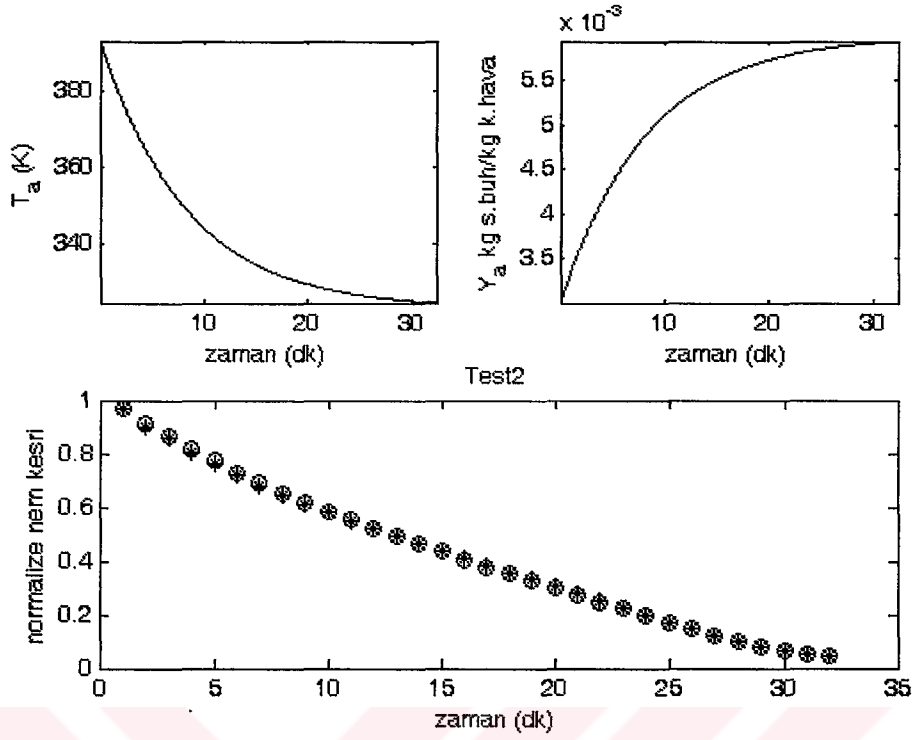
Dinamik YSA kullanımı ile nem kesri ve ürün kalitesinin öngörü modeli biraz daha geliştirilmeye çalışılmıştır. Dinamik YSA modellerinin yapısından dolayı başarımı klasik YSA'a (FFN) göre daha üstündür (Chu ve diğ. 2003, Mjalli 2005). Şekil 6.16'da RNN tabanlı nem kesri ve ürün aktivitesi öngörü modellerinin eğitim sırasındaki karesel hatalarının adım sayısına bağlı grafikleri gösterilmiştir. Nem kesri için yapılan öngörülü model test benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 ve 6.21'de gösterilmiştir.



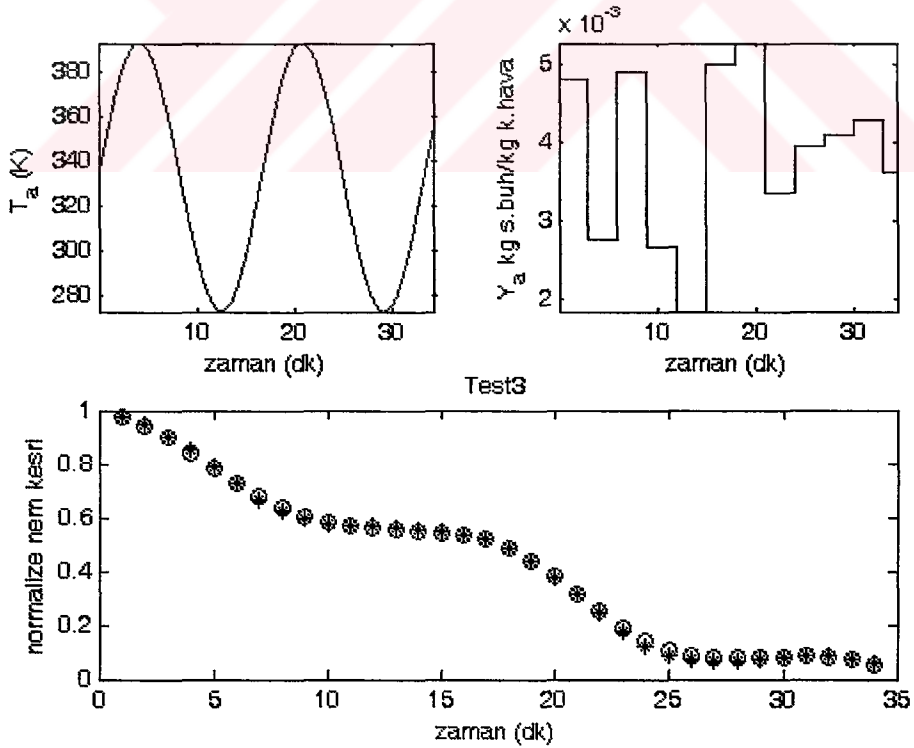
Şekil 6.16. RNN tabanlı nem kesri (a) ve ürün aktivitesi (b) öngörü modellerinin eğitim sırasındaki karesel hatalarının adım sayısına bağlı değişimi.



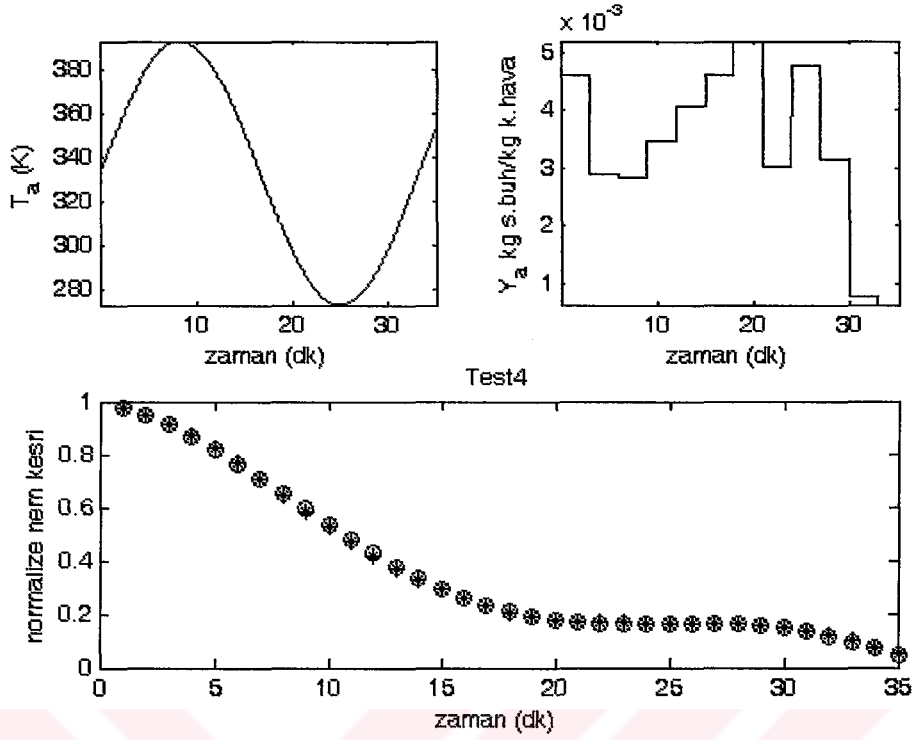
Şekil 6.17. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu¹ (o: test datası, *: öngörü modeli çıkışı).



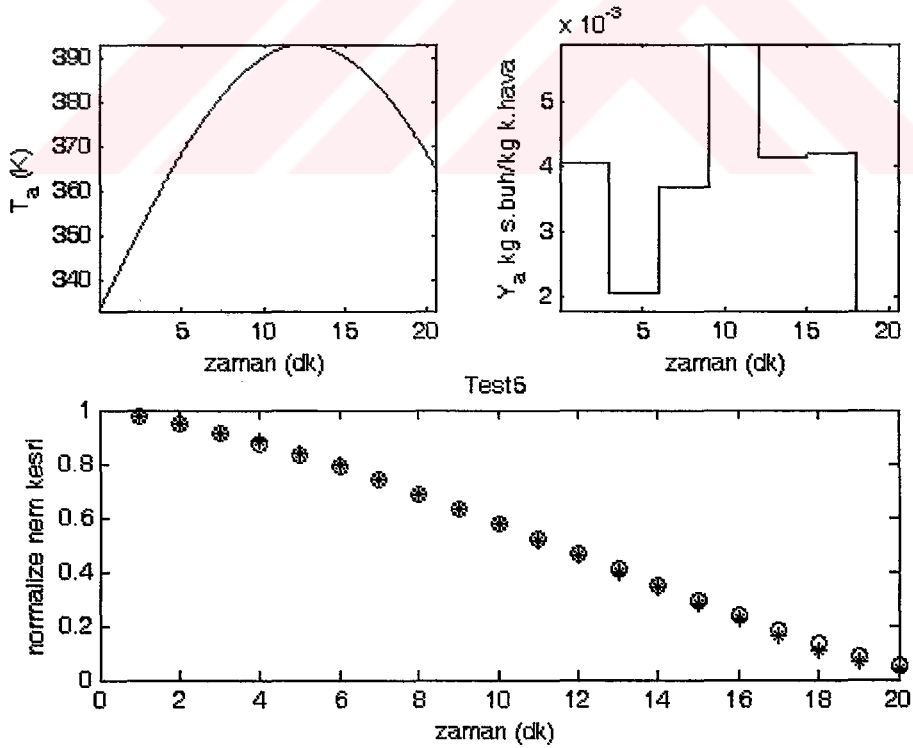
Şekil 6.18. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu² (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).



Şekil 6.19. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu³ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).

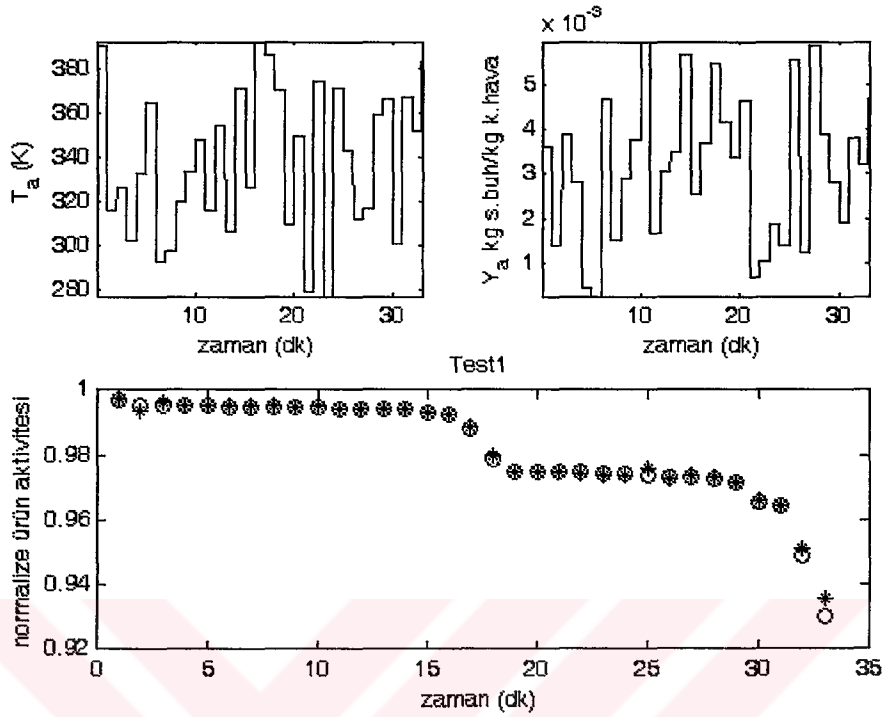


Şekil 6.20. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu⁴ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).

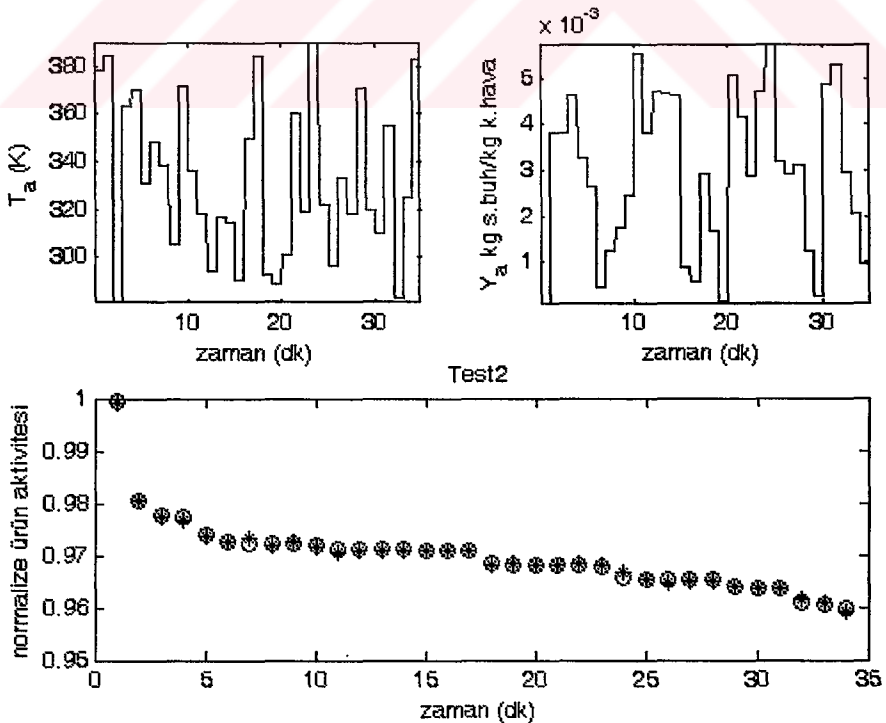


Şekil 6.21. RNN tabanlı nem kesri öngörü modelinin test sonucu⁵ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).

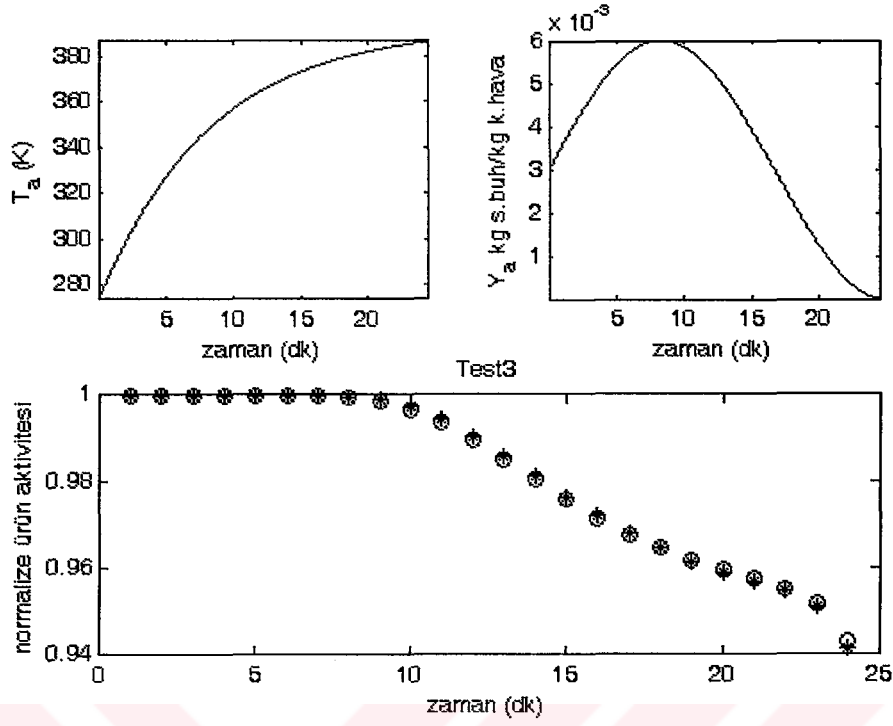
Dinamik YSA ile yapılan ürün aktivitesi öngörü modelinin test benzetimlerinden birkaçı Şekil 6.22, 6.23, 6.24, 6.25 ve 6.26'da gösterilmiştir.



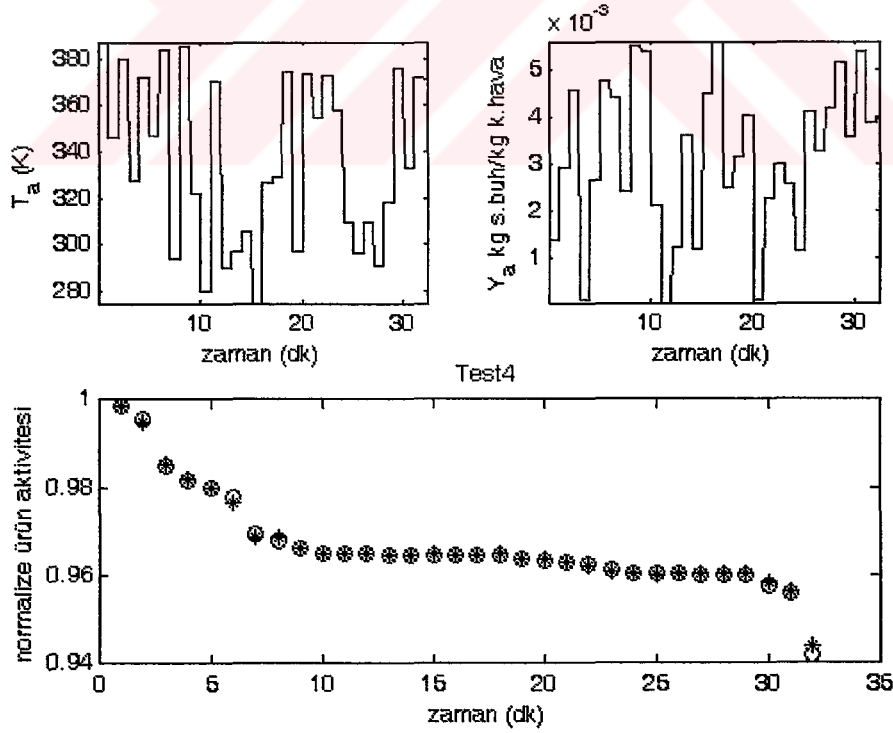
Şekil 6.22. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu¹ (o:test datası, *:öngörü modeli çıkışı).



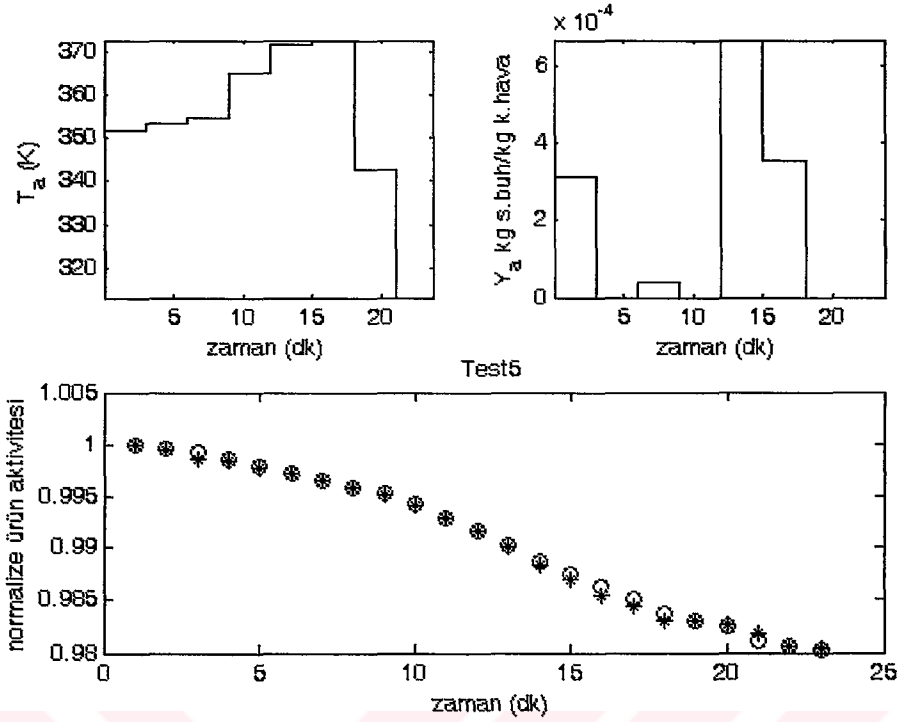
Şekil 6.23. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu² (o:test datası, *:öngörü modeli çıkışı).



Şekil 6.24. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu³ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).



Şekil 6.25. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu⁴ (o:test datası, * :öngörü modeli çıkışı).

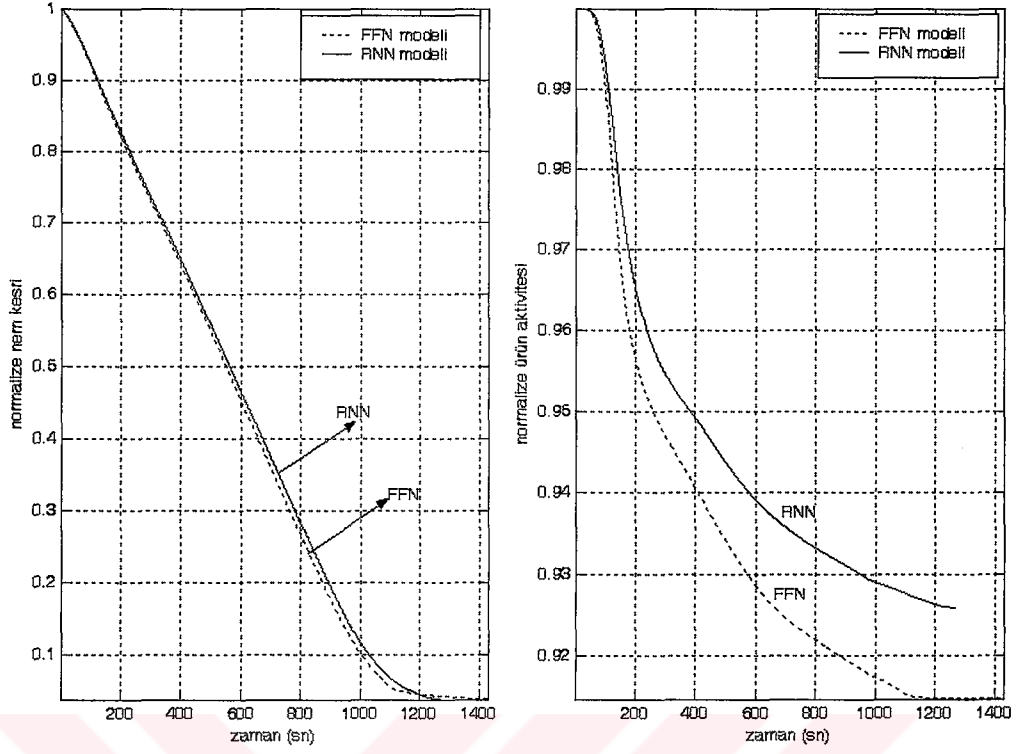


Şekil 6.26. RNN tabanlı ürün aktivitesi öngörü modelinin test sonucu⁵ (o: test datası, *: öngörü modeli çıkışı).

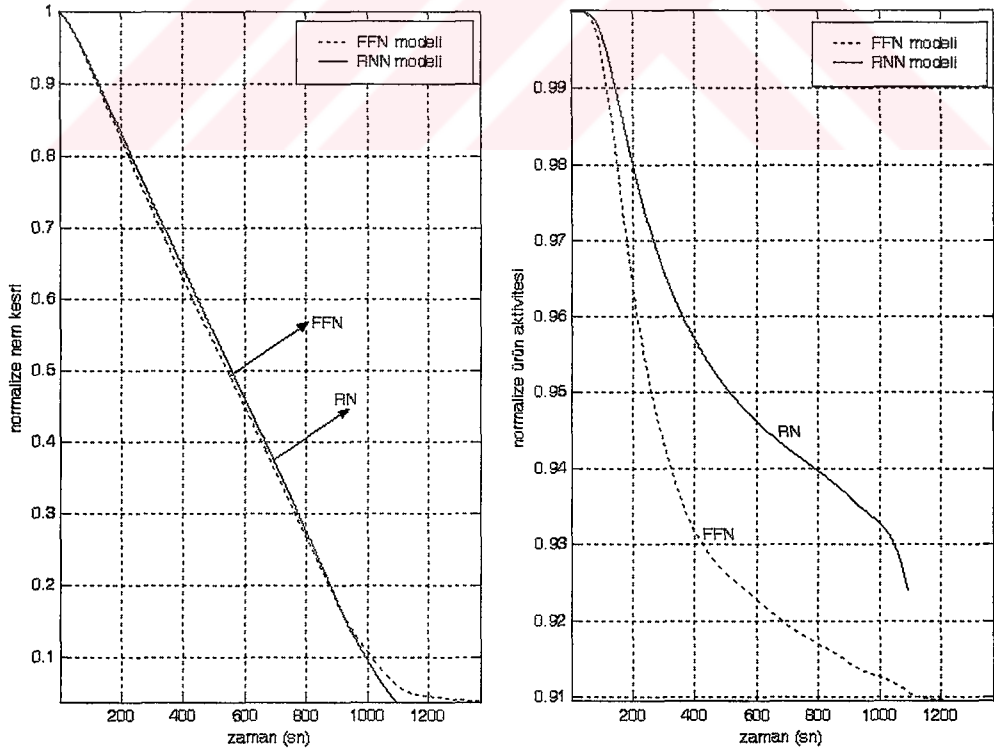
FFN ve RNN tabanlı nem kesri ve ürün kalitesi öngörü modelleri ile ilgili yapılan test benzetim sonuçlarından, öngörü modeli ile test verilerinin örtüştüğü görülmektedir. Ürün aktivitesi için tasarlanan dinamik YSA öngörü modelinin FFN tabanlı öngörü modeline göre daha iyi sonuç verdiği benzetimlerden açıkça anlaşılmaktadır.

6.4.2. Model öngörülü kontrol benzetim sonuçları

Silindirik granüllü ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma sürecinin model öngörülü kontrolü için benzetim çalışmaları değişik öngörü ufku değerleri için yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı 1 dk olarak alınmıştır. Kontrol değişkenlerinden havanın sıcaklığı bir önceki bölümde ayrıntıları verilen denklem 5.17 ve 5.18'e göre hesaplanmıştır. Optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan GA parametreleri Bölüm 5'deki ile aynı alınmıştır. 2 dakikalık ve 3 dakikalık öngörü ufukları için FFN ve RNN tabanlı model öngörülü kontrol benzetim sonuçları Şekil 6.27 ve 6.28'de gösterilmiştir.

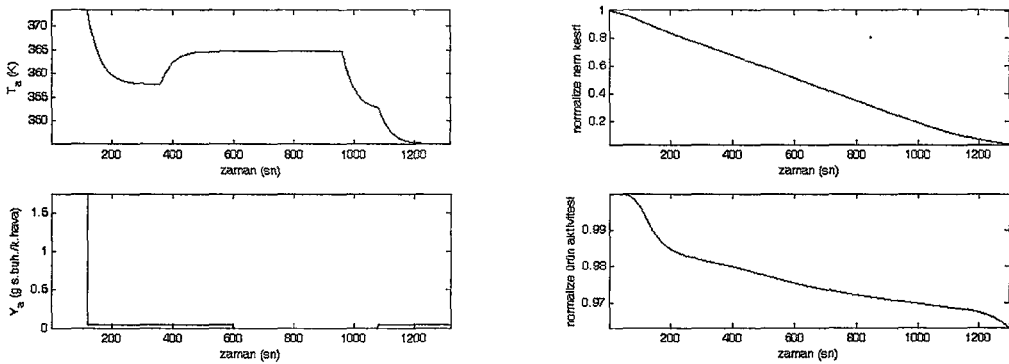
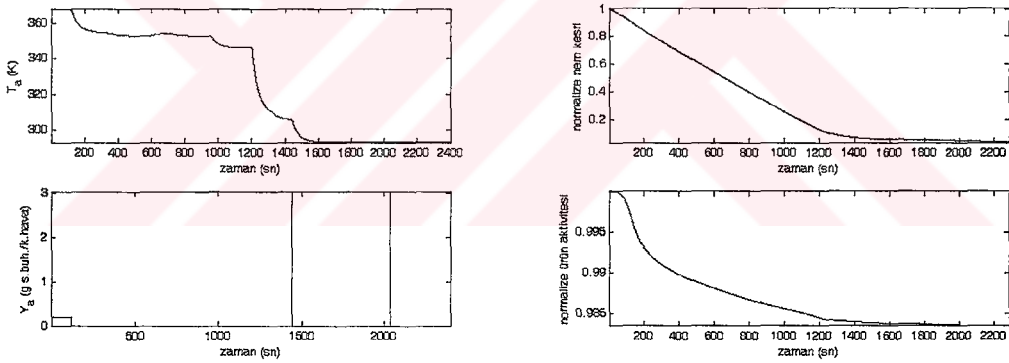
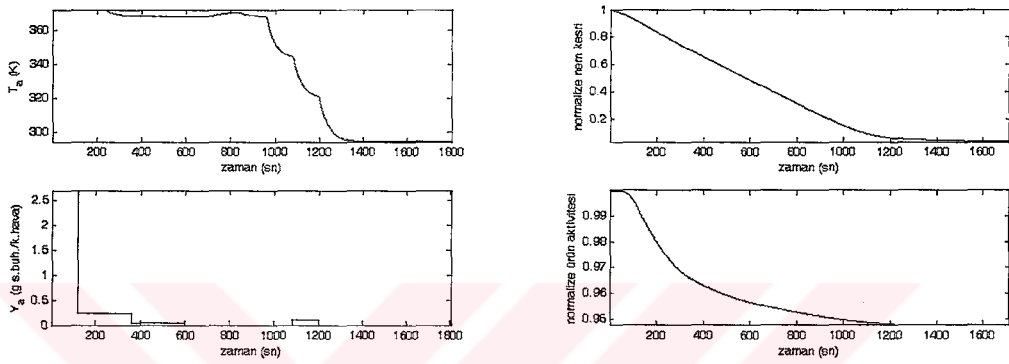


Şekil 6.27. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 2 dk öngörü ufku için FFN ve RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları.

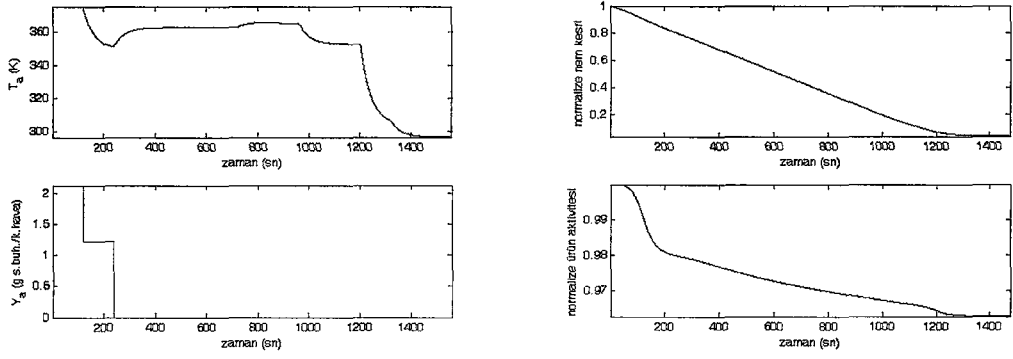


Şekil 6.28. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 3 dk öngörü ufku için FFN ve RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları.

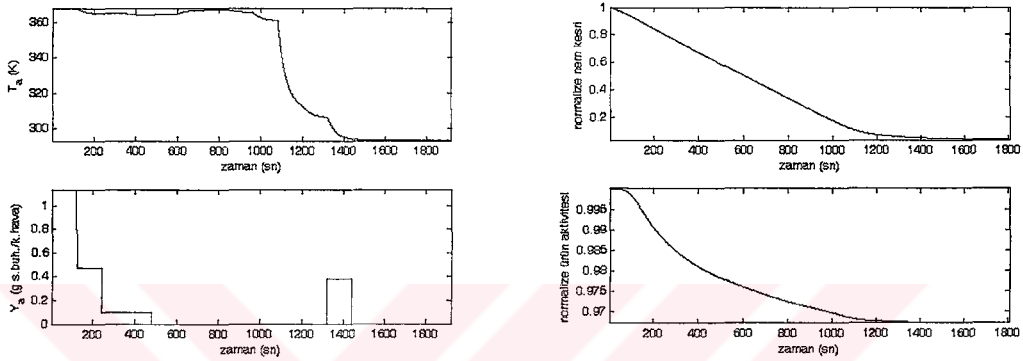
YSA temelli model öngörülü kontrolde dinamik sinir ağlarının klasik sinir ağlarına göre daha başarılı olduğunu Şekil 6.27 ve 6.28'den söylemek mümkündür. Kurutma sürecinin model öngörülü kontrolünde optimizasyon problemi tanımlanırken kontrol edilebilir (X , Q) ve kontrol değişkenleri (T_a , Y_a) için optimizasyon ağırlık değerleri (p , q) maliyet fonksiyonunda tanımlanmıştı. Şekil 6.29'da kontrol edilebilir değişkenlerin ağırlık değerlerinin, Şekil 6.30'da ise kontrol değişkenlerinin ağırlık değerlerinin kurutma sürecine etkisi gösterilmiştir.



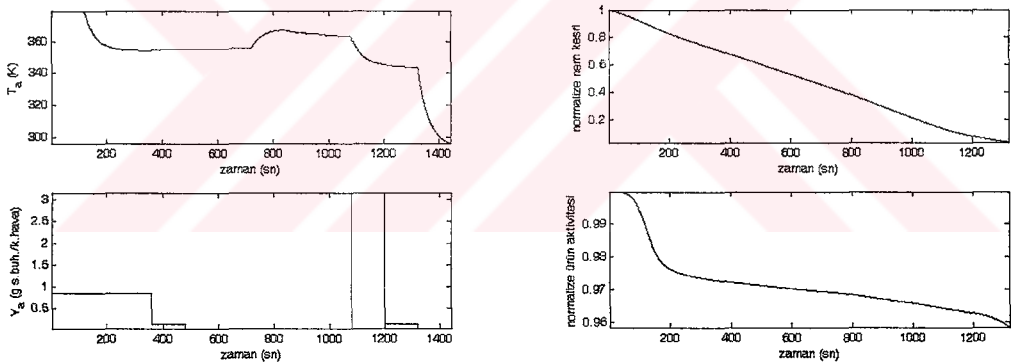
Şekil 6.29. Kontrol edilebilir değişkenlerin optimizasyon ağırlıklarının akışkan yataklı kurutma sürecine etkisi.



(a) $N=2$ dk, $p_1=4000$, $p_2=100$, $q_1=4 \cdot 10^{-3}$, $q_2=0,3$



(b) $N=2$ dk, $p_1=4000$, $p_2=100$, $q_1=4 \cdot 10^{-2}$, $q_2=0,3$

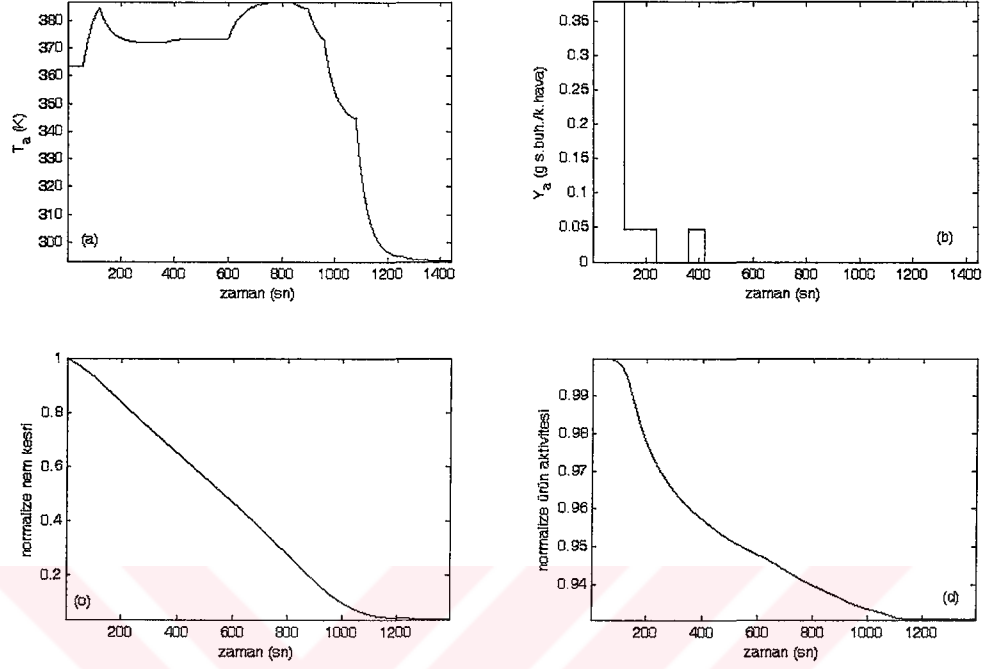


(c) $N=2$ dk, $p_1=4000$, $p_2=100$, $q_1=4 \cdot 10^{-3}$, $q_2=30$

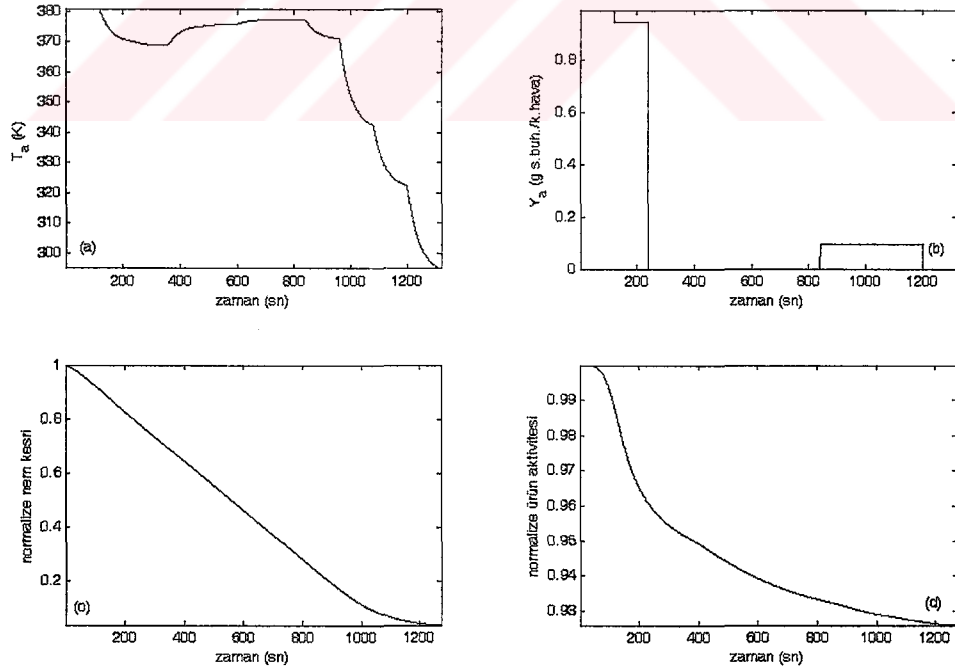
Şekil 6.30. Kontrol değişkenlerinin optimizasyon ağırlıklarının akışkan yataklı kurutma sürecine etkisi.

Maliyet fonksiyonundaki ağırlık değerlerinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir ve kontrol değişkenlerinin kontrol sürecine etkisi azaltılır veya artırılır. Şekil 6.29'dan da görüleceği gibi kurutma sonunda istenen ürün aktivitesine göre kontrol edilebilir değişkenlerin ağırlık değerleri seçilebilir. Kontrol edilebilir değişkenlerin optimizasyon ağırlık değerlerinin oranı (p_1/p_2) ne küçük (Şekil 6.29b), ne de büyük (Şekil 6.29a) seçilmeli, sürecin sonunda istenen değerler göz önünde bulundurularak seçim yapılmalıdır (Şekil 6.29c). Kontrol değişkenlerinin ağırlık değerleri de kurutma sürecinin koşullarına uygun şekilde seçilmelidir (Şekil 6.30c). Değişik

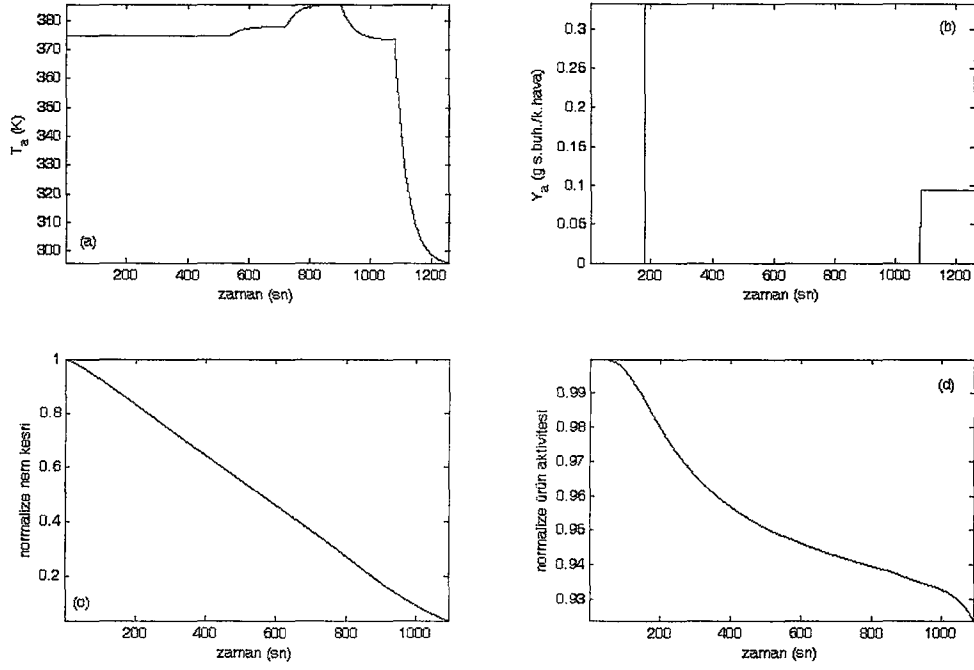
öngörü ufukları için akışkan yataklı kurutma sürecinin RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları Şekil 6.31'den Şekil 6.34'kadar gösterilmiştir.



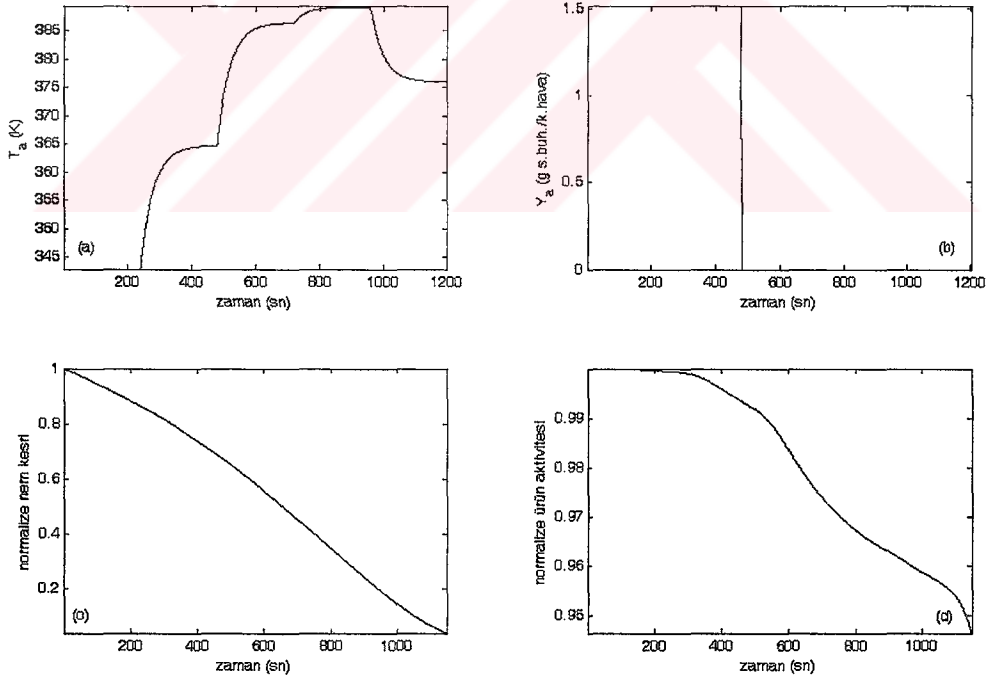
Şekil 6.31. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekme mayası kurutma sürecinin 1 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.



Şekil 6.32. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekme mayası kurutma sürecinin 2 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.

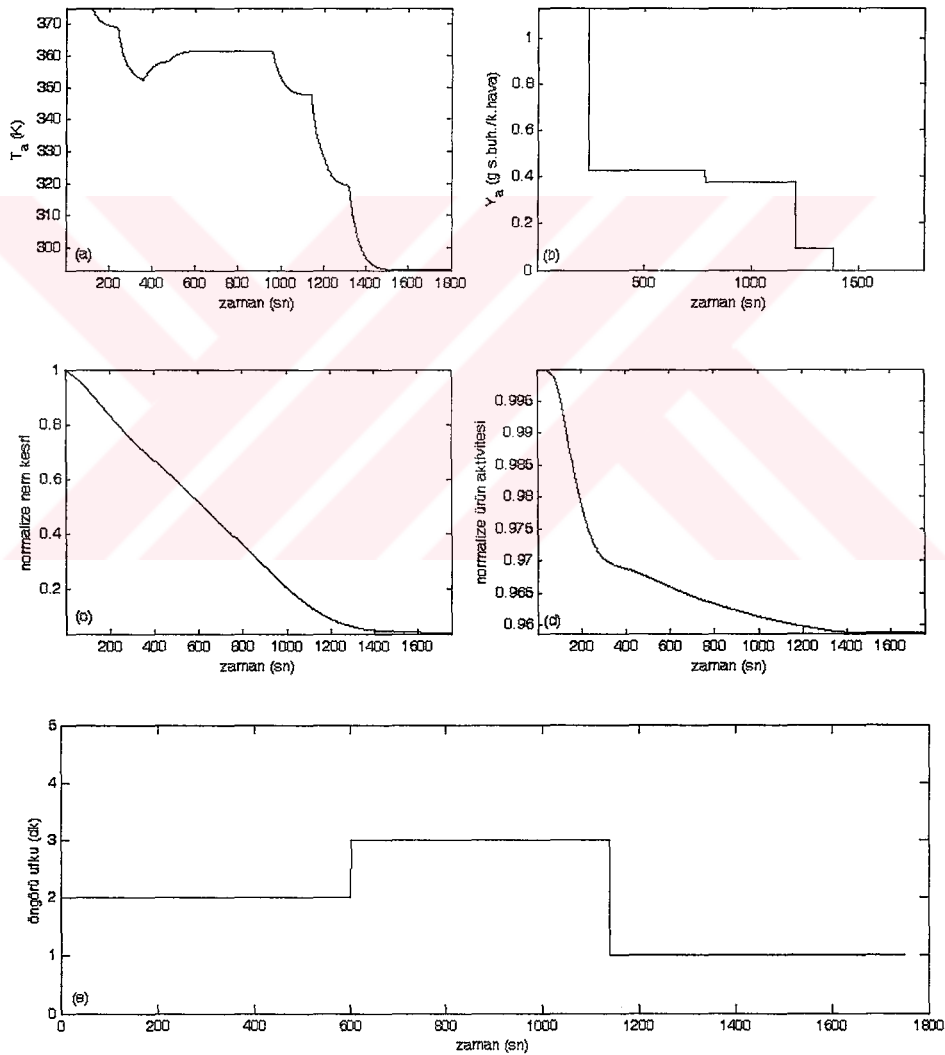


Şekil 6.33. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 3 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.



Şekil 6.34. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekmek mayası kurutma sürecinin 4 dk öngörü ufku için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.

Biyolojik ürünlerin kurutulma süreçlerinde ürün kalitesinin maksimum, nem kesrinin ise minimum düzeyde olması arzu edilmektedir. RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları bizlere kurutma süreci sonunda oluşan ürün aktivitesinin ve nem kesrinin, kurutulmuş biyolojik ürünlerin saklanabilmesi için yeterli seviyelerde olduğunu göstermektedir. Yine kurutma süreçlerinin önemli göstergelerinden birisi olan toplam kurutma süresi de tasarlanan YSA tabanlı model öngörülü denetleyici ile endüstriyel ortamdaki ekme mayası kurutma süresine göre azaltılmıştır. Şekil 6.35’de zamanla değişen öngörü ufku için silindirik granüllü ekme mayasının kurutma sürecine ait RNN tabanlı model öngörülü kontrol sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 6.35. Akışkan yataklı silindirik granüllü ekme mayası kurutma sürecinin zamanla değişen öngörü ufku (e) için RNN tabanlı model öngörülü denetim sonuçları: (a) ve (b) kontrol değişkenleri T_a ve Y_a , (c) ve (d) normalize nem kesri ve ürün aktivitesi.

Kontrol benzetiminde öngörü ufku üç basamak halinde yer almaktadır. Başlangıç anından 600.sn kadar $N=2$ dk, 601-1140 sn arasında $N=3$ dk ve 1140.sn'den kurutma sonuna kadar $N=1$ dk olarak alınmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucundan ürün aktivitesi ve nem kesri açısından kontrol yapısının amacına ulaştığını söylemek mümkündür.

Kısaca bu bölümde akışkan yataklı ekmek mayası kurutma süreci için YSA tabanlı bir model öngörülü denetleyici tasarlanmış ve bu denetleyici benzetim bazında test edilmiştir. Benzetim sonuçlarından yapılan model öngörülü denetleyicinin biyolojik ürünlerin kurutulmasına uygun olduğu anlaşılmaktadır.



BÖLÜM 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında biyolojik bir ürün olan ekmek mayasının akışkan yataklı kurutma süreci için iki model tasarlanmıştır. Birinci modelde kütle ve enerji denkliği temel alınarak model denklemleri çıkarılmıştır. Yapılan homojen modelin benzetim çalışmalarının akışkan yataklı kurutma süreçleri ile ilgili literatürde yer alan diğer çalışmalar (Kanarya 2002, Temple 1999b) ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Homojen modelin başarısı akışkan yataktaki granül boyutuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Granül boyutu arttıkça modelin deneysel verilerle uyumu azalmaktadır. Bunun nedeni granül içerisindeki nem difüzyonu ile ısı aktarımıdır. Granül içerisindeki nem kesri yüzeyden merkeze doğru artarak, sıcaklık ise yüzeyden merkeze doğru azalarak hareket eder. Granül boyutu çok küçükken merkezden yüzeye doğru olan değişimler göz ardı edilecek kadar az olduğundan homojen model iyi sonuçlar vermektedir. Boyutun artması granül içerisindeki ortalamaları da değiştireceğinden homojen model, kurutma performansını öngörmekte yetersiz kalmaktadır.

Bu sebeple, granül içerisindeki nem difüzyonu ve ısı aktarımı olaylarını temel alan ikinci model geliştirilmiştir. Yapılan model çalışmasında nem kesri ve sıcaklık ifadeleri ikinci dereceden doğrusal olmayan parabolik kısmi diferansiyel denklemler olarak tanımlanmıştır. Parabolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi (Crank-Nicolson, explicit) kullanılmıştır. Matematiksel modelde kullanılan parametreler ve sabitler ayrıntılı olarak bu çalışmada verilmiştir.

Biyolojik ürünlerin kurutma sırasındaki fiziksel (Coumans 1987, Hadrich 2004, Heinrich 2004) ve kimyasal (Josic 1982, Bayrock 1997ab, Kowalski 1997, Kroes 1999, Kerkhof 2000) değişimlerinden dolayı granül tabanlı model kurutma sürecini

tam anlamıyla tanımlayamadığından, süreç modeline ürün aktivitesi ve büzülme modelleri de ilave edilmiştir.

Benzetim çalışmalarında iki tipte ekmek mayası granülü kullanılmıştır. Küresel granülün yarıçapı silindirik granülün yarıçapının yaklaşık 3 katı büyüklüğündedir. Her iki form için yapılan büzülen ve büzülmeyen granül tabanlı kurutma modeli benzetim sonuçları, endüstriyel ortamdan alınan veriler ile model kestiriminin çok iyi bir uyum sağladığını göstermektedir.

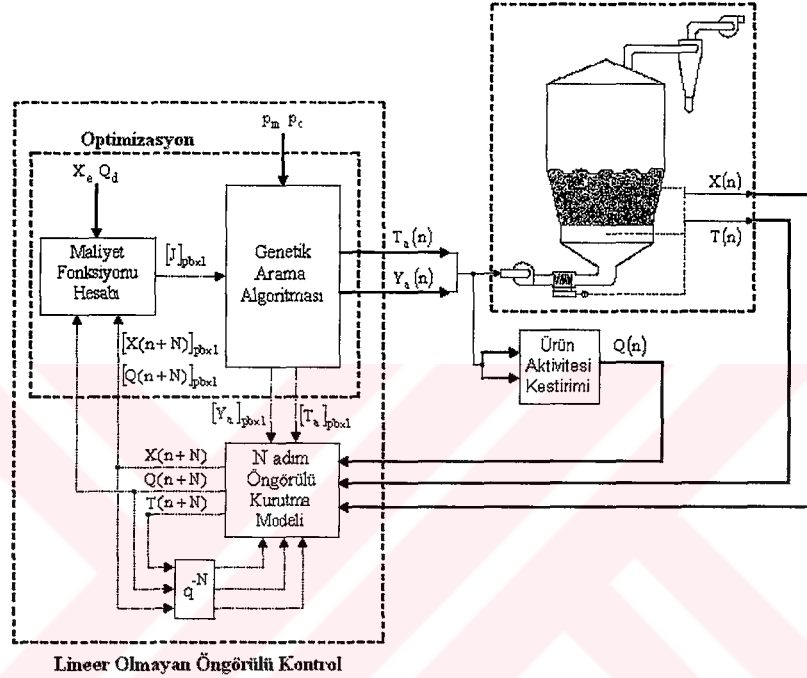
Endüstriyel ekmek mayası kurutma sürecinde ürün aktivitesi, sürekli izlenemeyen ve ölçülemeyen bir değişken olmasından dolayı, kurutma sürecinden belirli aralıklarla alınan örneklerin laboratuarda yapılan analizleri sonucu elde edilir. Bu tez çalışmasında geliştirilen matematiksel model ile endüstriyel akışkan yataklı kurutma süreçlerinde ürün aktivitesi sürekli izlenebilir hale getirilmiştir.

Geliştirilen modelin bir avantajı da literatürde yer alan birçok modelin aksine tüm akışkan yataklı kurutma süreçleri için kullanım esnekliğinin olmasıdır. Herhangi bir ürünün akışkan yataklı kurutma sürecinin matematiksel modelinde yalnızca kurutulacak malzeme ile ilgili bilgileri (granül formu, yarıçap) ve kurutma ile ilgili koşulları güncellemek yeterli olacaktır.

Kurutma süreci için, en düşük enerji maliyeti ile en kısa sürede ve en iyi kalitede ürün elde etmek amacıyla iki kontrol yapısı tasarlanmıştır. Bu kontrol yapılarından birincisi genetik algoritma tabanlı doğrusal olmayan öngörülü kontrol yapısıdır. Bu yapıda havanın sıcaklığı ve havanın nem kesri kontrol değişkeni olarak kullanılmış ve kurutma sürecinin optimizasyon problemi genetik arama algoritması ile çözülmüştür. Tasarlanan kontrol yapısı akışkan yataklı kurutma süreci modeline uygulanarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarının ilkinde yalnızca havanın sıcaklığı kontrol değişkeni olarak alınmış ve değişik öngörü ufukları için kontrolör cevabı ve kurutma modeli çıkışları elde edilmiştir. İkinci benzetimde kontrolör değişkenine havanın nem kesri de ilave edilmiş ve benzetim çalışmaları bu doğrultuda yürütülmüştür. Bu benzetimlerden kontrol yapısının süreç

için oldukça iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Yine kontrolörün bozucu etken karşısındaki cevabı, kontrol yapısının gürbüzlüğünü göstermektedir.

Tasarlanan kontrol algoritmasının endüstriyel kurutma süreçleri uygulamalarında kullanılması (Şekil 7.1) ile birlikte, enerji tüketimi ve toplam kurutma süresinin azalması, aynı zamanda ekmek mayası kalitesinin de artması beklenmektedir.



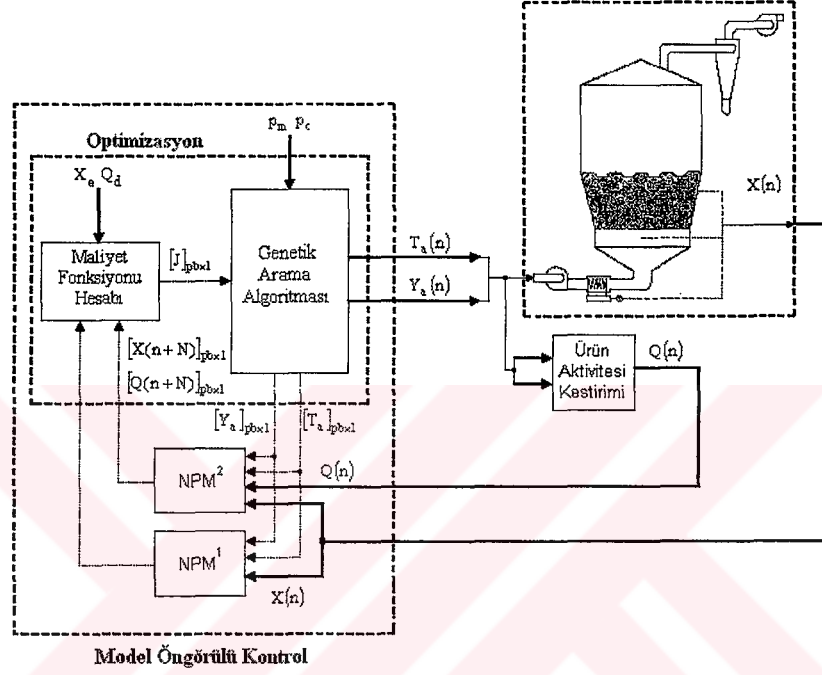
Şekil 7.1. Ekmek mayası akışkan yataklı kurutma sürecinde doğrusal olmayan öngörülü kontrol uygulaması.

Akışkan yataklı kurutma süreci için tasarlanan ikinci kontrol yapısı bir optimizasyon ve öngörü modelinden oluşan model tabanlı öngörülü kontrol yapısıdır. Nem kesri ile ürün aktivitesinin öngörü modeli dinamik YSA ile yapılmıştır. YSA ile yapılan öngörü modelleri kontrol yapısının işletim hızını arttırmıştır. Optimizasyon probleminin tanımı klasik bir MPC yapısıdır ve karmaşık yapısı nedeniyle ilk kontrol yapısındaki gibi genetik arama algoritmaları ile çözülmeye çalışılmıştır.

Kontrol yapısının benzetimsel testleri yapılmış ve öngörü modellerinin karşılaştırılmasından, literatürde yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi (Chu ve diğ. 2003, Castellanos ve diğ. 2002) dinamik bir yapı sunan RNN yapısı, FNN yapısına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Yine benzetim sonuçlarından MPC

yapısının akışkan yataklı kurutma süreçleri için kurutma süresini % 24 azalttığı ve ürün aktivitesini % 4 arttırdığı görülmektedir.

Hem öngörü modelleri hem de kontrol yapısı esnekliği ve kurutma süreçlerine getirdiği farklı bakış açısı ile endüstriyel akışkan yataklı kurutma süreçlerinde bu tezde geliştirilen 2. kontrol yapısı kolaylıkla kullanılabilir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Ekmek mayası akışkan yataklı kurutma sürecinde YSA kullanılarak model öngörülü kontrol uygulaması.

Akışkan yataklı kurutma süreçleri için diğer bir çözüm ise, geliştirilen her iki kontrol yapısının off-line benzetimleri sonucunda elde edilen kontrol değişkenleri (T_a , Y_a) profillerinin kurutma sürecine doğrudan verilmesidir. Bu yöntem kolay ve uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen, kurutma sürecinde olabilecek ani değişimlere yanıt vermesi mümkün görünmemektedir.

Endüstriyel süreçlerin çoğunda hala geleneksel yöntemler ve deneysel bulgulara dayalı önceden belirlenmiş besleme profilleri kullanılmaktadır. Beklenmedik ani sıcaklık değişimi, süreç beslemelerindeki bir takım problemler, sensör arızaları gibi durumlarda sisteme müdahale elle yapılmaktadır. Bu yüzden önerilen kontrol yapıları, kurutma sürecindeki beklenmedik bozucu durumlar karşısında sisteme müdahale ederek, bozucu etkinin ürüne vereceği zararı en aza indirmeye çalışır (Bkz. Şekil 5.26 ve 5.28).

KAYNAKLAR

1. ADAMIEC, J., KONINSKY, W., MERKOWSKI, A.S., STRUMILLO, C., 1995. Drying of Biotechnological Products. in: Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker.
2. AKPINAR, E.K., BICER, Y., YILDIZ, C., 2003. Thin Layer Drying of Red Paper. in: Journal of Food Engineering, vol 59, 99-104.
3. ASHRAE, 2001. Handbook, chapter 6, Psychrometrics, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
4. BAHAR, A., OZGEN, C., LEBLEBICIOGLU, K., HALICI, U, 2004. Artificial Neural Network Estimator Design for the Inferential Model Predictive Control of an Industrial Distillation Column. in: Industrial Engineering and Chemical Research, 43, 6102-6111.
5. BALLEGOOIJEN, W.G.E. VAN, LOON, A.M. VAN, ZANDEN, A.J.J. VAN DER, 1997. Modeling Diffusion Limited Drying Behaviour in a Batch Fluidized Bed Dryer. Drying Tech., 15, 3-4, 837-855.
6. BAYROCK, D., INGLEDEW, W.M., 1997a. Mechanism of Viability Loss During Fluidized Bed Drying of Baker's Yeast. in: Food Research International, vol 30, no 6, 417-425.
7. BAYROCK, D., INGLEDEW, W.M., 1997b. Fluidized Bed Drying of Baker's Yeast: Moisture Levels, Drying Rates and Viability Changes During Drying. in: Food Research International, vol 30, no 6, 407-415.
8. BECERIKLI, Y., 1998. Nöro-Optimal Kontrol. Sakarya Üniversitesi Fen Bil. Ens. Doktora Tezi, Sakarya.
9. BEKER, M.J., RAPOPORT, A.I., 1987. Conservation of yeasts by Dehydration. in: Biochemical Eng./Biotech, 35, 128-171.
10. BERG, C. VAN DEN, LENIGER, H.A., 1978. The Water Activity of Foods. in: Miscellaneous Papers 15, Wageningen University.
11. BIR, A., 1975. Belirgin ve Olasıl Kontrol Sistemlerinde Prediksiyon. İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi Doktora Tezi, İstanbul
12. BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT E.N., 1960. Transport Phenomena, Wiley, New York.

13. CAMACHO, E.F., BORDONS, C., 1989. Model Predictive Control in the Process Industry, Prentice Hall.
14. CASTELLANOS, J.A., PALANCAR, M.C., ARAGON, J.M., 2002. Designing and Optimizing a Neural Network for the Modeling of a Fluidized-Bed Drying Process. in: *Industrial Engineering and Chemical Research*, 41, 2262-2269.
15. CHEN, S., COWAN, C.F.N., GRANT, P.M., 1991. Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 2, no. 2, 302-309.
16. CHEN, Y., EDGAR, T., MANOUSIOUTHAKIS, V., 2004. On Infinitive-Time Nonlinear Quadratic Optimal Control. in: *Systems & Control Letters*, 51, 259-268.
17. CHONG, E.K.P., ZAK, S.H., 1996. An Introduction to Optimization. John Wiley & Sons. Inc., New York.
18. CHU, J.Z., TSAI, P.F., TSAI, W.Y., JANG, S.S., SHIEH, S.S., LIN, P.H., JIANG, S.J., 2003. Multistep Model Predictive Control Based on Artificial Neural Networks. in: *Industrial Engineering and Chemical Research*, 42, 5215-5228.
19. CLARKE, D.W., MOTHADI, C., 1989. Properties of Generalized Predictive Control. in: *Automatica*, 25, 859-875.
20. CLARKE, D.W., MOTHADI, C., TUFFS, P.S., 1987. Generalized Predictive Control- Parts I and II. in: *Automatica* 23, 137-60.
21. CLARKE, D.W., SCATTOLINI, R., 1991. Constrained Receding-Horizon Predictive Control. *IEE Proc. D* 138 (4), 347-354.
22. COUMANS, W.J., 1987. Power Law Diffusion in Drying Processes. Ph.D. Thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands.
23. DEMIRCIOGLU, H., GAWTHROP, P.J., 1991. Continuous-time Generalized Predictive Control (CGPC). in: *Automatica*, vol. 27, no. 1, 55-74.
24. DOYMAZ, I., PALA, M., 2003. The Thin-Layer Drying Characteristics of Corn. in: *Journal of Food Engineering*, vol 60, 125-130.
25. DUFOUR, P., LAURENT, P., XU, C.Z., 2004. Model Predictive Control of the Water Based Painting Drying using a Humidity Profile soft Sensor and a Temperature Measurement. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 911-918.
26. DUFOUR, P., MICHAUD, D.J., TOURE, Y., DHURJATI, P.S., 2004. A Partial Differential Equation Model Predictive Control Strategy: Application to

- Autoclave Composite Processing. in: *Computers & Chemical Engineering*, vol.28, 545-556.
27. DUFOUR, P., TOURE, Y., BLANC, D., LAURENT, P., 2003. On Nonlinear Distributed Parameter Model Predictive Control Strategy: On-Line Calculation Time Reduction and Application to an Experimental Drying Process. in: *Computers & Chemical Engineering*, vol.27, 1533-1542.
 28. ELMAN, J.L., 1990. Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14, 179-211.
 29. FILHO, R.M., WOLF, M.R.M., VASCONCELOS, L.G.S., 1997. Development of a Suitable Optimal Operating Control Strategy for Large Scale Dryers. in: *Computers Chemical Engineering vol 21, PSE'97-ESCAPE-7 Joint Conference*, Elsevier Science Publisher, 589-594.
 30. GERALD, C.F., WHEATLY, P.O., 1984. *Applied Numerical Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company.
 31. GHAZZAWI, A.A., ALI, E., NOUH, A., ZAFIRIOU, E., 2001. On-line Tuning Strategy for Model Predictive Controllers. in: *Journal of Process Control* 11, 265-284.
 32. GILL, P.R., MURRAY, W., WRIGHT, M.H., 1981. The Levenberg-Marquardt Method. in: *Practical Optimization*. Academic Press, London, 136-137.
 33. GOLDBERG, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, New York.
 34. HADRICH, B., KECHAOU, N., 2004. Mathematical and Modelling and Simulation of Heat and Mass Transfer Phenomena in a Shrinking cylinder During Drying. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 533-541.
 35. HAGAN, M.T., DEMUTH, H.B., BEALE, M.H., 1996. *Neural Network Design*, Boston, PWS Publishing.
 36. HAYKIN, S., 1999. *Neural Networks a Comprehensive Foundation*. Prentice Hall, USA.
 37. HEINRICH, S., PEGLOW, M., HENNEBERG, M., DRECHSLER, J., MORL, L., 2004. Fluidized Bed Spray Granulation: Analysis of Dynamic Particle Populations and Heat and Mass Transfers. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 121-128.
 38. HOVMAND, S., 1995. Fluidized Bed Drying. in: *Handbook of Industrial Drying*, A.S. Mujumdar (ed.), Marcel Dekker.

39. HUSSAIN, M.A., 1999. Review of the Application of Neural Networks in Chemical Process Control: Simulation and Online Implementation. in: *Artificial Intelligent Engineering*. 13, 55-68.
40. JOSIC D., 1982. Optimization of Process Conditions for the Production of Active Dry Yeast. *Lebensm. Wiss. Technol.* 15, 5-14.
41. KANARYA, A., 2002. Akışkan Yataklı Kurutma Prosesinin Matematiksel Modellemesi. GYTE Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
42. KARAKUZU, C., 2003. Nöral Ağ ve Bulanık Mantık ile Endüstriyel Ekmek Mayası Fermantasyonu Modelleme ve Kontrolü. Kocaeli Üniversitesi Fen Bil. Ens. Doktora Tezi, Kocaeli.
43. KERKHOF, P.J.A.M., 2000. Some Modeling Aspects of (Batch) Fluid-Bed Drying of Life-Science Products. in: *Chemical Engineering and Processing 39*, Elsevier Science Publisher, 69-80.
44. KERKHOF, P.J.A.M., SCHOEBER, W.J.A.H., 1974. Theoretical Modelling of The Drying Behaviour of Droplets in Spray Dryers. in: Spicer A (ed) *Advances in Preconcentration and Dehydration of Food*, Applied Science Publisher, 349-397, London.
45. KONAR, A.F., BECERIKLI, Y., SAMAD, T., 1997. Trajectory Tracking with Dynamic Neural Networks. *IEEE, Int. sym. On Intelligent Control, ISIC'97*, İstanbul.
46. KOWALSKI, S.J., MUSIELAK, G., RYBICKI, A., 1997. The Response of Dried Materials to Drying Conditions. in: *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, vol.40, no.5, 1217-1226.
47. KROES BAS, 1999. The Influence of Material Properties on Drying Kinetics. Ph.D. Thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands.
48. LEVENBERG, K., 1944. A Method for the solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly App. Math.*, vol. 2, 164-168.
49. LI, J., PAN, Y., CHEN, G., MUJUMDAR, A.S., ZHOU, M., 2004. Fluidized-Bed Drying of Biological Materials: Two Cases Studies. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 1799-1803.
50. LI, P., WENDT, M., WOZNY, G., 2000. Robust Model Predictive Control under Chance Constraints. in: *Computers and Chemical Engineering* 24, 829-834.
51. LIEVENSE, L.C., 1991. The Inactivation of *Lactobacillus Plantarum* During Drying. Ph.D. Thesis, Wageningen University.

52. LIEVENSE, L.C., RIET, K. VAN'T, 1993. Convective Drying of Bacteria: 1. the Drying Process. In: *Biochemical Eng. /Biotech*, 50, 46-63.
53. LIEVENSE, L.C., RIET, K. VAN'T, 1994. Convective Drying of Bacteria: 2. Factors Influencing Survival,. in: *Biochemical Eng. /Biotech*, 51, 72-89.
54. LIOU, J.K, BRUIN, S., 1982a. An Approximate Method for The Nonlinear Problem with A Power Relation Between Diffusion and Concentration-I. Computation of Desorption Times. *Int. J. Heat Mass Transfer* 25, 1209-1220.
55. LIOU, J.K, BRUIN, S., 1982b. An Approximate Method for The Nonlinear Problem with A Power Relation Between Diffusion and Concentration-I. Computation of Concentration Profiles. *Int. J. Heat Mass Transfer* 25, 1221-1229.
56. LIOU, J.K., 1982. An Approximate Method for The Nonlinear Diffusion Applied to Enzyme Inactivation During Drying. Ph.D. Thesis, Wageningen University.
57. LIOU, J.K., LUYBEN K.Ch.A.M., BRUIN S., 1984. A Simplified Calculation Method Applied to Enzyme Inactivation During Drying. *Biotechn. Bioeng.* 27, 109-116.
58. LUNA-SOLANO, G., SALGADO-CERVANTES, M.A., RODRIGUEZ-JIMENES, G.C., GARCIA-ALVARADO, M.A., 2005. Optimization of Brewer's Yeast Spray Drying Process. in: *Journal of Food Engineering*, 68, 9-18.
59. LUYBEN, K.Ch.A.M., LIOU, J.K., BRUIN S., 1982. Enzyme Degradation During Drying. *Biotechn. Bioeng.* 24, 533-552.
60. MACIEJOWSKI, J.M., 2002. *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education Limited, London.
61. MARQUARDT, D.W., 1963. An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. in: *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, 431-441.
62. MATLAB®, 2000. *High Performance Numeric Computation and Visualization Software*. The Mathworks Inc., Prentice Hall.
63. MATLAB®, 2002. *Neural Networks User's Guide*. The Mathworks Inc.
64. MICHALEWICZ, Z., 1994. *Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs*. AI Series, Springer-Verlag, New York.
65. MJALLI, F.S., ABDEL-JABBAR, N.M., 2005. Control of Scheibel Extraction Contactors using Neural-Network-Based Control Algorithms. in: *Industrial Engineering and Chemical Research*, 44, 2125-2133.

66. MOURA, C.P., MASSON, M.L., YAMAMATO, C.I., 2004. Prediction of Osmotic Pretreatment Parameters using Neural Networks Models for Process Optimization. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 589-596.
67. MUJUMDAR, A.S., 1995. *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker.
68. MUJUMDAR, A.S., LI, Y.K., JOG, V., 1980. Developments in Drying. *Proceedings of the Second International Drying Symposium*, Drying'80 vol 1.
69. NA, J.G., CHANG, Y.K., CHUNG, B.H. and LIM, H.C., 2002. Adaptive Optimization of Fed-Batch Culture of Yeast by Using Genetic Algorithms. in: *Bioprocess and Biosystems Engineering* vol 24, 299-308.
70. OZKAN, L., KOTHARE, M.V., GEORGAKIS, C., 2000. Model Predictive Control of Nonlinear Systems using Piecewise Linear Models. in: *Computers and Chemical Engineering* 24, 793-799.
71. PANCHARIYA, P.C., POPOVIC, D., SHARMA, A.L., 2002. Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process. in: *Journal of Food Engineering*, vol 52, 349-357.
72. PARKER, R.S., DOYLE, F.J., 2001. Optimal Control of a Continuous Bioreactor using an Empirical Nonlinear Model. in: *Industrial Engineering and Chemical Research*, 40, 1939-1951.
73. PARY, J.L., 1985. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: a Review. in: *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 1-29.
74. PEGLOW, M., HEINRICH, S., TSOTSAS, E., MORL, L., 2004. Fluidized Bed Drying: Influence of Dispersion and Transport Phenomena. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 129-136.
75. PEREZ, E.B., CARVALHO, M.S., 2004. Optimization of Drying Process in the Manufacturing of Adhesive Tapes. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, 333-340.
76. PERRY, R.H., 1984. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6.Ed., M.Hill.
77. QUIRIJNS, E.J., BOXTEL, A.J.B. VAN and STRATEN, G. VAN, 1998. The Use of Moisture and Temperature Profiles in Predicting Product Quality for Optimal Control of Drying Process. in: Skjöldebrand, C. and G. Trystam (Eds.), *Proceedings on Automatic Control of Food and Biological Processes IV*. Göteborg, Sweden, 485-490.
78. QUIRIJNS, E.J., WILLIGENBURG, L.G. VAN, BOXTEL, A.J.B. VAN and STRATEN, G. VAN, 2000a. The Significance of Modeling Spatial

- Distributions of Quality in Optimal Control of Drying Processes. in: Journal A. Benelux Quarterly Journal on Automatic Control vol 41, 56-64.
79. QUIRIJNS, E.J., WILLIGENBURG, L.G. VAN, BOXTEL, A.J.B. VAN, 2000b. New Perspectives for Optimal control of Drying Processes. International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2000. Pisa, Italy, 437-442.
 80. ROBBINS, P.T., FRYER, P.J., 2003. The Spouted-Bed Roasting of Barley: Development of a Predictive Model for Moisture and Temperature. in: Journal of Food Engineering, 59, 199-208.
 81. ROSENBLATT, F., 1961. Principles of Neurodynamics, Washington, Spartan Press.
 82. ROUBOS, J.A., MOLLOV, S., BABUSKA, R., VERBRUGGEN, H.B., 1999. Fuzzy Model-Based Predictive Control using Takagi-Sugeno Models. in: International Journal of Approximate Reasoning 22, 3-30.
 83. ROUBOS, J.A., STRATEN, G. VAN and BOXTEL, A.J.B. VAN, 1999. An Evolutionary Strategy for Fed-Batch Bioreactor Optimization; Concepts and Performance. in: Journal of Biotechnology vol 67, 173-178.
 84. ROUX, G.A.C.L., TEIXEIRA, R.A., 2004. Application of Nonlinear Predictive Control to a Semibatch Polycondensation Reactor. in: Industrial Engineering and Chemical Research, 43, 7303-7311.
 85. RUMELHART, D.E, HINTON, G.E., WILLIAMS, R.J., 1996. Learning Representations by back-Propagating Errors. Nature vol. 323, 533-536.
 86. RUSNAK, A., FIKAR, M., LATIFI, M.A., MESZAROS, A., 2001. Receding Horizon Iterative Dynamic Programming with Discrete Time Models. in: Computers and Chemical Engineering 25, 161-167.
 87. SARKAR, D., MODAK, J.M., 2003. Optimization of fed-batch bioreactors using genetic algorithms. in: Chemical Engineering Science vol 58, Elsevier Science Publisher, 2283-2296.
 88. SAZHIN, B.S., REUTSKII, V.A., SMIRNOVA, L.S., 1979. Intensification of Drying Process and New Technique Utilization, Acad. of Science. Kiev.
 89. SCHOEBER, W.J.A.H., 1976. Regular Regimes in Sorption Processes. Ph.D. Thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands.
 90. SOARES, J.B., PEREZ, S.A.N., CORRERIA, P.B., 2004a. Grain Drying Optimization at Low Temperatures: I-Application of the Fundamentals of the Dynamic Programming. Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, 694-701.

91. SOARES, J.B., PEREZ, S.A.N., CORRERIA, P.B., 2004b. Grain Drying Optimization at Low Temperatures: II-Cases Simulation. Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, 702-709.
92. STAKIC, M.B., TSOTSAS, E., 2004. Model-Based Analysis and Optimization of Convective Grain Drying Processes. Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, 381-388.
93. STRUMILLO, C., KUDRA, T., 1986. Drying: Principles, Applications and Design. Gordon and Breach Science Publishers.
94. TEMPLE, S.J., VAN BOXTEL A.J.B., 1999a. Equilibrium Moisture Content of Tea. in: Journal of Agricultural Engineering Research. 74, 83-89.
95. TEMPLE, S.J., VAN BOXTEL A.J.B., 1999b. Modelling of Fluidized Bed Drying of Black Tea. in: Journal of Agricultural Engineering Research. 74, 203-212.
96. TEMPLE, S.J., VAN BOXTEL A.J.B., 1999c. Thin Layer Drying of Black Tea. in: Journal of Agricultural Engineering Research. 74, 167-176.
97. TEMURTAS, F., TEMURTAS, H., YUMUSAK, N., OZ, C., 2003. Effects of Trajectory Planning on the Model Based Predictive Robotic Manipulator Control. ISCIS 2003, LNCS 2869, 545-552.
98. TOGRUL, I.T., PEHLIVAN, D., 2003. Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot. in: Journal of Food Engineering, 58, 23-32.
99. TRAUB, H., 2004. Drying- The Cinderella of the Process Industry. Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, 798-804.
100. TRELEA, I.C., TRYSTRAM, G., COURTOIS, F., 1997. Optimal Constrained Non-linear Control of Batch Processes: Application to Corn Drying. in: Journal of Food Engineering vol 31, Elsevier Science Publisher, 403-421.
101. VERDIJCK, G.J.C., 2003. Model-Based Product Quality Control Applied to Climate Controlled Processing of Agro-Material. Ph.D. Thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands.
102. VITOR, J.F.A., BISCARIA Jr., E.C., MASSARINI, G., 2004. Modeling of Biomass Drying in Fluidized Bed. Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, 1104-1111.
103. WANG, Y.J., RAWLINGS, J.B., 2004a. A New Robust Model Predictive Control Method I: Theory and Computation. in: Journal of Process Control, vol. 14, 231-247.

104. WANG, Y.J., RAWLINGS, J.B., 2004b. A New Robust Model Predictive Control Method II: Examples. in: *Journal of Process Control*, vol.14, 249-262.
105. ZIMMERMANN, K., BAUER, W., 1985. The influence of Drying Conditions upon Reactivation of Baker's Yeast. *Proc. 4th International Congress of Engineering and Food (ICEF 4)*, Edmonton, 425-437.
106. ZIMMERMANN, K., BAUER, W., 1987. Fluidized Bed Drying of Mikroorganisms on Carrier Material. 666-678.



EK A. KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLEMESİNDE KULLANILAN BAZI PARAMETRELERİN HESABI

A.1. Maya Özgül Isısının Hesaplanması ($c_{p,y}$)

Josic ve Johanides'e (1981) göre maya özgül ısı, mayanın yüzde kuru madde kesrine bağlı olarak değişmektedir. Maya özgül ısı, mayanın yüzde kuru madde oranına bağlı olarak 3.dereceden bir polinom şeklinde denklem A.1'deki gibi verilebilir:

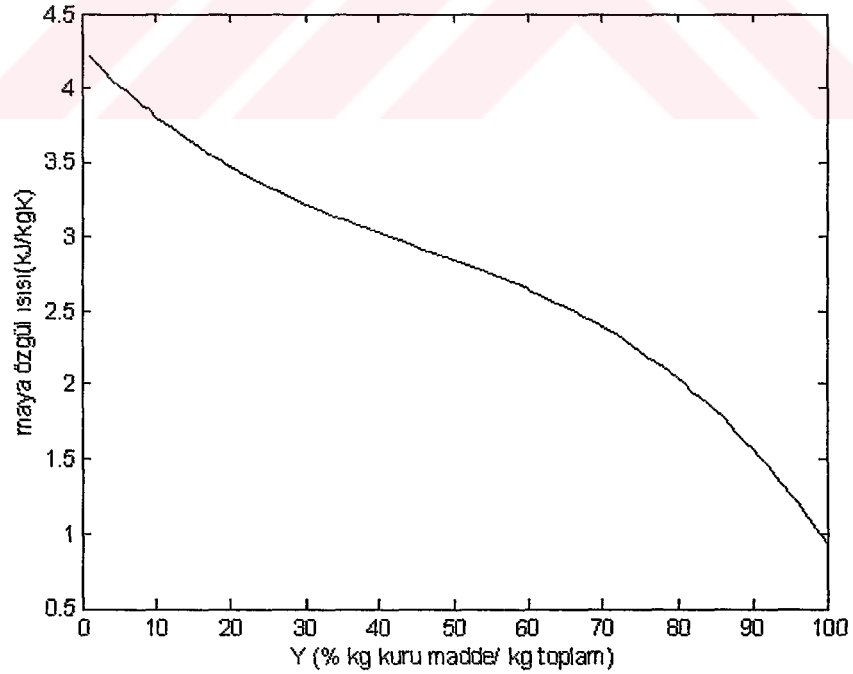
$$c_{p,y}(k) = C_0 Y^3(k) + C_1 Y^2(k) + C_2 Y(k) + C_3 \quad (A.1)$$

$$Y = 100 \frac{M_y}{M_y + W_y} \quad (A.2)$$

Burada Y mayanın yüzde kuru madde oranını göstermektedir. Denklem A.1'deki sabit C değerleri Tablo A.1'de verilmiştir. Maya özgül ısının mayanın yüzde kuru madde oranına bağlı olarak değişimi Şekil A.1'de gösterilmiştir.

Tablo A.1. Maya özgül ısı ($c_{p,y}$) denkleminde (A.1) kullanılan sabit C değerleri.

C_0	-6.0000	E - 06	C_2	-5.3400	E - 02
C_1	+8.0000	E - 04	C_3	+4.2672	E + 00



Şekil A.1. Maya özgül ısısının yüzde kuru madde oranına bağlı değişimi.

A.2. Su Buharı Özgül Isısının Hesaplanması ($c_{p,ww}$)

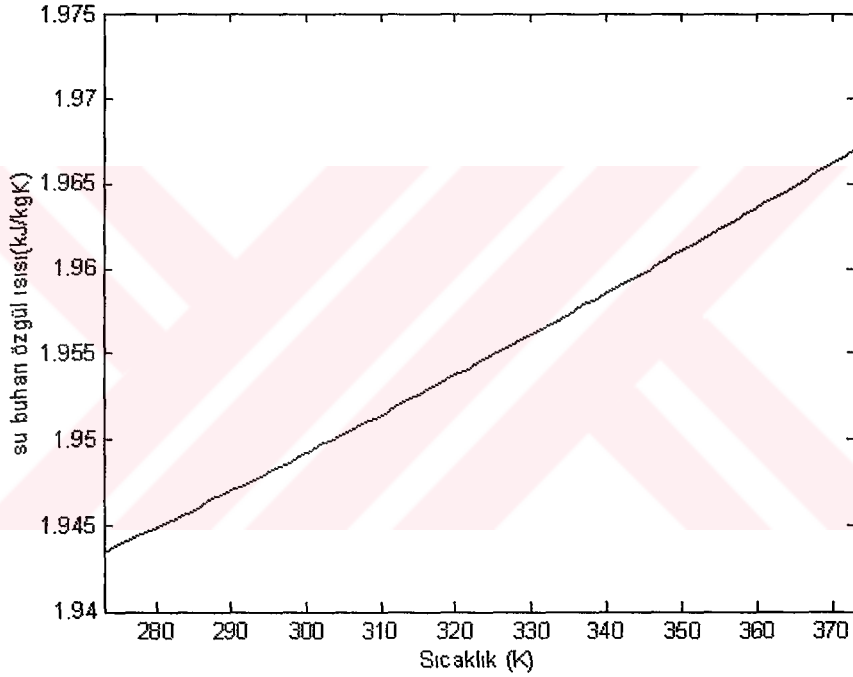
Perry'e (1984) göre su buharı özgül ısı hava sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Denklem A.3'de $c_{p,ww}$ 'nin ifadesi verilmiştir:

$$c_{p,ww}(k) = (C_0 + C_1 T_a(k) + C_2 T_a^2(k)) \frac{4.184}{18} \quad (A.3)$$

Denklem A.3'deki sabit C değerleri Tablo A.2'de verilmiştir. Su buharı özgül ısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil A.2'de gösterilmiştir.

Tablo A.2. Su buharı özgül ısı ($c_{p,ww}$) denkleminde (A.3) kullanılan sabit C değerleri.

C_0	+8.22	E + 00	C_1	+1.50	E - 04	C_2	+1.34	E - 06
-------	-------	--------	-------	-------	--------	-------	-------	--------



Şekil A.2. Su buharı özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.

A.3. Buharlaşma Gizli Isısının Hesaplanması (ΔH_v)

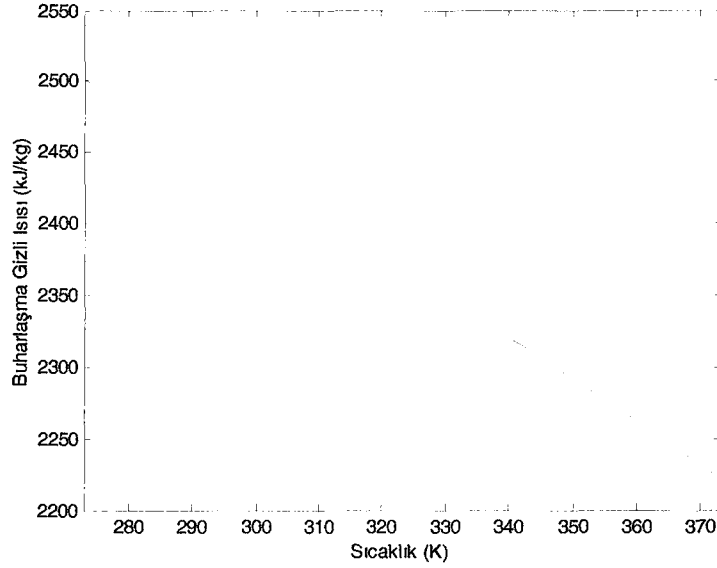
Perry'e (1984) göre bir kilogram suyun buharlaştırılması için harcanan birim gizli enerji sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Eğer T_l sıcaklığındaki $\Delta H_{v,l}$ değeri biliniyorsa, T sıcaklığındaki ΔH_v değeri de şu şekilde bulunabilir:

$$\Delta H_v(T) = \Delta H_{v,l} \left(\frac{1 - T_r}{1 - T_{r,l}} \right)^{0.38} \quad (A.4)$$

$$T_r = \frac{T}{T_{c,w}} \quad \text{ve} \quad T_{r,l} = \frac{T_l}{T_{c,w}} \quad (A.5)$$

Burada T_r indirgenmiş sıcaklık terimini, $T_{c,w}$ suyun kritik sıcaklığını göstermektedir. $T_{c,w}$ suyun kritik sıcaklığının değeri 647.3 K (374.15°C)'dir.

Şekil A.3’de, $T_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ve $\Delta H_{vl} = 2501\text{ kJ/kg}$ değerleri alınarak bulunan buharlaşma gizli ısısının sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir.



Şekil A.3. Buharlaşma gizli ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.

A.4. Siklondan Uzaklaşan Mayanın Kuru Madde Miktarı ve Su Miktarı Değişimlerinin Hesaplanması

İdeal olarak sisteme beslenen mayanın kuru madde kütlesi, kurutma süreci boyunca kurutma fırını içinde sabit kalmakta ve herhangi bir kayba uğramamaktadır. Ancak, siklonlardan bir miktar toz şeklinde maya uzaklaştığı deneysel yolla tespit edilmiş olup, bundan dolayı uzaklaşan mayanın kuru madde miktarı ile mayanın taşıdığı su miktarı değişiminin tespiti için deneysel çalışma yapılmış ve Tablo A.3 ve A.4’deki değerler elde edilmiştir (Kanarya 2002). Bu değerler göz önüne alınarak uzaklaşan mayanın kuru madde miktarı ile mayanın taşıdığı su miktarı değişimleri denklem A.6 ve A.7’deki gibi elde edilebilir.

$$m_y^o(k) = C_0 k^6 + C_1 k^5 + C_2 k^4 + C_3 k^3 + C_4 k^2 + C_5 k + C_6 \quad (\text{A.6})$$

$$w_y^o(k) = C_0 k^6 + C_1 k^5 + C_2 k^4 + C_3 k^3 + C_4 k^2 + C_5 k + C_6 \quad (\text{A.7})$$

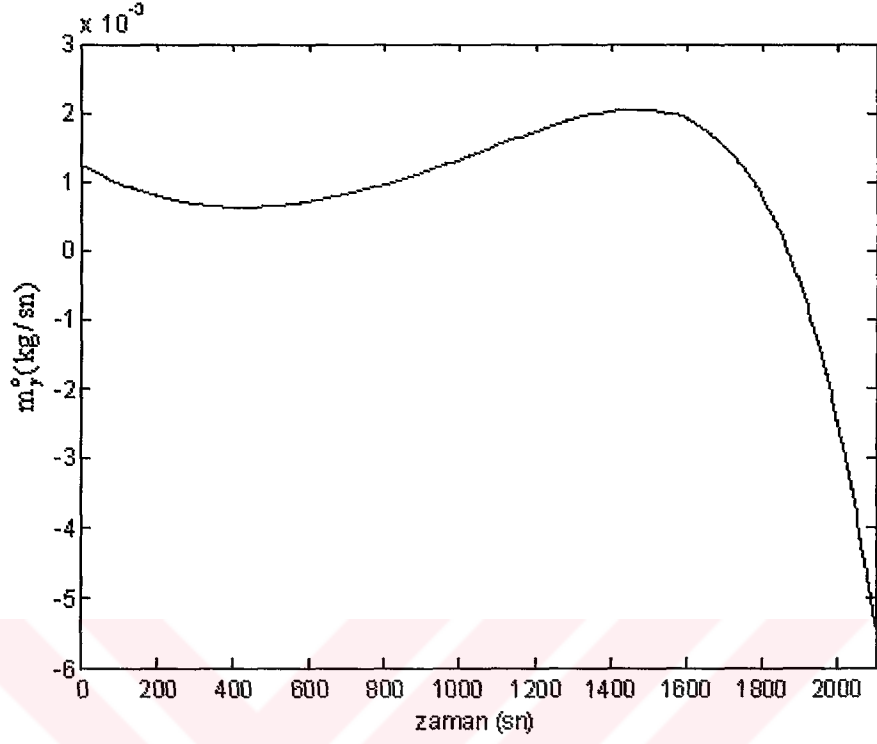
Tablo A.3. Denklem A.6’da kullanılan sabit C değerleri.

C_0	-7.7589156	E - 22	C_4	+4.0428490	E - 09
C_1	+2.6330587	E - 18	C_5	-3.0839266	E - 06
C_2	-3.3018886	E - 15	C_6	+0.1236666	E - 02
C_3	+5.6042710	E - 13			

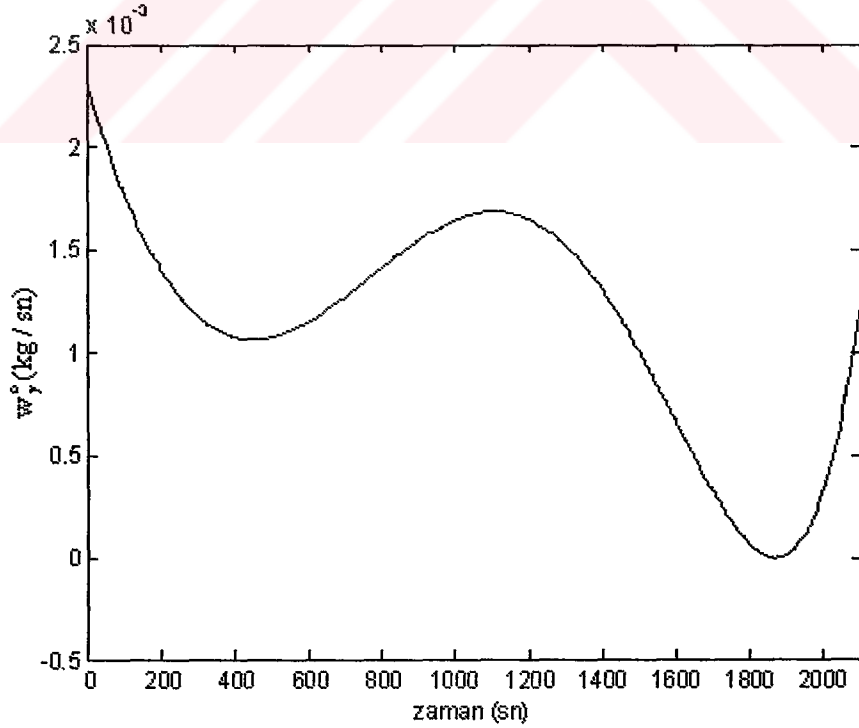
Tablo A.4. Denklem A.7’de kullanılan sabit C değerleri.

C_0	+7.7589156	E - 22	C_4	+1.0446039	E - 08
C_1	-2.6330587	E - 18	C_5	-6.4036734	E - 06
C_2	+3.3018886	E - 15	C_6	+2.2966673	E - 03
C_3	-6.1468467	E - 12			

Şekil A.4 ve A.5’de mayanın kuru madde içeriğinin yataktan uzaklaşma hızı ile mayanın su içeriğinin yataktan uzaklaşma hızı gösterilmiştir.



Şekil A.4. Sürüklenen maya ile uzaklaşan kuru madde kesrinin yataktan uzaklaşma hızı.



Şekil A.5. Sürüklenen maya ile uzaklaşan su kesrinin yataktan uzaklaşma hızı.

A.5. Bağıl Nemin Hesaplanması (rH)

Kurutma sürecindeki sınır koşullarından biri de, “Bağıl nem % 100’ün üzerine çıkamaz.” koşuludur. Bağıl nem, herhangi bir anda havadaki su buharının kısmi basıncının, havadaki su buharının o anki sıcaklıktaki doyum basıncına oranı ile ifade edilebilir:

$$rH = 100 \frac{P}{P_{ws}} \quad (A.8)$$

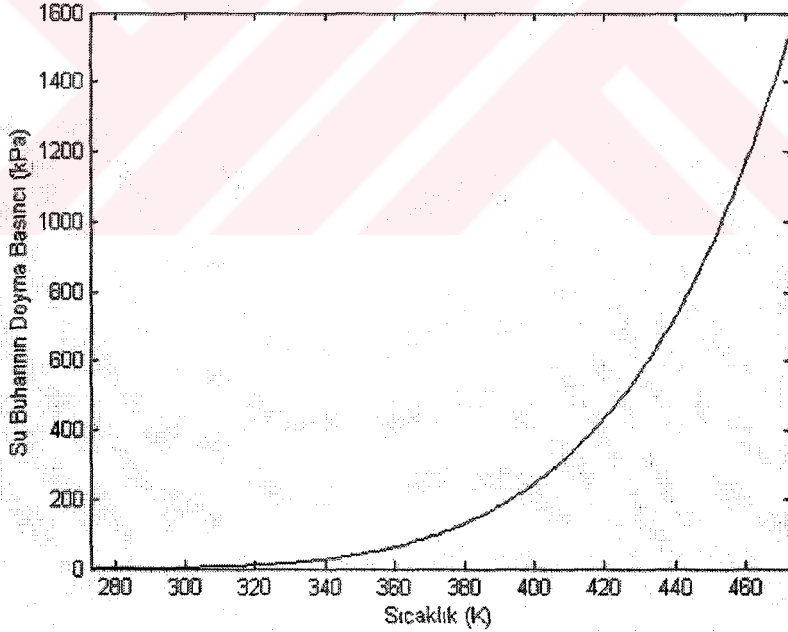
Ashrae’e (2001) göre havadaki su buharının doyma basıncı ifadesi, 0 °C-200 °C arasında şu şekildedir:

$$\ln(P_{ws}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6 \ln(T) \quad (A.9)$$

Burada T sıcaklığı (Kelvin) göstermektedir ve bu denklemdaki sabit C değerleri Tablo 3.5’de verilmiştir. Şekil A.6’da havadaki su buharının doyma basıncının (P_{ws}) sıcaklıkla değişim grafiği gösterilmiştir.

Tablo A.5. Denklem A.9’da kullanılan sabit C değerleri.

C_1	-5.8002206	E + 03	C_4	+4.1764768	E - 05
C_2	+1.3914993	E + 00	C_5	-1.4452093	E - 08
C_3	-4.8640239	E - 02	C_6	+6.5459673	E + 00



Şekil A.6. Havadaki su buharının doyma basıncının sıcaklıkla değişimi.

Havadaki su buharının kısmi basınç ifadesi havanın çıkış nemi ile değişir ve şöyledir (Strumillo and Kudra 1986) :

$$P = 101.325 \frac{X_o}{0.622 + X_o} \quad (A.10)$$

$$X_o = \frac{w_a^i + M_y J}{m_a^i} \quad (A.11)$$

Burada X_o çıkış nemini (kg su / kg kuru hava) göstermektedir. Denklem A.9 ve A.10 denklem A.8'de yerine konursa bağıl nem ifadesini gösteren denklem A.12 elde edilir:

$$rH = 100 \cdot \frac{\left(\frac{101.325 X_o}{0.622 + X_o} \right)}{\exp(C_1 / T + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln(T))} \quad (\text{A.12})$$



EK B. KURUTMA SÜRECİNİN HOMOJEN MODELLEMESİ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI

% bir kurutma prosesinin modellenmesi (eylül 2002)

% baslangic kosullari

```
%-----  
v_a1=(16000/3600)*(996/1000);  
v_wv1=(16000/3600)*(4/1000);  
v_a2=(12000/3600)*(996/1000);  
v_wv2=(12000/3600)*(4/1000);  
v_w=(250/480)*63.2/100;  
v_y=(250/480)*36.8/100;  
c_w=4.18;  
c_a=1.011;  
T_y=289-273;  
T_a1=373;  
T_a2=323;  
T0=289;  
c_y0=3.14;  
k=2100; %adim sayisi  
%-----  
T=zeros(k,1); T_a=zeros(k,1); c_y=zeros(k,1); m_by=zeros(k,1); m_bw=zeros(k,1);  
m_w_out=zeros(k,1); m_ss=zeros(k,1); r_w=zeros(k,1); r_w1=zeros(k,1); r_w2=zeros(k,1);  
c_wv=zeros(k,1); deltaHv=zeros(k,1); v_y_o=zeros(k,1); v_w_o=zeros(k,1); X=zeros(k,1);  
Y=zeros(k,1); rH=zeros(k,1); Pa=zeros(k,1); Pa_eq=zeros(k,1); A=zeros(k,1); B=zeros(k,1);  
C=zeros(k,1); X_eq=zeros(k,1); v_a=zeros(k,1); v_wv=zeros(k,1); kk=1900;  
%-----  
load pakmayadata.mat  
for k=1:35,  
    if k==1,  
        va(k,1)=(v_a1(k)-3)/60;  
        vwv(k,1)=(v_wv1(k)-0.013)/60;  
        Ta(k,1)=(T_a_pak(k)-300+273)/60;  
    else  
        va(k,1)=(v_a1(k)-v_a1(k-1))/60;  
        vwv(k,1)=(v_wv1(k)-v_wv1(k-1))/60;  
        Ta(k,1)=(T_a_pak(k)-T_a_pak(k-1))/60;  
    end  
end  
  
for k=1:35,  
    if k==1,  
        for m=1:60,  
            v_a((m+(k-1)*60),1)=3+m*va(k,1);  
            v_wv((m+(k-1)*60),1)=0.013+m*vwv(k,1);  
            T_a((m+(k-1)*60),1)=300-273+m*Ta(k,1);  
        end  
    else  
        for m=1:60,  
            v_a((m+(k-1)*60),1)=v_a((m+(k-1)*60)-1,1)+va(k,1);  
            v_wv((m+(k-1)*60),1)=v_wv((m+(k-1)*60)-1,1)+vwv(k,1);  
            T_a((m+(k-1)*60),1)=T_a((m+(k-1)*60)-1,1)+Ta(k,1);  
        end  
    end  
end  
end
```

```

%-----
% modelle ilgili hesaplamalar:
%-----
Xg=63.2/36.8+0.045; Xeq=0.03; ks=2.33/1000; h=0.25;

%-----
% yükleme evresi başlıyor...
%-----

for k=1:480,

if k==1,
deltaHv(k,1)=2501*((1-(T0/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;
c_wv(k,1)=4.184*(T0*1.5e-4+T0^2*1.34e-6+8.22)/18;

v_y_o(k,1)=-7.7589156e-22*k^6+...
    2.6330587e-18*k^5+...
    -3.3018886e-15*k^4+...
    5.6042710e-13*k^3+...
    4.04284900e-9*k^2+...
    -3.08392660e-6*k^1+...
    0.1236666e-2;

v_w_o(k,1)= 7.7589156e-22*k^6+...
    -2.6330587e-18*k^5+...
    3.3018886e-15*k^4+...
    -6.1468467e-12*k^3+...
    1.0446039e-8*k^2+...
    -6.4036734e-6*k^1+...
    2.2966673e-3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m_by(k,1)=v_y-v_y_o(k,1);
c(1,1)=(v_w-v_w_o(k,1)+ks*Xeq*Xg*m_by(k,1))*m_by(k,1);
a(1,1)=ks;
b(k,1)=-m_by(k,1)*(ks*(Xeq+Xg)+1);
delta(k,1)=b(k,1)^2-4*a(k,1)*c(k,1);
m_bw(k,1)=(-b(k,1)-(delta(k,1)^0.5))/(2*a(k,1));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

X(k,1)=m_bw(k,1)/m_by(k,1);
r_w1(k,1)=(Xg-X(k,1))*(X(k,1)-Xeq)*m_by(k,1)*ks;

Y(k,1)=100*m_by(k,1)/(m_by(k,1)+m_bw(k,1));
c_y(k,1)=-6e-6*Y(k,1)^3+8e-4*Y(k,1)^2+...
    -5.34e-2*Y(k,1)+4.2672;

r_w(k,1)=r_w1(k,1);

X_out=(r_w(k,1)+v_wv(k,1))/v_a(k,1);
Pa(k,1)=X_out*101325/(0.622+X_out);

hh=r_w(k,1);
m_w_out(k,1)=hh;
% Yatak sıcaklığını bulmak için gerekli adi dif. Denklemdaki A,B,C katsayıları hesabı
A(k,1)=c_y(k,1)*v_y*T_y+c_w*v_w*T_y+c_a*v_a(k,1)*T_a(k,1)+c_wv(k,1)*v_wv(k,1)*T_a(k,1)-
r_w(k,1)*deltaHv(k,1);

```


$$B(k,1)=v_y*c_y(k,1)+(c_y(k,1)-c_y0)*m_by(k,1)+c_wv(k,1)*(v_wv(k,1)+r_w(k,1))+(v_w-r_w(k,1))*c_w+c_a*v_a(k,1);$$

$$C(k,1)=c_y(k,1)*m_by(k,1)+c_w*m_bw(k,1);$$

 % Runge-kutta ile yatak sıcaklığının bulunması
 %-----

$$\begin{aligned} T0 &= T0-273; \\ k0 &= (A(k,1)-B(k,1)*T0)/C(k,1); \\ k1 &= (A(k,1)-B(k,1)*(T0+0.5*k0*h))/C(k,1); \\ k2 &= (A(k,1)-B(k,1)*(T0+0.5*k1*h))/C(k,1); \\ k3 &= (A(k,1)-B(k,1)*(T0+k2*h))/C(k,1); \\ T(k,1) &= T0+(k0+2*k1+2*k2+k3)*h/6; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pa_eq(k,1) &= \exp(-5.8e3/T(k,1)-4.86e-2*T(k,1)+1.3914993+... \\ &\quad 4.18e-5*T(k,1)^2-1.45e-8*T(k,1)^3+... \\ &\quad 6.545973*\log(T(k,1))); \\ X_eq(k,1) &= (Pa_eq(k,1)*622e-3)/(101325-Pa_eq(k,1)); \\ r_w2(k,1) &= (X_eq(k,1)-(v_wv(k,1)/v_a(k,1)))*v_a(k,1); \\ rH(k,1) &= 100*Pa(k,1)/Pa_eq(k,1); \end{aligned}$$

else %%% if k==1,...

$$\begin{aligned} \text{deltaHv}(k,1) &= 2501*((1-(T(k-1,1)/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38; \\ c_wv(k,1) &= 4.184*(T(k-1,1)*1.5e-4+T(k-1,1)^2*1.34e-6+8.22)/18; \\ v_y_o(k,1) &= -7.7589156e-22*k^6+... \\ &\quad 2.6330587e-18*k^5+... \\ &\quad -3.3018886e-15*k^4+... \\ &\quad 5.6042710e-13*k^3+... \\ &\quad 4.04284900e-9*k^2+... \\ &\quad -3.08392660e-6*k^1+... \\ &\quad 0.1236666e-2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_w_o(k,1) &= 7.7589156e-22*k^6+... \\ &\quad -2.6330587e-18*k^5+... \\ &\quad 3.3018886e-15*k^4+... \\ &\quad -6.1468467e-12*k^3+... \\ &\quad 1.0446039e-8*k^2+... \\ &\quad -6.4036734e-6*k^1+... \\ &\quad 2.2966673e-3; \end{aligned}$$

%%%

$$\begin{aligned} m_by(k,1) &= m_by(k-1,1)+v_y-v_y_o(k,1); \\ c(k,1) &= (m_bw(k-1,1)+v_w-v_w_o(k,1)+ks*Xeq*Xg*m_by(k,1))*m_by(k,1); \\ a(k,1) &= ks; \\ b(k,1) &= -m_by(k,1)*(ks*(Xeq+Xg)+1); \\ \text{delta}(k,1) &= b(k,1)^2-4*a(k,1)*c(k,1); \\ m_bw(k,1) &= (-b(k,1)-(\text{delta}(k,1))^0.5)/(2*a(k,1)); \end{aligned}$$

%%%

$$\begin{aligned} X(k,1) &= m_bw(k,1)/m_by(k,1); \\ r_w1(k,1) &= (Xg-X(k,1))*(X(k,1)-Xeq)*m_by(k,1)*ks; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y(k,1) &= 100*m_by(k,1)/(m_by(k,1)+m_bw(k,1)); \\ c_y(k,1) &= -6e-6*Y(k,1)^3+8e-4*Y(k,1)^2+... \\ &\quad -5.34e-2*Y(k,1)+4.2672; \\ r_w(k,1) &= r_w1(k,1); \end{aligned}$$

```

X_out=(r_w(k,1)+v_wv(k,1))/v_a(k,1);
Pa(k,1)=X_out*101325/(0.622+X_out);
hh=r_w(k,1);
m_w_out(k,1)=hh+m_w_out(k-1,1);
T(k-1,1)=T(k-1,1)-273;

A(k,1)=c_y(k,1)*v_y*T_y+c_w*v_w*T_y+c_a*v_a(k,1)*T_a(k,1)+c_wv(k,1)*v_wv(k,1)*T_a(k,1)-
r_w(k,1)*deltaHv(k,1);

B(k,1)=v_y*c_y(k,1)+(c_y(k,1)-c_y(k-1,1))*m_by(k,1)+c_wv(k,1)*(v_wv(k,1)+r_w(k,1))+(v_w-
r_w(k,1))*c_w+c_a*v_a(k,1);

C(k,1)=c_y(k,1)*m_by(k,1) + c_w*m_bw(k,1);

%-----
% Runge-kutta ile yatak sıcaklığının bulunması
%-----
k0=(A(k,1)-B(k,1)*T(k-1,1))/C(k,1);
k1=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k0*h))/C(k,1);
k2=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k1*h))/C(k,1);
k3=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+k2*h))/C(k,1);
T(k,1)=T(k-1,1)+(k0+2*k1+2*k2+k3)*h/6;

Pa_eq(k,1)=exp(-5.8e3/T(k,1)-4.86e-2*T(k,1)+1.3914993+...
4.18e-5*T(k,1)^2-1.45e-8*T(k,1)^3+...
6.545973*log(T(k,1)));
X_eq(k,1)=(Pa_eq(k,1)*622e-3)/(101325-Pa_eq(k,1));
r_w2(k,1)=(X_eq(k,1)-(v_wv(k,1)/v_a(k,1)))*v_a(k,1);
rH(k,1)=100*Pa(k,1)/Pa_eq(k,1);

end %%% if k==1,...
end %%% for k=1:480,

%-----
% yükleme evresi bitti!!!!!!
%-----
v_w=0; v_y=0; va1=0; vwv1=0; Ta1=0;

for k=481:2100,

deltaHv(k,1)=2501*((1-(T(k-1,1)/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;
c_wv(k,1)=4.184*(T(k-1,1))*1.5e-4+T(k-1,1)^2*1.34e-6+8.22/18;
v_y_o(k,1)=-7.7589156e-22*k^6+...
2.6330587e-18*k^5+...
-3.3018886e-15*k^4+...
5.6042710e-13*k^3+...
4.04284900e-9*k^2+...
-3.08392660e-6*k^1+...
0.1236666e-2;

v_w_o(k,1)= 7.7589156e-22*k^6+...
-2.6330587e-18*k^5+...
3.3018886e-15*k^4+...
-6.1468467e-12*k^3+...
1.0446039e-8*k^2+...
-6.4036734e-6*k^1+...
2.2966673e-3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m_by(k,1)=m_by(k-1,1)+v_y-v_y_o(k,1);

```

```

c(k,1)=(m_bw(k-1,1)+v_w-v_w_o(k,1)+ks*Xeq*Xg*m_by(k,1))*m_by(k,1);
a(k,1)=ks;
b(k,1)=-m_by(k,1)*(ks*(Xeq+Xg)+1);
delta(k,1)=b(k,1)^2-4*a(k,1)*c(k,1);
m_bw(k,1)=(-b(k,1)-(delta(k,1))^0.5)/(2*a(k,1));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

X(k,1)=m_bw(k,1)/m_by(k,1);
r_w1(k,1)=(Xg-X(k,1))*(X(k,1)-Xeq)*m_by(k,1)*ks;

Y(k,1)=100*m_by(k,1)/(m_by(k,1)+m_bw(k,1));
c_y(k,1)=-6e-6*Y(k,1)^3+8e-4*Y(k,1)^2+...
-5.34e-2*Y(k,1)+4.2672;

r_w(k,1)=r_w1(k,1);

X_out=(r_w(k,1)+v_wv(k,1))/v_a(k,1);
Pa(k,1)=X_out*101325/(0.622+X_out);

hh=v_w_o(k,1)+r_w(k,1);
m_w_out(k,1)=hh+m_w_out(k-1,1);
T(k-1,1)=T(k,1)-273;

A(k,1)=c_y(k,1)*v_y*T_y+c_w*v_w*T_y+c_a*v_a(k,1)*T_a(k,1)+c_wv(k,1)*v_wv(k,1)*T_a(k,1)-
r_w(k,1)*deltaHv(k,1);

B(k,1)=v_y*c_y(k,1)+(c_y(k,1)-c_y(k-1,1))*m_by(k,1)+c_wv(k,1)*(v_wv(k,1)+r_w(k,1))+(v_w-
r_w(k,1))*c_w+c_a*v_a(k,1);

C(k,1)=c_y(k,1)*m_by(k,1) + c_w*m_bw(k,1);

%-----
% Runge-kutta ile yatak sıcaklığının bulunması
%-----
k0=(A(k,1)-B(k,1)*T(k-1,1))/C(k,1);
k1=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k0*h))/C(k,1);
k2=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k1*h))/C(k,1);
k3=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+k2*h))/C(k,1);
T(k,1)=T(k-1,1)+(k0+2*k1+2*k2+k3)*h/6;

Pa_eq(k,1)=exp(-5.8e3/T(k,1)-4.86e-2*T(k,1)+1.3914993+...
4.18e-5*T(k,1)^2-1.45e-8*T(k,1)^3+...
6.545973*log(T(k,1)));
rH(k,1)=100*Pa(k,1)/Pa_eq(k,1);

% havanın bağıl nemine bakılıyor...
%-----
if rH(k)>100,
% mayanın su verebilmesi düşürülüyor...
for m=1:1000,
r_w(k,1)=r_w(k,1)-0.0001;
m_bw(k,1)=m_bw(k-1,1)+v_w-v_w_o(k,1)-r_w(k,1);
Y(k,1)=100*m_by(k,1)/(m_by(k,1)+m_bw(k,1));
c_y(k,1)=-6e-6*Y(k,1)^3+8e-4*Y(k,1)^2+...
-5.34e-2*Y(k,1)+4.2672;
X_out=(r_w(k,1)+v_wv(k,1))/v_a(k,1);
Pa(k,1)=X_out*101325/(0.622+X_out);

```

```
A(k,1)=c_y(k,1)*v_y*T_y+c_w*v_w*T_y+c_a*v_a(k,1)*T_a(k,1)+c_wv(k,1)*v_wv(k,1)*T_a(k,1)-
r_w(k,1)*deltaHv(k,1);
```

```
B(k,1)=v_y*c_y(k,1)+(c_y(k,1)-c_y(k-1,1))*m_by(k,1) + c_wv(k,1)*(v_wv(k,1)+r_w(k,1))+(v_w-
r_w(k,1))*c_w+c_a*v_a(k,1);
```

```
C(k,1)=c_y(k,1)*m_by(k,1) + c_w*m_bw(k,1);
```

```
%-----
% Runge-kutta ile yatak sıcaklığının bulunması
%-----
```

```
k0=(A(k,1)-B(k,1)*T(k-1,1))/C(k,1);
k1=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k0*h))/C(k,1);
k2=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k1*h))/C(k,1);
k3=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+k2*h))/C(k,1);
T(k,1)=T(k-1,1)+(k0+2*k1+2*k2+k3)*h/6;
%T(k+1,1)=(T(k,1)*C(k,1)+A(k,1))/(B(k,1)+C(k,1));
%-----
```

```
Pa_eq(k,1)=exp(-5.8e3/T(k,1)-4.86e-2*T(k,1)+1.3914993+...
4.18e-5*T(k,1)^2-1.45e-8*T(k,1)^3+...
6.545973*log(T(k,1)));
```

```
rH(k,1)=100*Pa(k,1)/Pa_eq(k,1);
end % for ...
rH(k)=100;
end % if...
```

```
X_eq(k,1)=(Pa_eq(k,1)*622e-3)/(101325-Pa_eq(k,1));
r_w2(k,1)=(X_eq(k,1)-(v_wv(k,1)/v_a(k,1)))*v_a(k,1);
```

```
if T_a(k,1) <= T_a2,
va=0; v_wv=0; Ta=0;
end
```

```
m_w_out(k,1)=m_w_out(k-1,1)+r_w(k,1);
```

```
A(k,1)=c_y(k,1)*v_y*T_y+c_w*v_w*T_y+c_a*v_a(k,1)*T_a(k,1)+c_wv(k,1)*v_wv(k,1)*T_a(k,1)-
r_w(k,1)*deltaHv(k,1);
```

```
B(k,1)=v_y*c_y(k,1)+(c_y(k,1)-c_y(k-1,1))*m_by(k,1)+c_wv(k,1)*(v_wv(k,1)+r_w(k,1))+(v_w-
r_w(k,1))*c_w+c_a*v_a(k,1);
```

```
C(k,1)=c_y(k,1)*m_by(k,1)+c_w*m_bw(k,1);
```

```
%-----
% Runge-kutta ile yatak sıcaklığının bulunması
%-----
```

```
k0=(A(k,1)-B(k,1)*T(k-1,1))/C(k,1);
k1=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k0*h))/C(k,1);
k2=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+0.5*k1*h))/C(k,1);
k3=(A(k,1)-B(k,1)*(T(k-1,1)+k2*h))/C(k,1);
T(k,1)=T(k-1,1)+(k0+2*k1+2*k2+k3)*h/6;
```

```
Pa_eq(k,1)=exp(-5.8e3/T(k,1)-4.86e-2*T(k,1)+1.3914993+...
4.18e-5*T(k,1)^2-1.45e-8*T(k,1)^3+...
6.545973*log(T(k,1)));
```

```
rH(k,1)=100*Pa(k,1)/Pa_eq(k,1);
```

```
end %%% for =481:2100,...
```

```

%-----çizim-----
t1=[0:k]; t2=[0:k-1]; figure;

subplot(341); plot(t2,m_by); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('kuru maya kütlesi(kg)');
subplot(342); plot(t2,m_bw); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('su kütlesi(kg)');
subplot(343); plot(t2,c_y); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('mayan özgül isisi(J/kgK)');
subplot(344); plot(t2,c_wv); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('su buhari özgül isisi(J/kgK)');
subplot(345); plot(t2,deltaHv); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('buharlasma gizli isisi(J/kg)');
subplot(346); plot(t2,Y); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('mayanin rutubeti %');
subplot(347); plot(t2,X); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('mayanin nem kesri');
subplot(348); plot(t2,T_a); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('havanin sicakligi(K)');
subplot(349); plot(t2,rH); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('bagil nem');
subplot(3,4,10); plot(t2,r_w2); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('havanin su alabilme kapasitesi');
subplot(3,4,11); plot(t2,r_w1); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('mayanin su verebilme kapasitesi');
subplot(3,4,12); plot(t2,r_w); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('buharlasma hizi');

figure;
subplot(221); plot(t2,v_y_o); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('siklondan uzaklasan mayanin hizi');
subplot(222); plot(t2,v_w_o); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('siklondan uzaklasan suyun hizi');
subplot(223); plot(t2,m_w_out); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('firindan uzaklasan suyun kütlesi');
subplot(224); plot((1:35),T(60:60:2100),'',(1:35),T_pak,'o'); xlabel('zaman(sn)'); ylabel('sicaklik');

```



EK C. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GRANÜL BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLEMESİ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMLARI

C.1. Silindirik Granüllü Ekmek Mayasının Büzülen Granül Tabanlı Kurutma Modellemesi için Yazılan 1. Matlab Programı

% silindirik büzülen granüllü mayanın kurutma sürecinin modellenmesi (haziran 2003)
% yükleme evresini çıkarttığım için toplam 35dk'lık simülasyon süresi 27dk'dır.
% difüzyon diferansiyel denkleminin çözümü Crank-Nicolson yöntemi ile
% granül içerisindeki sıcaklık kısmi dif denklemini Crank-Nicolson yöntemi ile çözülmüştür.

```
clc ; close all; clear all  
load pakmaya_data27min
```

```
R=8.314; %J/mol.K  
T_ref=323.15; %K  
a=0.154;  
D0=4.89e-10; %m2/s  
T(1,1)=289.90;  
Tp0=T(1,1);  
fi=10; % boyutsuz düzlem araligi...  
R0=0.0005; %m  
R1=R0/fi; %m  
t=60*27; %simülasyon süresi sn  
X0=1.563;  
X_eq=0.002;  
e=0.3 % büzülme katsayisi...  
d_s=1100/(1+X0*(1-e)); %kg/m3  
d_m=1000; %kg/m3  
K=0.9458; W=0.0482; C=23.5737; Es=13774;  
kg_eff=0.0035; %deneyssel bulunuyor 0.05 ile 0.06 arasi(A simplified calculation...) m/s  
c_a=1010; %J/kgK  
c_w=4184; %J/kgK  
c_wv=2000; %J/kgK  
lmd_m=0.464; % maddenin termal iletkenligi J/Kms
```

% kurutma modeli parametreleri ve başlangıç değerlerinin girilmesi...

```
%-----  
Rd=R0*((d_m+e*d_s*X0)/(d_m+e*d_s*X0))^(1/2);  
RR(1,1)=Rd;  
X(1,1:fi+1)=X0;  
Tp(1,1:fi+1)=Tp0;  
su=length(X(1,:));  
r_ara=(Rd-R1)/fi;  
%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabı...  
X_gecici=X.*(R1:r_ara:Rd);  
X_ort(1,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2);  
q_s(1,1)=1/((1/d_s)+(e*X_ort(1,1)/d_m));  
q_sp(1,:)=1/((1/d_s)+(e.*X(1,:)/d_m));  
q_m(1,1)=X_ort(1,1)/((1/d_s)+(e*X_ort(1,1)/d_m));  
q_mp(1,:)=X(1,:)/((1/d_s)+(e.*X(1,:)/d_m));  
q_ort(1,1)=q_s(1,1)+q_m(1,1);  
Y(1,1)=100*(1/(1+X_ort(1,1))); % kg kuru madde/kg toplam (%)...  
c_y(1,1)=(-6e-6*Y(1,1)^3+8e-4*Y(1,1)^2-5.34e-2*Y(1,1)+4.2672)*1000;%J/kgK  
Ed=80000*((1/(1+10*X_ort(1,1)))+0.147);% lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
```

```

for k=1:fi+1,
    D(k)=D0*exp((-Ed/R)*((1/Tp(1,k))-(1/T_ref)))*((X(1,k)-X_eq)/(X0-X_eq))^a;
end

d_a(1,1)=353.128/T(1,1); % National Research Council, internal critical tables
d_wv(1,1)=220.705/T(1,1); % E.W.Washburn, McGraw-1926...
%-----
%W/mK "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
lamda_air(1,1)=4.5e-3+7.26e-5*T(1,1);
% m2/s "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
D_a(1,1)=5.28e-9*(T(1,1)^(3/2));
%-----
% "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
q_mg_sat(1,1)=(2.1936e-3/T(1,1))*exp((-7246.5822/T(1,1))+77.641232+5.7447142e-3*T(1,1)-...
8.2470402*log(T(1,1)));
deltaHv_p(1,1)=2501*1000*((1-(Tp(1,su)/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;

% GAB'den aw hesabi...
X_i(1,1)=X(1,su);
Wr=W*exp(-(Es/R)*((1/313)-(1/T(1,1))));
bb=C*(1-(Wr/X_i(1,1)))-2;
aa=K*(1-C);
cc=1/K;
dd=bb^2-(4*aa*cc);
if X_i(1,1)==0,
    aw(1,1)=0;
elseif C==1,
    aw(1,1)=X_i(1,1)/(K*(Wr+X_i(1,1)));
else
    aw(1,1)=(-bb-(dd)^0.5)/(2*aa);
end
%-----
q_mgb(1,1)=d_wv(1,1)*X_mgb(1,1);
q_mgi(1,1)=q_mg_sat(1,1)*aw(1,1); % lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
js_mi(1,1)=kg_eff*(q_mgi(1,1)-q_mgb(1,1)); % kg/m2s lio,luyben ve bruin "a simplified calc. meth."
%-----

w_mgi(1,1)=q_mgi(1,1)/(q_mgi(1,1)*(1-(d_a(1,1)/d_wv(1,1)))+d_a(1,1)); % kg su buh./kg top.hava
w_mgb(1,1)=q_mgb(1,1)/(q_mgb(1,1)*(1-(d_a(1,1)/d_wv(1,1)))+d_a(1,1)); % kg su buh./kg top.hava

% stefan diffusion correction "transport phenomena"
kg(1,1)=kg_eff*(w_mgi(1,1)-w_mgb(1,1))/log((1-w_mgb(1,1))/(1-w_mgi(1,1)));

% mass trans. kats. m/s chilton-colburn analogy...
alfa(1,1)=kg(1,1)*((d_a(1,1)*c_a)^(1/3))*((lamda_air(1,1)/D_a(1,1))^(2/3));
par1(1,1)=js_mi(1,1)*c_wv/alfa(1,1); % yardimci parametre
if par1(1,1)<0.1,
    alfa_eff(1,1)=alfa(1,1)*(1-par1(1,1)/2); % "transport phenomena"
else
    alfa_eff(1,1)=alfa(1,1)*(par1(1,1)/(exp(par1(1,1))-1)); % "transport phenomena"
end

h=alfa_eff(1,1);
J_T(1,1)=h*(Tp(1,su)-T_a(1))+js_mi(1,1)*deltaHv_p(1,1);
lmd_x=lmd_m./(q_sp(1,:).*(c_y(1,1)+c_w*X));
%-----
dilara=1; % örnekleme süresi...
q_s_tur(1,1)=0; A=[]; Aa=[]; c_s_tur(1,1)=0; q_m_tur(1,1)=0;
i=2;j=1;

```

```

for t_d=1:dilara:t,
    kg_eff=kg_eff+t_d/7e8;

    clear A; % A matrisini temizliyorum...
    clear S; % S vektörünü temizliyorum...
    clear Aa; % Aa matrisini temizliyorum...
    clear Ss; % Ss vektörünü temizliyorum...

% Crank-Nicolson yöntemi ile sıcaklık ve nem difüzyon dif. denklemlerin çözümü...

for f=0:1:fi,
    r=r_ara*f+R1;

if f==0, % B.C...

    B1=dilara*((2*D(j)*q_sp(i-1,j)/r)+((D(j+1)-D(j))*q_sp(i-1,j)/r_ara)+...
        (D(j)*(q_sp(i-1,j+1)-q_sp(i-1,j))/r_ara))/r_ara;
    B2=dilara*D(j)*q_sp(i-1,j)/(2*(r_ara)^2);
    B3=q_s_tur(i-1,1)*dilara-q_sp(i-1,j);
    B4=q_sp(i-1,j);
    B=[0 (B4+2*B2) -2*B2];
    S(j,1)=(B1+2*B2)*X(i-1,j+1)-(B3+B1+2*B2)*X(i-1,j);
    A(j,j+2)=B;

    A1=dilara*((2*lmd_x(j)/r)+((lmd_x(j+1)-lmd_x(j))/r_ara))/(2*r_ara);
    A2=dilara*lmd_x(j)/(2*(r_ara)^2);
    Bb=[0 (1+A1+2*A2) -(A1+2*A2)];
    Ss(j,1)=(1-A1-2*A2)*Tp(i-1,j)+(A1+2*A2)*Tp(i-1,j+1);
    Aa(j,j+2)=Bb;

elseif f==fi, % B.C...

    B1=dilara*((2*D(j)*q_sp(i-1,j)/r)+((D(j)-D(j-1))*q_sp(i-1,j)/r_ara)+...
        (D(j)*(q_sp(i-1,j)-q_sp(i-1,j-1))/r_ara))/r_ara;
    B2=dilara*D(j)*q_sp(i-1,j)/(2*(r_ara)^2);
    B3=q_s_tur(i-1,1)*dilara-q_sp(i-1,j);
    B4=q_sp(i-1,j);
    B=[-2*B2 (B4+2*B2) 0];
    S(j,1)=(B1+2*B2)*X(i-1,j-1)-(B3+B1+2*B2)*X(i-1,j)-...
        (B1+2*B2)*2*r_ara*js_mi(i-1,1)/(D(j)*q_sp(i-1,j));
    A(j,j+2)=B;

    A1=dilara*((2*lmd_x(j)/r)+((lmd_x(j)-lmd_x(j-1))/r_ara))/(2*r_ara);
    A2=dilara*lmd_x(j)/(2*(r_ara)^2);
    Bb=[-(A1+2*A2) (1+A1+2*A2) 0];
    Ss(j,1)=(1-A1-2*A2)*Tp(i-1,j)+(A1+2*A2)*Tp(i-1,j-1)-(A1+A2)*4*r_ara*J_T(i-1)/lmd_m;
    Aa(j,j+2)=Bb;

else

    B1=dilara*((2*D(j)*q_sp(i-1,j)/r)+((D(j+1)-D(j))*q_sp(i-1,j)/r_ara)+...
        (D(j)*(q_sp(i-1,j+1)-q_sp(i-1,j))/r_ara))/r_ara;
    B2=dilara*D(j)*q_sp(i-1,j)/(2*(r_ara)^2);
    B3=q_s_tur(i-1,1)*dilara-q_sp(i-1,j);
    B4=q_sp(i-1,j);
    B=[-B2 (B4+2*B2) -B2];
    S(j,1)=(B1+B2)*X(i-1,j+1)+B2*X(i-1,j-1)-(B3+B1+2*B2)*X(i-1,j);
    A(j,j+2)=B;

```



```

A1=dilara*((2*lmd_x(j)/r)+((lmd_x(j+1)-lmd_x(j))/r_ara))/(2*r_ara);
A2=dilara*lmd_x(j)/(2*(r_ara)^2);
Bb=[-A2 (1+A1+2*A2) -(A1+A2)];
Ss(j,1)=A2*Tp(i-1,j-1)+(1-A1-2*A2)*Tp(i-1,j)+(A1+A2)*Tp(i-1,j+1);
Aa(j,j+2)=Bb;

end
j=j+1;
end % for R_d...

A=A(:,2:length(A)-1);
Aa=Aa(:,2:length(Aa)-1);
X(i,1:length(A))=(inv(A)*S)';
Tp(i,1:length(Aa))=(inv(Aa)*Ss)';

% trapez yöntemi ile nem konst. ve sıcaklık ortalamasının hesabı...
X_gecici=X(i,:).*(R1:r_ara:Rd);
T_gecici=Tp(i,:).*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(i,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...
Rd=R0*((d_m+e*d_s*X_ort(i,1))/(d_m+e*d_s*X0))^(1/2);
RR(i,1)=Rd;
r_ara=(Rd-R1)/fi;
T(i,1)=(T_gecici(1)+2*sum(T_gecici(2:su-1))+T_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...

% kurutma parametreleri güncellemesi...
q_s(i,1)=1/((1/d_s)+(e*X_ort(i,1)/d_m));
q_sp(i,:)=1/((1/d_s)+(e*X(i,:)/d_m));
q_m(i,1)=X_ort(i,1)/((1/d_s)+(e*X_ort(i,1)/d_m));
q_mp(i,:)=X(i,:)/((1/d_s)+(e*X(i,:)/d_m));
q_ort(i,1)=q_s(i,1)+q_m(i,1);
q_s_tur(i,1)=(q_s(i,1)-q_s(i-1,1))/dilara;
Y(i,1)=100*(1/(1+X_ort(i,1))); % kg kuru madde/kg toplam (%)...
c_y(i,1)=(-6e-6*Y(i,1)^3+8e-4*Y(i,1)^2-5.34e-2*Y(i,1)+4.2672)*1000;%J/kgK

clear D;
Ed=80000*((1/(1+10*X_ort(i,1)))+0.147);
for k=1:fi+1,
    D(k)=D0*exp((-Ed/R)*((1/Tp(i,k))-(1/T_ref)))*((X(i,k)-X_eq)/(X0-X_eq))^a;
end

d_a(i,1)=353.128/T(i,1); % National Research Council, internal critical tables
d_wv(i,1)=220.705/T(i,1);% E.W.Washburn, McGraw-1926...
%-----
%W/mK "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
lamda_air(i,1)=4.5e-3+7.26e-5*T(i,1);
% m2/s "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
D_a(i,1)=5.28e-9*(T(i,1)^(3/2));
%-----
% "an approximate method for nonlinear diffusion applied..." Liou These...
q_mg_sat(i,1)=(2.1936e-3/T(i,1))*exp((-7246.5822/T(i,1))+77.641232+5.7447142e-3*T(i,1)-...
8.2470402*log(T(i,1)));
deltaHv_p(i,1)=2501*1000*((1-(Tp(i,su)/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;

% GAB'den aw hesabı...
X_i(i,1)=X(i,su);
Wr=W*exp(-(Es/R)*((1/313)-(1/T(i,1))));
bb=C*(1-(Wr/X_i(i,1)))-2;
aa=K*(1-C);
cc=1/K;

```

```

    dd=bb^2-(4*aa*cc);
    if X_i(i,1)==0,
        aw(i,1)=0;
    elseif C==1,
        aw(i,1)=X_i(i,1)/(K*(Wr+X_i(i,1)));
    else
        aw(i,1)=(-bb-(dd)^0.5)/(2*aa);
    end

%-----
q_mgb(i,1)=d_wv(i,1)*X_mgb(i,1);
q_mgi(i,1)=q_mg_sat(i,1)*aw(i,1);% lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
js_mi(i,1)=kg_eff*(q_mgi(i,1)-q_mgb(i,1));%kg/m2s lio,luyben ve bruin "a simplified calc. meth."
%-----
w_mgi(i,1)=q_mgi(i,1)/(q_mgi(i,1)*(1-(d_a(i,1)/d_wv(i,1)))+d_a(i,1)); %kg su buh./kg top. hava
w_mgb(i,1)=q_mgb(i,1)/(q_mgb(i,1)*(1-(d_a(i,1)/d_wv(i,1)))+d_a(i,1)); %kg su buh./kg top. hava

%stefan diffusion correction "transport phenomena"
kg(i,1)=kg_eff*(w_mgi(i,1)-w_mgb(i,1))/log((1-w_mgb(i,1))/(1-w_mgi(i,1)));
%mass trans. kats. m/s chilton-colburn analogy...
alfa(i,1)=kg(i,1)*((d_a(i,1)*c_a)^(1/3))*((lamda_air(i,1)/D_a(i,1))^(2/3));
parl(i,1)=js_mi(i,1)*c_wv/alfa(i,1); %yardimci parametre
if parl(i,1)<0.1,
    alfa_eff(i,1)=alfa(i,1)*(1-parl(i,1)/2);% "transport phenomena"
else
    alfa_eff(i,1)=alfa(i,1)*(parl(i,1)/(exp(parl(i,1))-1));% "transport phenomena"
end

h=alfa_eff(i,1);
J_T(i,1)=h*(Tp(i,su)-T_a(i,1))+js_mi(i,1)*deltaHv_p(i,1);
lmd_x=lmd_m./(q_s(i,:).*(c_y(i,1)+c_w.*X(i,:)));
%-----
i=i+1; j=1;
end % for t_d...

```

C.2. Silindirik Granüllü Ekmek Mayasının Büzülen Granül Tabanlı Kurutma Modellemesi için Yazılan 2. Matlab Programı

```

% silindirik büzülen granüllü mayanın kurutma sürecinin modellenmesi (kasım 2003)
% yükleme evresini çıkarttığım için toplam 35dk'lık simülasyon süresi 27dk'dır.
% difüzyon diferansiyel denkleminin çözümü explicit yöntemi ile
% granül boyutları çok küçük olduğu için sıcaklığın granül içindeki değişimleri ihmal
% edilebileceğinden sıcaklık eşitliği birinci dereceden adi bir dif. denklem ile değiştirilmiştir.

```

```

clc; close all; clear all
load pakmaya_data27min

```

```

% kurutma modeli parametreleri ve başlangıç değerlerinin girilmesi...

```

```

%-----
R=8.314; %J/mol.K
T_ref=323.15; %K
a=0.154;
D0=7.89e-10; %m2/s
T(1,1)=289.90;
fi=10; % boyutsuz düzlem araligi...
R0=0.0005; %m
R1=0; %m
t=60*27; %simülasyon süresi sn
X0=1.563;

```

```

X_eq=0.002;
e=0.3; % büzülme katsayisi...
d_s=1100/(1+X0*(1-e)); %kg/m3
d_m=1000;%kg/m3
K=0.9458; W=0.0482; C=23.5737; Es=13774;
kg_eff=0.0035;
c_a=1010; c_w=4184; c_wv=2000; %J/kgK
lmd_m=0.464; % maddenin termal iletkenligi J/Kms

%-----
a1=101.61; a2=241129.9; b1=35.06; b2=119744.9;
a3=5.01; a4=20580.3; b3=-8.68; b4=-22745.5;
p=-906.58; q=6.09; Q0=100;
%-----

i=1;
[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X0,R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
X(1,1:fi+1)=X0;
su=length(X(1,:));

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasinin hesabi...
X_gecici=X.*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(1,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2);

[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
=hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

for k=1:fi+1,
[D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
=hesap01(T(i,1));
% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);

[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
=hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

% ürün aktivitesinin bulunması...
[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q0);
%-----
dlr =1; q_s_tur(1,1)=0;
i=2;j=su; t_d=1;

for t_d=1:dlr:t,

kg_eff=kg_eff+t_d/7e8;

for f=fi:(-1):0,
r = r_ara*f+R1;

if f==0, % B.C...

[X(i,j)]=explicit01(D(j),D(j+1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j+1),r,...
r_ara,dlr,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j),X(i-1,j+1));

```

```

elseif f==fi, % B.C...

[X(i,j)]=explicit02(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
    r_ara,dlr,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j),X(i-1,j-1),js_mi(i-1,1));
else

[X(i,j)]=explicit03(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
    r_ara,dlr,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j+1),X(i-1,j),X(i-1,j-1));
end
j=j-1;
end % for R_d...

%firin sicakliginin runge-kutta yöntemi ile bulunması...
%-----
hh=dlr;
[T(i,1)]=temperature(q_ort(i-1,1),c_y(i-1,1),Rd,alfa_eff(i-1,1),T_a(i-1,1),...
    T(i-1,1),js_mi(i-1,1),deltaHv(i-1,1),hh);
%-----

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabi...
X_gecici=X(i,:)*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(i,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...

[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ort(i,1),R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
    =hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

q_s_tur(i,1)=(q_s(i,1)-q_s(i-1,1))/dlr;

clear D;
for k=1:fi+1,
[D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
    if D(k)==0,
        D(k)=D(k-1);
    end
end
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
    =hesap01(T(i,1));

% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);
%-----

[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
    par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
    =hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
    lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

% ürün aktivitesinin bulunması...
[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q(i-1,1));
%-----

i=i+1; j=su;
sayici=mod(i,60);
if sayici==0,
    fprintf(1,'\n%d %f %f\n',i/60,X_ort(i-1,1),Q(i-1,1));
end

end % for t_d...

```

```

for i=1:t_d+1,
    for j=1:fi+1,
        if i==1,
            [QQ(i,j)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X(i,j),p,q,Q0);
        else
            [QQ(i,j)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X(i,j),p,q,QQ(i-1,j));
        end
    end
end
end

%-----
function [Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ort,R1,fi)

Rd=R0*((d_m+e*d_s*X_ort)/(d_m+e*d_s*X0))^(1/2);
r_ara=(Rd-R1)/fi;
%-----
function [q_s,q_sp,q_m,q_mp,q_ort,Y,c_y,Ed]=hesap(d_s,d_m,e,X_ort,X)

q_s=1/((1/d_s)+(e*X_ort/d_m));
q_sp=1./((1/d_s)+(e.*X./d_m));
q_m=X_ort(1,1)/((1/d_s)+(e*X_ort/d_m));
q_mp=X(1,:)/((1/d_s)+(e.*X./d_m));
q_ort=q_s+q_m;
Y=100*(1/(1+X_ort)); % kg kuru madde/kg toplam (%)...
c_y=(-6e-6*Y^3+8e-4*Y^2-5.34e-2*Y+4.2672)*1000; %J/kgK Josic ve Kanarya Tez...
Ed=80000*((1/(1+10*X_ort))+0.147); % lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method...
%-----
function [D]=difuzyon(D0,Ed,R,T,T_ref,X,X_eq,X0,a)
D=D0*exp((-Ed/R)*((1/T)-(1/T_ref)))*((X-X_eq)/(X0-X_eq))^a;
%-----
function [d_a,d_wv,lamda_air,D_a,q_mg_sat,deltaHv]=hesap01(T)

d_a=353.128/T; % National Research Council, internal critical tables
d_wv=220.705/T;% E.W.Washburn, McGraw-1926...
lamda_air=4.5e-3+7.26e-5*T; %W/mK
D_a=5.28e-9*(T^(3/2)); %m2/s
q_mg_sat=(2.1936e-3/T)*exp((-7246.5822/T)+77.641232+5.7447142e-3*T-8.2470402*log(T));
deltaHv=2501*1000*((1-(T/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;
%-----
function [X_i,aw]=aw_hesap(X,Es,R,T,C,K,W)

X_i=X;
Wr=W*exp(-(Es/R)*((1/313)-(1/T)));
bb=C*(1-(Wr/X_i))-2;
aa=K*(1-C);
cc=1/K;
dd=bb^2-(4*aa*cc);
if X_i==0,
    aw=0;
elseif C==1,
    aw=X_i/(K*(Wr+X_i));
else
    aw=(-bb-(dd)^0.5)/(2*aa);
end
%-----
function [q_mgb,q_mgi,js_mi,w_mgi,w_mgb,kg,alfa,par1,alfa_eff]...
=hesap02_instant(d_wv,X_mgb,q_mg_sat,aw,kg_eff,d_a,c_a,lamda_air,D_a,c_wv)
q_mgb=d_wv*X_mgb;

```

```

q_mgi=q_mg_sat*aw; % lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
js_mi=kg_eff*(q_mgi-q_mgb); %kg/m2s lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
w_mgi=q_mgi/(q_mgi*(1-(d_a/d_wv))+d_a); %kg su buhari/kg toplam hava
w_mgb=q_mgb/(q_mgb*(1-(d_a/d_wv))+d_a); %kg su buhari/kg toplam hava
kg=kg_eff*(w_mgi-w_mgb)/log((1-w_mgb)/(1-w_mgi)); %stefan diffusion correction "transport
phenomena"
alfa=kg*((d_a*c_a)^(1/3))*((lamda_air/D_a)^(2/3)); %mass trans. kats. m/s
%yardimci parametre...
if par1<0.1,
    alfa_eff=alfa*(1-par1/2);% "transport phenomena"
else
    alfa_eff=alfa*(par1/(exp(par1)-1));% "transport phenomena"
end
end
%-----
function [Q]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T,X_ort,p,q,Q0)

U1=(a1-a2/(R*T))*X_ort+(b1-b2/(R*T));
U2=((a3-a4/(R*T))*X_ort+(b3-b4/(R*T)))*(1-exp(p*X_ort^q));
ki=exp(U1+U2);
kk1=(-ki*Q0);
kk2=(-ki*(Q0+kk1*0.5));
kk3=(-ki*(Q0+kk2*0.5));
kk4=(-ki*(Q0+kk3));
Q=Q0+(kk1+kk2+kk3+kk4)/6;
%-----
function [X]=explicit01(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2)

B1=dlr*((D1*q_sp1/r_ara)+((D2-D1)*q_sp1/r_ara)+...
(D1*(q_sp2-q_sp1)/r_ara)/(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B1+2*B2)*X2+(B3-B1-2*B2)*X1
%-----
function [X]=explicit02(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2,js_mi)

B1=dlr*((D1*q_sp1/r)+((D1-D2)*q_sp1/r_ara)+(D1*(q_sp1-q_sp2)/r_ara))/...
(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B3-B1-2*B2)*X1+(B1+2*B2)*X2-(B1+B2)*2*r_ara*js_mi/((D1)*q_sp1);
%-----
function [X]=explicit03(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2,X3)

B1=dlr*((D1*q_sp1/r)+((D2-D1)*q_sp1/r_ara)+...
(D1*(q_sp2-q_sp1)/r_ara)/(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B1+B2)*X1+(B3-B1-2*B2)*X2+B2*X3;
%-----
function [T]=temperature(q_ort,c_y,Rd,alfa_eff,T_a,T1,js_mi,deltaHv,hh)

k0=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-T1)-js_mi*deltaHv);
k1=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+0.5*k0))-js_mi*deltaHv);
k2=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+0.5*k1))-js_mi*deltaHv);
k3=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+k2))-js_mi*deltaHv);
T=T1+(k0+2*k1+2*k2+k3)*hh/6;

```

EK D. GRANÜL BOYUTLU KURUTMA SÜRECİ MODELİNDE KULLANILAN NEM DİFÜZYONU VE SICAKLIK KISMİ DİFERANSİYEL DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMLERİ

D.1. Silindirik Büzülen Granülün Nem Kesri Kısmi Diferansiyel Denkleminin Explicit Yöntemi ile Çözümü

Denklem 4.1'deki ifadede silindirik form için $v=1$ alınarak, problemimiz denklem D.1'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_s D \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (D.1)$$

Kısmi diferansiyel denklemin başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki eşitliklerle verilmiştir:

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R_d \Rightarrow X(0, r) = X_0 \quad (D.2)$$

$$t > 0 \Rightarrow \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (D.3)$$

$$t > 0 \Rightarrow j_{m,i} = -D \rho_s \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R_d} = k(\rho_{wv,i} - \rho_{wv,g}) \quad (D.4)$$

$$\frac{\partial \rho_s X}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\rho_s D \frac{\partial X}{\partial r} + r \rho_s \frac{\partial D}{\partial r} \frac{\partial X}{\partial r} + r D \frac{\partial \rho_s}{\partial r} \frac{\partial X}{\partial r} + r \rho_s D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (D.5)$$

$$\rho_s' X + \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial r} \underbrace{\left[\frac{\rho_s D}{r} + \rho_s \frac{\partial D}{\partial r} + D \frac{\partial \rho_s}{\partial r} \right]}_{K_1} + \rho_s D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (D.6)$$

$$\rho_s' X_i^j + \rho_s \frac{(X_i^{j+1} - X_i^j)}{\Delta t} = \frac{(X_{i+1}^j - X_i^j)}{\Delta r} K_1 + \rho_s D \frac{(X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j)}{(\Delta r)^2} \quad (D.7)$$

$$X_i^{j+1} = \underbrace{(X_{i+1}^j - X_i^j)}_{A_1} \frac{K_1 \Delta t}{\rho_s \Delta r} + \underbrace{\frac{D \Delta t}{(\Delta r)^2}}_{A_2} (X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j) + \underbrace{\left(1 - \frac{\rho_s' \Delta t}{\rho_s} \right)}_{A_3} X_i^j \quad (D.8)$$

$$X_i^{j+1} = (X_{i+1}^j - X_i^j) A_1 + A_2 (X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j) + A_3 X_i^j \quad (D.9)$$

$$X_i^{j+1} = (A_1 + A_2) X_{i+1}^j + (A_3 - A_1 - 2A_2) X_i^j + A_2 X_{i-1}^j \quad (D.10)$$

$$A_1 = \frac{\Delta t}{\rho_s \Delta r} \left[\frac{\rho_s D}{r} + \rho_s \frac{\partial D}{\partial r} + D \frac{\partial \rho_s}{\partial r} \right] \quad (D.11)$$

$$A_2 = \frac{D \Delta t}{(\Delta r)^2} \text{ ve } A_3 = 1 - \frac{\rho_s' \Delta t}{\rho_s} \quad (D.12)$$

Sınır koşulları için çözüm tekrarlanacak olursa,

1. $r=0$ durumunda ($i=1$):

$$X_1^{j+1} = (A_1 + A_2)X_2^j + (A_3 - A_1 - 2A_2)X_1^j + A_2X_2^j \quad (D.13)$$

$$t > 0 \Rightarrow \left. \frac{X_2^j - X_L^j}{2\Delta r} \right|_{r=0} = 0 \Rightarrow X_2^j = X_L^j \quad (D.14)$$

$$X_1^{j+1} = (A_1 + 2A_2)X_2^j + (A_3 - A_1 - 2A_2)X_1^j \quad (D.15)$$

2. $r=R_d$ durumunda ($i=N$):

$$X_N^{j+1} = (A_1 + A_2)X_R^j + (A_3 - A_1 - 2A_2)X_N^j + A_2X_{N-1}^j \quad (D.16)$$

$$j_{m,i} = -D\rho_s \frac{X_R^j - X_{N-1}^j}{2\Delta r} \Rightarrow X_R^j = X_{N-1}^j - \frac{2\Delta r}{D\rho_s} j_{m,i} \quad (D.17)$$

$$X_N^{j+1} = (A_3 - A_1 - 2A_2)X_N^j + (A_1 + 2A_2)X_{N-1}^j - (A_1 + 2A_2) \frac{2\Delta r}{D\rho_s} j_{m,i} \quad (D.18)$$

D.2. Silindirik Büzülen Granülün Nem Kesri Kısmi Diferansiyel Denkleminin Crank-Nicolson Yöntemi ile Çözümü

Denklem D.6'dan itibaren çözüm yapılacak olursa,

$$\begin{aligned} \rho'_s X_i^j + \rho_s \frac{(X_i^{j+1} - X_i^j)}{\Delta t} \\ = \frac{1}{2} \left[\frac{X_{i+1}^j - X_i^j}{\Delta r} + \frac{X_{i+1}^{j+1} - X_i^{j+1}}{\Delta r} \right] K_1 + \rho_s D \frac{1}{2} \left[\frac{X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j}{(\Delta r)^2} + \frac{X_{i+1}^{j+1} - 2X_i^{j+1} + X_{i-1}^{j+1}}{(\Delta r)^2} \right] \end{aligned} \quad (D.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_s}{\Delta t} X_i^{j+1} - \frac{K_1}{2\Delta r} (X_{i+1}^{j+1} - X_i^{j+1}) - \underbrace{\frac{\rho_s D}{2(\Delta r)^2}}_{B_3} (X_{i+1}^{j+1} - 2X_i^{j+1} + X_{i-1}^{j+1}) \\ = \frac{K_1}{2\Delta r} (X_{i+1}^j - X_i^j) + \underbrace{\frac{\rho_s D}{2(\Delta r)^2}}_{B_3} (X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j) + \underbrace{\left(\frac{\rho_s}{\Delta t} - \rho'_s \right)}_{B_4} X_i^j \end{aligned} \quad (D.20)$$

$$\begin{aligned} (-B_2 - B_3)X_{i+1}^{j+1} + (B_1 + B_2 + 2B_3)X_i^{j+1} - B_3X_{i-1}^{j+1} \\ = (B_2 + B_3)X_{i+1}^j + (B_4 - B_2 - 2B_3)X_i^j + B_3X_{i-1}^j \end{aligned} \quad (D.21)$$

Burada

$$B_1 = \frac{\rho_s}{\Delta t}, \quad B_2 = \frac{1}{2\Delta r} \left[\frac{\rho_s D}{r} + \rho_s \frac{\partial D}{\partial r} + D \frac{\partial \rho_s}{\partial r} \right] \quad (D.22)$$

$$B_3 = \frac{\rho_s D}{2(\Delta r)^2}, \quad B_4 = \frac{\rho_s}{\Delta t} - \rho'_s \quad (D.23)$$

Sınır koşulları için çözüm tekrarlanacak olursa,

1. $r=0$ durumunda ($i=1$):

$$\begin{aligned} (-B_2 - B_3)X_2^{j+1} + (B_1 + B_2 + 2B_3)X_1^{j+1} - B_3X_L^{j+1} \\ = (B_2 + B_3)X_2^j + (B_4 - B_2 - 2B_3)X_1^j + B_3X_L^j \end{aligned} \quad (D.24)$$

Denklem D.14'deki sınır koşulu eşitliği, denklem 24'de yerine konulursa,

$$(-B_2 - 2B_3)X_2^{j+1} + (B_1 + B_2 + 2B_3)X_1^{j+1} = (B_2 + 2B_3)X_2^j + (B_4 - B_2 - 2B_3)X_1^j \quad (D.25)$$

2. $r=R_d$ durumunda ($i=N$):

$$\begin{aligned} (-B_2 - B_3)X_R^{j+1} + (B_1 + B_2 + 2B_3)X_N^{j+1} - B_3X_{N-1}^{j+1} \\ = (B_2 + B_3)X_R^j + (B_4 - B_2 - 2B_3)X_N^j + B_3X_{N-1}^j \end{aligned} \quad (D.26)$$

Denklem D.17'deki sınır koşulu eşitliği, denklem 26'da yerine konulursa,

$$\begin{aligned} (B_1 + B_2 + 2B_3)X_N^{j+1} - (-B_2 - 2B_3)X_{N-1}^{j+1} + (B_2 + B_3)\frac{2\Delta r}{D\rho_s}j_{m,i} \\ = (B_4 - B_2 - 2B_3)X_N^j + (B_2 + 2B_3)X_{N-1}^j - (B_2 + B_3)\frac{2\Delta r}{D\rho_s}j_{m,i} \end{aligned} \quad (D.27)$$

$$\begin{aligned} (B_1 + B_2 + 2B_3)X_N^{j+1} - (-B_2 - 2B_3)X_{N-1}^{j+1} \\ = (B_4 - B_2 - 2B_3)X_N^j + (B_2 + 2B_3)X_{N-1}^j - (B_2 + B_3)\frac{4\Delta r}{D\rho_s}j_{m,i} \end{aligned} \quad (D.28)$$

D.3. Silindirik Büzülen Granülün Sıcaklık Kısmi Diferansiyel Denkleminin Explicit Yöntemi ile Çözümü

Denklem 4.5'de silindirik granül için $v=1$ değerinde aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial(T(\rho_s c_{p,s} + \rho_m c_{p,m}))}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (D.29)$$

Kısmi diferansiyel denklemin başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki eşitliklerle verilmiştir:

$$t = 0 \quad 0 \leq r \leq R_d \Rightarrow T(0, r) = T_0 \quad (D.30)$$

$$t > 0 \Rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (D.31)$$

$$t > 0 \Rightarrow j_{r,i} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_d} = \alpha(T(t, R_d) - T_a) + \Delta H_v \Big|_{T(t, R_d)} j_{m,i} \quad (D.32)$$

$$\frac{\partial(T(\rho_s c_{p,s} + \rho_m c_{p,m}))}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (D.33)$$

$$h_m = \rho_s c_{p,s} + \rho_m c_{p,m} \quad (D.34)$$

$$h_m \frac{\partial T}{\partial t} + T \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T^2}{\partial^2 r} \right) \quad (D.35)$$

$$h_m \frac{\partial T}{\partial t} + h'_m T = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{\partial T^2}{\partial^2 r} \quad (D.36)$$

$$h_m \frac{\partial T}{\partial t} + h'_m T = \underbrace{\left(\frac{\lambda}{r} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right)}_{K_2} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{\partial T^2}{\partial^2 r} \quad (D.37)$$

$$h_m \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} + h'_m T_i^j = \frac{(T_{i+1}^j - T_i^j)}{\Delta r} K_2 + \lambda \frac{(T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j)}{(\Delta r)^2} \quad (D.38)$$

$$T_i^{j+1} = \underbrace{(T_{i+1}^j - T_i^j)}_{C_1} \frac{K_2 \Delta t}{h_m \Delta r} + \underbrace{\frac{\lambda \Delta t}{h_m (\Delta r)^2} (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j)}_{C_2} + \underbrace{\left(1 - \frac{h'_m \Delta t}{h_m} \right)}_{C_3} T_i^j \quad (D.39)$$

$$T_i^{j+1} = (T_{i+1}^j - T_i^j) C_1 + C_2 (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) + C_3 T_i^j \quad (D.40)$$

$$T_i^{j+1} = (C_1 + C_2) T_{i+1}^j + (C_3 - 2C_2 - C_1) T_i^j + C_2 T_{i-1}^j \quad (D.41)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t}{h_m \Delta r} \left[\frac{\lambda}{r} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right] \quad (D.42)$$

$$C_2 = \frac{\lambda \Delta t}{h_m (\Delta r)^2} \text{ ve } C_3 = 1 - \frac{h'_m \Delta t}{h_m} \quad (D.43)$$

Sınır koşulları için çözüm tekrarlanacak olursa,

1. $r=0$ durumunda ($i=1$):

$$T_1^{j+1} = (C_1 + C_2) T_2^j + (C_3 - 2C_2 - C_1) T_1^j + C_2 T_L^j \quad (D.44)$$

$$t > 0 \Rightarrow \frac{T_2^j - T_L^j}{2\Delta r} = 0 \Rightarrow T_2^j = T_L^j \quad (D.45)$$

$$T_1^{j+1} = (C_1 + 2C_2) T_2^j + (C_3 - 2C_2 - C_1) T_1^j \quad (D.46)$$

2. $r=R_d$ durumunda ($i=N$):

$$T_N^{j+1} = (C_1 + C_2) T_R^j + (C_3 - 2C_2 - C_1) T_N^j + C_2 T_{N-1}^j \quad (D.47)$$

$$j_{T,i} = -\lambda \frac{T_R^j - T_{N-1}^j}{2\Delta r} \Rightarrow T_R^j = T_{N-1}^j - \frac{2\Delta r}{\lambda} j_{T,i} \quad (D.48)$$

$$T_N^{j+1} = (C_3 - 2C_2 - C_1)\Gamma_N^j + (C_1 + 2C_2)\Gamma_{N-1}^j - (C_1 + C_2)\frac{2\Delta r}{\lambda}j_{T,i} \quad (D.49)$$

D.4. Silindirik Büzülen Granülün Sıcaklık Kısmi Diferansiyel Denkleminin Crank-Nicolson Yöntemi ile Çözümü

Denklem D.37'den itibaren çözüm yapılacak olursa,

$$\begin{aligned} h_m \frac{(T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} + h'_m T_i^j \\ = \frac{1}{2} \left[\frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta r} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta r} \right] K_2 + \frac{\lambda}{2} \left[\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{(\Delta r)^2} \right] \end{aligned} \quad (D.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{h_m}{\Delta t} (T_i^{j+1} - T_i^j) + \frac{h'_m}{D_4} T_i^j \\ = \frac{K_2}{2\Delta r} [T_{i+1}^j - T_i^j + T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}] + \frac{\lambda}{2(\Delta r)^2} [T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j + T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}] \end{aligned} \quad (D.51)$$

$$\begin{aligned} D_1 (T_i^{j+1} - T_i^j) + D_4 T_i^j \\ = D_2 [T_{i+1}^j - T_i^j + T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}] + D_3 [T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j + T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}] \end{aligned} \quad (D.52)$$

$$\begin{aligned} -(D_2 + D_3)T_{i+1}^{j+1} + (D_1 + D_2 + 2D_3)T_i^{j+1} - D_3 T_i^{j+1} \\ = (D_2 + D_3)\Gamma_{i+1}^j + (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_i^j + D_3 T_{i-1}^j \end{aligned} \quad (D.53)$$

$$D_1 = \frac{h_m}{\Delta t}, \quad D_2 = \frac{1}{2\Delta r} \left(\frac{\lambda}{r} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right), \quad D_3 = \frac{\lambda}{2(\Delta r)^2}, \quad D_4 = h'_m \quad (D.54)$$

Sınır koşulları için çözüm tekrarlanacak olursa,

1. $r=0$ durumunda ($i=1$):

$$\begin{aligned} -(D_2 + D_3)T_2^{j+1} + (D_1 + D_2 + 2D_3)T_1^{j+1} - D_3 T_L^{j+1} \\ = (D_2 + D_3)\Gamma_2^j + (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_1^j + D_3 T_L^j \end{aligned} \quad (D.55)$$

Denklem D.45'deki sınır koşulu eşitliği, denklem 55'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned} -(D_2 + 2D_3)T_2^{j+1} + (D_1 + D_2 + 2D_3)T_1^{j+1} \\ = (D_2 + 2D_3)\Gamma_2^j + (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_1^j \end{aligned} \quad (D.56)$$

2. $r=R_4$ durumunda ($i=N$):

$$\begin{aligned} -(D_2 + D_3)T_R^{j+1} + (D_1 + D_2 + 2D_3)T_N^{j+1} - D_3 T_{N-1}^{j+1} \\ = (D_2 + D_3)\Gamma_R^j + (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_N^j + D_3 T_{N-1}^j \end{aligned} \quad (D.57)$$

Denklem D.48'deki sınır koşulu eşitliği, denklem 57'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned}
 & (D_1 + D_2 + 2D_3)\Gamma_N^{j+1} - (D_2 + 2D_3)\Gamma_{N-1}^{j+1} + (D_2 + D_3)\frac{2\Delta r}{\lambda} j_{T,i} \\
 & = (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_N^j + (D_2 + 2D_3)\Gamma_{N-1}^j - (D_2 + D_3)\frac{2\Delta r}{\lambda} j_{T,i}
 \end{aligned} \tag{D.58}$$

$$\begin{aligned}
 & (D_1 + D_2 + 2D_3)\Gamma_N^{j+1} - (D_2 + 2D_3)\Gamma_{N-1}^{j+1} \\
 & = (D_1 - D_2 - 2D_3 - D_4)\Gamma_N^j + (D_2 + 2D_3)\Gamma_{N-1}^j - (D_2 + D_3)\frac{4\Delta r}{\lambda} j_{T,i}
 \end{aligned} \tag{D.59}$$



EK E. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN GENETİK ALGORİTMA TABANLI DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI

% silindirik büzülen granüllü mayanın kurutma sürecinin modellenmesi (mayıs 2004)
% genetik algoritma ile optimizasyon problemi çözülmeye çalışıldı...
% kontrol değişkenleri havanın sıcaklığı ve havanın nem oranı olarak seçildi...

```
clc; close all; clear all
% kurutma sürecinin başlangıç değerlerinin girilmesi...
u_air=12000/3600;
R=8.314; %J/mol.K
T_ref=323.15; %K
a=0.154;
D0=7.89e-10; %m2/s
T(1,1)=289.90;
fi=10; % boyutsuz düzlem araligi...
R0=0.0005; %m
R1=0; %m
X0=1.563;
X_eq=0.002;
e=0.3 % büzülme katsayisi...
```

```
d_s=1100/(1+X0*(1-e)); %kg/m3
d_m=1000; %kg/m3
K=0.9458; W=0.0482; C=23.5737; Es=13774;
kg_eff=0.0035; %deneyisel bulunuyor...
c_a=1010; %J/kgK
c_w=4184; %J/kgK
c_wv=2000; %J/kgK
```

```
%-----
Q0=100;
a1=101.61; a2=241129.9; b1=35.06; b2=119744.9;
a3=5.01; a4=20580.3; b3=-8.68; b4=-22745.5;
p=-906.58; q=6.09;
```

```
%-----
%optimizasyon ağırlıkları...
j1=4e3; j2=3e2; j3=3e-4;
```

```
%-----
%Genetik algoritma ile ilgili değerler...
sample=[1e-1;5e-5]; %örnekleme aralığı
eps=1e-3; %değişim aralığı
crossover_opt=0.4; %çaprazlama işlemi için olasılık değeri
mut_opt=0.05; %mutasyon işlemi için olasılık değeri
turnuva_boyu=5;
gen=1;
bounds=[293 373+40;0 5e-3];
pop_size=10;
```

```
%-----
prediction=120;
t=(1:1:prediction)';
ay=0.025;
```

```
i=1;
[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X0,R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
```

```

X(1,1:fi+1)=X0;
su=length(X(1,:));

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabi...
X_gecici=X.*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(1,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2);

[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
=hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

for k=1:fi+1,
    [D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
=hesap01(T(i,1));

% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);

%-----
[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
=hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q0);
%-----
save gecici001.mat
dilara=1; q_s_tur(1,1)=0; t_d=1;

% genetik algoritma ile opt. Problemi çözülmeye çalışılıyor...
sinir=bounds(:,2)-bounds(:,1);
bits=ceil(log2(sinir./sample)); %kullanılacak bit sayısı bulunur
crom_length=sum(bits(:))+1; % kromozomdaki bit sayısı + fitness

%başlangıçtaki popülasyonu bulalım...
pop=round(rand(pop_size,crom_length));

for i=1:pop_size,
xy(i,:)=b2f(pop(i,1:crom_length-1),bounds,bits);
end

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
    predictive_modelbetaversion
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end

pop(:,crom_length)=Jgec;
oval=J; bFoundIn=1; hata=1; btls=1;

```

```

while hata >= eps,
gen=btls;
[I(gen,1),JJ]=min(pop(:,crom_length)); % populusyon içindeki en iyi kromozom
info(gen,1)=gen;
info(gen,2)=I(gen,1); %minumum kromozom...
info(gen,3)=mean(pop(:,crom_length)); %ortalamalar...
info(gen,4)=std(pop(:,crom_length));
best=pop(JJ,1:crom_length);
if gen==1,
    hata=1;
else
    hata=abs(I(gen,1)-I(gen-1,1));
end

if ((abs(info(gen,2)-oval)>eps) | (gen==1))
    fprintf(1,'n%d %f\n',gen,info(gen,2));
    bpop(bFoundIn,:)= [gen b2f(pop(JJ,1:crom_length-1),bounds,bits),I(gen,1)];
    bFoundIn=bFoundIn+1;
    oval=info(gen,2);
else
    fprintf(1,'%d ',gen);
end

% yeni bir populusyon oluşturalım...
% turnuva yöntemi...

new_pop = zeros(pop_size,crom_length); %yeni populusyon için yer ayrılıyor...
turnuva=floor(rand(turnuva_boyu,pop_size)*pop_size)+1; %turnuva takvimi...

%veeeeeeeeeee kazananlar...
[c b]=min(reshape(pop(turnuva,crom_length),turnuva_boyu,pop_size));

%işte yeni populusyon...
    new_pop=pop(diag(turnuva(b,:)),:);

pc=find(rand(pop_size,1)<crossover_opt);

if rem(size(pc,1),2),
    pc=pc(1:(size(pc,1)-1));
end
pc=reshape(pc,size(pc,1)/2,2);
bitler=sum(bits(:));

for j=1:size(pc,1)
    baba=pc(j,1);
    anne=pc(j,2);
    p1=new_pop(baba,:);
    p2=new_pop(anne,:);
% crossover işlemi ile iki yeni üye bulunuyor...
    cut_point=round(rand*(bitler-2))+1;
    % ve çocuklar...
    c1 = [p1(1:cut_point) p2(cut_point+1:bitler+1)];
    c2 = [p2(1:cut_point) p1(cut_point+1:bitler+1)];
% nesil sonrası...
    new_pop(baba,:)=c1;
    new_pop(anne,:)=c2;
end

```

```

% mutasyon işlemi...
for i=1:pop_size,
    rn=rand(1,bitler) < mut_opt;
    new_pop(i,1:bitler)=[abs(new_pop(i,1:bitler)-rn)];
end

for i=1:pop_size,
    xy(i,:)=b2f(new_pop(i,1:crom_length-1),bounds,bits);
end

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
    predictive_modelbetaversion
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end

new_pop(:,crom_length)=Jgec;

pop=new_pop;
[A,B] = max(pop(:,crom_length));
pop(B,:)=best;
btls=btls+1;
end % while...

Jdata=[JX JE JQ J];
TaXmgb=b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits);
Ta(i:prediction,1)=TaXmgb(1);
X_mgb(i:prediction,1)=TaXmgb(2);
fprintf(1,'\n\n%d %d ',b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits),X_ort(1))

[JX1(i,1) JQ1(i,1) JE1(i,1) J1(i,1)] = maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_ort(1,1),X_eq,Q(1,1),Ta(1,1),...
    u_air, X_mgb(1,1),c_a,c_wv);

i=2;j=su; t_d=1;

while X_ort(i-1,1) >= X_eq,

    kg_eff=kg_eff+t_d/7e8;

    for f=fi:(-1):0,
        r=r_ara*f+R1;

        if f==0, % B.C...

            [X(i,j)]=explicit01(D(j),D(j+1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j+1),r,...
                r_ara,dlr,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j),X(i-1,j+1));

        elseif f==fi, % B.C...

            [X(i,j)]=explicit02(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
                r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j),X(i-1,j-1),js_mi(i-1,1));
        else

```



```

[X(i,j)]=explicit03(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j+1),X(i-1,j),X(i-1,j-1));
end
j=j-1;
end % for R_d...

%-----
hh=dilara;
[T(i,1)]=temperature(q_ort(i-1,1),c_y(i-1,1),Rd,alfa_eff(i-1,1),Ta(i-1,1),...
T(i-1,1),js_mi(i-1,1),deltaHv(i-1,1),hh);
%-----

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabi...
X_gecici=X(i,:).*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(i,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...

[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ort(i,1),R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
=hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

q_s_tur(i,1)=(q_s(i,1)-q_s(i-1,1))/dilara;
clear D;

for k=1:fi+1,
[D(k)]=difzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
=hesap01(T(i,1));

% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);
%-----

[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
=hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

[JX1(i,1) JQ1(i,1) JE1(i,1) J1(i,1)]=maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_ort(i-1,1),X_eq,Q(i-1,1),...
Ta(i-1,1),u_air,X_mgb(i-1,1),c_a,c_wv);

%-----
%.....inactivation equations.....
[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q(i-1,1));
%-----

%optimizasyon için maliyet fonksiyonunun bulunması
%-----
if mod(t_d,prediction)==0,
fprintf(1,'\n%d ',t_d);
clear pop xy Jgec new_pop bpop info I JJ best JE JQ JX J btls hata
save gecici001.mat
%başlangıçtaki popülasyonu bulalım...
pop=round(rand(pop_size,crom_length));
for no=1:pop_size,
xy(no,:)=b2f(pop(no,1:crom_length-1),bounds,bits);
end
end

```

```

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
    predictive_modelbetaversion
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end

pop(:,crom_length)=Jgec;
oval=J; bFoundIn=1; hata=1; btls=1;

while hata >= eps,
    gen=btls;

    [I(gen,1),JJ]=min(pop(:,crom_length)); % populasyon içindeki en iyi kromozom

    info(gen,1)=gen;
    info(gen,2)=I(gen,1); %minimum kromozom...
    info(gen,3)=mean(pop(:,crom_length)); %ortalamar...
    info(gen,4)=std(pop(:,crom_length));
    best=pop(JJ,1:crom_length);

    if gen==1,
        hata=1;
    else
        hata=abs(I(gen,1)-I(gen-1,1));
    end

    if ((abs(info(gen,2)-oval)>eps) | (gen==1))
        fprintf(1,'n%d %fn',gen,info(gen,2));
        bpop(bFoundIn,:)= [gen b2f(pop(JJ,1:crom_length-1),bounds,bits),I(gen,1)];
        bFoundIn=bFoundIn+1;
        oval=info(gen,2);
    else
        fprintf(1,'%d ',gen);
    end

    % yeni bir populasyon oluşturalım...
    % turnuva yöntemi...

    new_pop = zeros(pop_size,crom_length); %yeni populasyon için yer ayrılıyor...
    turnuva=floor(rand(turnuva_boyu,pop_size)*pop_size)+1; %turnuva takvimi...
    %veeeeeeeeeee kazananlar...
    [c b]=min(reshape(pop(turnuva,crom_length),turnuva_boyu,pop_size));
    %işte yeni populasyon...
    new_pop=pop(diag(turnuva(b,:),:));

    pc=find(rand(pop_size,1)<crossover_opt);

    if rem(size(pc,1),2),
        pc=pc(1:(size(pc,1)-1));
    end
    pc=reshape(pc,size(pc,1)/2,2);
    bitler=sum(bits(:));

```

```

for jno=1:size(pc,1)
    baba=pc(jno,1);
    anne=pc(jno,2);
    p1=new_pop(baba,:);
    p2=new_pop(anne,:);
% crossover işlemi ile iki yeni üye bulunuyor...
    cut_point=round(rand *(bitler-2))+1;
    % ve çocuklar...
    c1 = [p1(1:cut_point) p2(cut_point+1:bitler+1)];
    c2 = [p2(1:cut_point) p1(cut_point+1:bitler+1)];
% nesil sonrası...
    new_pop(baba,:)=c1;
    new_pop(anne,:)=c2;
end

% mutasyon işlemi...
for no=1:pop_size,
    rn=rand(1,bitler) < mut_opt;
    new_pop(no,1:bitler)=[abs(new_pop(no,1:bitler)-rn)];
end

for no=1:pop_size,
    xy(no,:)=b2f(new_pop(no,1:crom_length-1),bounds,bits);
end

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
    predictive_modelbetaversion
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end

new_pop(:,crom_length)=Jgec;

pop=new_pop;
[A,B] = max(pop(:,crom_length));
pop(B,:)=best;
btls=btls+1;
end % while...

Jdata=[Jdata;JX JE JQ J];
TaXmgb=b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits);
Thava=TaXmgb(1);
hava_fark=Thava-Ta(i-1,1);
if hava_fark < 0,
    Ta(i+prediction-1,1)=Ta(i-1,1)+(exp(-ay*t)-1)*abs(hava_fark);
else
    Ta(i+prediction-1,1)=Ta(i-1,1)+(1-exp(-ay*t))*hava_fark;
end
X_mgb(i+prediction,1)=TaXmgb(2);
fprintf(1,'\n\n%d %d ',b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits),X_ort(i))
end
i=i+1; j=su; t_d=t_d+1;

```

```

end % WHILE X_ort(i-1,1) >= X_eq...
%-----
function [Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ort,R1,fi)

Rd=R0*((d_m+e*d_s*X_ort)/(d_m+e*d_s*X0))^(1/2);
r_ara=(Rd-R1)/fi;
%-----
function [q_s,q_sp,q_m,q_mp,q_ort,Y,c_y,Ed]=hesap(d_s,d_m,e,X_ort,X)

q_s=1/((1/d_s)+(e*X_ort/d_m));
q_sp=1./((1/d_s)+(e.*X./d_m));
q_m=X_ort(1,1)/((1/d_s)+(e*X_ort/d_m));
q_mp=X(1,:)/((1/d_s)+(e.*X./d_m));
q_ort=q_s+q_m;
Y=100*(1/(1+X_ort)); % kg kuru madde/kg toplam (%)...
c_y=(-6e-6*Y^3+8e-4*Y^2-5.34e-2*Y+4.2672)*1000; %J/kgK Josic ve Kanarya Tez...
Ed=80000*((1/(1+10*X_ort))+0.147); % lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method...
%-----
function [D]=difuzyon(D0,Ed,R,T,T_ref,X,X_eq,X0,a)
D=D0*exp((-Ed/R)*((1/T)-(1/T_ref)))*((X-X_eq)/(X0-X_eq))^a;
%-----
function [d_a,d_wv,lamda_air,D_a,q_mg_sat,deltaHv]=hesap01(T)

d_a=353.128/T; % National Research Council, internal critical tables
d_wv=220.705/T;% E.W.Washburn, McGraw-1926...
lamda_air=4.5e-3+7.26e-5*T; % W/mK
D_a=5.28e-9*(T^(3/2)); % m2/s
q_mg_sat=(2.1936e-3/T)*exp((-7246.5822/T)+77.641232+5.7447142e-3*T-8.2470402*log(T));
deltaHv=2501*1000*((1-(T/647.3))/(1-(273/647.3)))^0.38;
%-----
function [X_i,aw]=aw_hesap(X,Es,R,T,C,K,W)

X_i=X;
Wr=W*exp(-(Es/R)*((1/313)-(1/T)));
bb=C*(1-(Wr/X_i))-2;
aa=K*(1-C);
cc=1/K;
dd=bb^2-(4*aa*cc);
if X_i==0,
aw=0;
elseif C==1,
aw=X_i/(K*(Wr+X_i));
else
aw=(-bb-(dd)^0.5)/(2*aa);
end
%-----
function [q_mgb,q_mgi,js_mi,w_mgi,w_mgb,kg,alfa,par1,alfa_eff]...
=hesap02_instant(d_wv,X_mgb,q_mg_sat,aw,kg_eff,d_a,c_a,lamda_air,D_a,c_wv)

q_mgb=d_wv*X_mgb;
q_mgi=q_mg_sat*aw; % lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
js_mi=kg_eff*(q_mgi-q_mgb); %kg/m2s lio,luyben ve bruin "a simplified calculation method..."
w_mgi=q_mgi/(q_mgi*(1-(d_a/d_wv))+d_a); %kg su buhari/kg toplam hava
w_mgb=q_mgb/(q_mgb*(1-(d_a/d_wv))+d_a); %kg su buhari/kg toplam hava
kg=kg_eff*(w_mgi-w_mgb)/log((1-w_mgb)/(1-w_mgi)); %stefan diffusion correction "transport
phenomena"
alfa=kg*((d_a*c_a)^(1/3))*((lamda_air/D_a)^(2/3)); %mass trans. kats. m/s
%yardimci parametre...
if par1<0.1,

```

```

    alfa_eff=alfa*(1-par1/2);% "transport phenomena"
    else
    alfa_eff=alfa*(par1/(exp(par1)-1));% "transport phenomena"
    end
%-----
function [Q]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T,X_ort,p,q,Q0)

U1=(a1-a2/(R*T))*X_ort+(b1-b2/(R*T));
U2=((a3-a4/(R*T))*X_ort+(b3-b4/(R*T)))*(1-exp(p*X_ort^q));
ki=exp(U1+U2);
kk1=(-ki*Q0);
kk2=(-ki*(Q0+kk1*0.5));
kk3=(-ki*(Q0+kk2*0.5));
kk4=(-ki*(Q0+kk3));
Q=Q0+(kk1+kk2+kk3+kk4)/6;
%-----
function [X]=explicit01(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2)

B1=dlr*((D1*q_sp1/(r_ara))+((D2-D1)*q_sp1/r_ara)+...
(D1*(q_sp2-q_sp1)/r_ara))/(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B1+2*B2)*X2+(B3-B1-2*B2)*X1
%-----
function [X]=explicit02(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2,js_mi)

B1=dlr*((D1*q_sp1/r)+((D1-D2)*q_sp1/r_ara)+(D1*(q_sp1-q_sp2)/r_ara))/...
(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B3-B1-2*B2)*X1+(B1+2*B2)*X2-(B1+B2)*2*r_ara*js_mi/((D1)*q_sp1);
%-----
function [X]=explicit03(D1,D2,q_sp1,q_sp2,r,r_ara,dlr,q_s_tur,X1,X2,X3)

B1=dlr*((D1*q_sp1/r)+((D2-D1)*q_sp1/r_ara)+...
(D1*(q_sp2-q_sp1)/r_ara))/(r_ara*q_sp1);
B2=dlr*D1/((r_ara)^2);
B3=1-q_s_tur*dlr/q_sp1;
X=(B1+B2)*X1+(B3-B1-2*B2)*X2+B2*X3;
%-----
function [T]=temperature(q_ort,c_y,Rd,alfa_eff,T_a,T1,js_mi,deltaHv,hh)

k0=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-T1)-js_mi*deltaHv);
k1=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+0.5*k0))-js_mi*deltaHv);
k2=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+0.5*k1))-js_mi*deltaHv);
k3=(2/(q_ort*c_y*Rd))*(alfa_eff*(T_a-(T1+k2))-js_mi*deltaHv);
T=T1+(k0+2*k1+2*k2+k3)*hh/6;
%-----
function [J1,J2,J3,J]=maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_ort,X_eq,Q,T_a,u_air,X_mgb,c_a,c_wv)

J1=j1*(X_ort-X_eq);
J2=j2*(100-Q);
J3=j3*u_air*T_a*(c_a+c_wv*X_mgb);
J=J1+J2+J3;
%-----

% ALT PROGRAMDIR...
% predictive_modelbetaversion.m şeklinde ana programda kullanıldığından
% bu isimle kaydedilmelidir...

```

```

i=t_d+1;j=su;
for mm=1:prediction,
    kg_eff=kg_eff+(t_d+mm)/7e8;
    for f=fi:(-1):0,
        r=r_ara*f+R1;

        if f==0, % B.C...
            Xpre(i,j)=Xpre(i,j+1);
        elseif f==fi, % B.C...
            [Xpre(i,j)]=explicit02(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
                r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),Xpre(i-1,j),Xpre(i-1,j-1),js_mi(i-1,1));
        else
            [Xpre(i,j)]=explicit03(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
                r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),Xpre(i-1,j+1),Xpre(i-1,j),Xpre(i-1,j-1));
        end
    end
    j=j-1;
end % for R_d...
%-----
hh=dilara;
[Tpre(i,1)]=temperature(q_ort(i-1,1),c_y(i-1,1),Rd,alfa_eff(i-1,1),T_apre,...
    Tpre(i-1,1),js_mi(i-1,1),deltaHv(i-1,1),hh);
%-----

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabi...
X_gecici=Xpre(i,:).*(R1:r_ara:Rd);
X_ortpre(i,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...

[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ortpre(i,1),R1,fi);
[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
    =hesap(d_s,d_m,e,X_ortpre(i,1),Xpre(i,:));

q_s_tur(i,1)=(q_s(i,1)-q_s(i-1,1))/dilara;
clear D;

for k=1:fi+1,
    [D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,Tpre(i,1),T_ref,Xpre(i,k),X_eq,X0,a);
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
    =hesap01(Tpre(i,1));

% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(Xpre(i,su),Es,R,Tpre(i,1),C,K,W);
%-----
[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
    par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
    =hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgbpre,q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
    lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

%.....inactivation equations.....
[Qpre(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,Tpre(i,1),X_ortpre(i,1),p,q,Qpre(i-1,1));
%-----
    i=i+1; j=su;
end % FOR mm=1:prediction...
[JX JQ JE J]=maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_ortpre(i-1,1),X_eq,Qpre(i-1,1),T_apre,u_air,...
    X_mgbpre,c_a,c_wv);

```

EK F. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SÜRECİNİN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ İÇİN YAZILAN MATLAB PROGRAMI

```
% RNN for prediction of product quality...
% Neural Predictive Model
% Ürün kalitesinin Öngörülmesi
% External Recurrent NN kullanıldı...
% U.YUZGEC 30 NİSAN 2005

clc; clear all; warning off MATLAB:nearlySingularMatrix
net1=network;
net1.numInputs = 1;
net1.numLayers = 3;
net1.biasConnect = [1; 1; 0];
net1.inputConnect = [1; 0; 0];
net1.layerConnect = [0 0 0; 1 1 0; 0 1 0];
net1.outputConnect = [0 0 1];
net1.targetConnect = [0 0 1];
net1.inputs{1}.range = [0 1; 0 1; 0 1; 0 1];
net1.layers{1}.size = 8;
net1.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
net1.layers{1}.initFcn = 'initnw';
net1.layers{2}.size = 4;
net1.layers{2}.transferFcn = 'logsig';
net1.layers{2}.initFcn = 'initnw';
net1.layers{3}.size = 1;
net1.layers{3}.transferFcn = 'logsig';
net1.layers{3}.initFcn = 'initnw';
net1.inputWeights{1,1}.delays = [0 1 2 3];
net1.layerWeights{2,2}.delays = [1];
net1.initFcn = 'initlay';
net1.performFcn = 'mse';
net1.trainFcn = 'trainlm';

net1.trainParam.epochs=1000;
net1.trainParam.goal=1e-8;
net1.trainParam.show=10;

ERN_data_kalite

net1=train(net1,PP,RR);

%-----
% Neural Predictive Model
% Nem Kesrinin Öngörülmesi
% External Recurrent NN kullanıldı...
% U.YUZGEC 30 NİSAN 2005

clc; clear all; warning off MATLAB:nearlySingularMatrix
net2=network;
net2.numInputs = 2;
net2.numLayers = 5;
net2.biasConnect = [1; 1; 1; 0; 0];
net2.inputConnect = [0 0; 0 1; 1 0; 0 0; 0 0];
net2.layerConnect = [0 0 0 0 1; 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0; 1 1 1 0 0; 0 0 0 1 0];
net2.outputConnect = [0 0 0 0 1];
```

```

net2.targetConnect = [0 0 0 0 1];
net2.inputs{1}.range = [0 1; 0 1];
net2.inputs{2}.range = [0 1];
net2.layers{1}.size = 6;
net2.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
net2.layers{1}.initFcn = 'initnw';
net2.layers{2}.size = 4;
net2.layers{2}.transferFcn = 'logsig';
net2.layers{2}.initFcn = 'initnw';
net2.layers{3}.size = 16;
net2.layers{3}.transferFcn = 'logsig';
net2.layers{3}.initFcn = 'initnw';
net2.layers{4}.size = 5;
net2.layers{4}.transferFcn = 'logsig';
net2.layers{4}.initFcn = 'initnw';
net2.layers{5}.size = 1;
net2.layers{5}.transferFcn = 'logsig';
net2.layers{5}.initFcn = 'initnw';
net2.inputWeights{3,1}.delays = [0 1];
net2.layerWeights{1,5}.delays = [1 2];
net2.initFcn = 'initlay';
net2.performFcn = 'mse';
net2.trainFcn = 'trainlm';

% load dilara.mat net2
net2.trainParam.epochs=1000;
net2.trainParam.goal=1e-8;
net2.trainParam.show=10;

a=net2.layers{1}.size;
b=net2.layers{2}.size;
c=net2.layers{3}.size;
d=net2.layers{4}.size;
e=net2.layers{5}.size;
g=length(net2.inputWeights{3,1}.delays)-1;
v=length(net2.layerWeights{1,5}.delays);

ERN_data_nemkesri

net2=train(net2,Pp,Rr,Pf,Af);
%-----
% 04.2005 Silindirik Part. için yapılan
% NN tabanlı öngörülü kontrol...
clc ;clear all;
load RNN_kalite.mat
load RNN_nemkesri.mat
u_air=12000/3600;
R=8.314; %J/mol.K
T_ref=323.15; %K
a=0.154;
D0=7.89e-10; %m2/s
T(1,1)=289.90;
fi=10; % boyutsuz düzlem araligi...
R0=0.0005; %m
R1=0; %m
X0=1.563;
X_eq=0.002;
e=0.3 % bütülme katsayisi...
d_s=1100/(1+X0*(1-e)); %kg/m3

```



```

d_m=1000;%kg/m3
K=0.9458; W=0.0482; C=23.5737; Es=13774;
kg_eff=0.0035; c_a=1010; %J/kgK c_w=4184; %J/kgK
c_wv=2000; %J/kgK
%-----
Q0=100; a1=101.61; a2=241129.9; b1=35.06;
b2=119744.9; a3=5.01; a4=20580.3; b3=-8.68;
b4=-22745.5; p=-906.58; q=6.09;
%-----
%optimizasyon agirliklari...
Jmal1=[4e3; 22];
Jmal2=[4e-4; 2e-1];
%-----

%Genetik algoritma ile ilgili değerler...
sample=[1e-1;5e-5]; %örnekleme aralığı
eps=1e-3; %değişim aralığı
crossover_opt=0.4; %çaprazlama işleminin olasılık değeri
mut_opt=0.05; %mutasyon işleminin olasılık değeri
turnuva_boyu=5;
gen=1;
bounds=[293 373;0 6e-3];
pop_size=10;
%-----
Ny=60*4; % öngörü ufku...
t=(1:1:Ny);
ay=0.025;

i=1;
[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X0,R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
X(1,1:fi+1)=X0;
su=length(X(1,:));

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabı...
X_gecici=X.*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(1,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2);

[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
=hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

for k=1:fi+1,
    [D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
end

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
=hesap01(T(i,1));

% GAB'den aw hesabı...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);

%-----
[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
=hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q0);
%-----

```

```

save gecici001.mat
dilara=1;
q_s_tur(1,1)=0;
t_d=1;

sinir=bounds(:,2)-bounds(:,1);
bits=ceil(log2(sinir./sample)); %kullanılacak bit sayısı bulunur
crom_length=sum(bits(:))+1; % kromozomdaki bit sayısı + fitness

%başlangıçtaki popülasyonu bulalım...
pop=round(rand(pop_size,crom_length));

for i=1:pop_size,
xy(i,:)=b2f(pop(i,1:crom_length-1),bounds,bits);
end

    for ii=1:pop_size,
        Qpre=Q;
        Xpre=X;
        Tpre=T;
        X_ortpre=X_ort;
        T_apre=xy(ii,1);
        X_mgbpre=xy(ii,2);
%    predictive_modelbetaversion
Ta_FFN=(T_apre-273)/(393-273);
Ya_FFN=X_mgbpre/6e-3;
X_FFN=X_ort(1,1)/1.563;
Q_FFN=Q/100;
P1f=[];
P2f=[];
for k=1:Ny/60,
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
[Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
X_FFN=X_FFN/1.563;
Q_FFN=Q_FFN/100;
end
[J]=maliyet_fonk_hesapxxx(Jmal1,Jmal2,[T_apre;T(1,1)],[X_mgbpre;0],[X_v,Q_v);
% [JX JQ JE
J]=maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_FFN,X_eq,Q_FFN,T_apre,u_air,X_mgbpre,c_a,c_wv);
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end
pop(:,crom_length)=Jgec;

oval=J;
bFoundIn=1;
hata=1;
btls=1;

% for gen=1:gen_adm,
while hata >= eps,
gen=btls;
[I(gen,1),JJ]=min(pop(:,crom_length)); % popülasyon içindeki en iyi kromozom

```

```

info(gen,1)=gen;
info(gen,2)=I(gen,1); %minimum kromozom...
info(gen,3)=mean(pop(:,crom_length)); %ortalamlar...
info(gen,4)=std(pop(:,crom_length));
best=pop(JJ,1:crom_length);
if gen==1,
    hata=1;
else
    hata=abs(I(gen,1)-I(gen-1,1));
end

if ((abs(info(gen,2)-oval)>eps) | (gen==1))
    fprintf(1,'n%d %fn',gen,info(gen,2));
    bpop(bFoundIn,:)= [gen b2f(pop(JJ,1:crom_length-1),bounds,bits),I(gen,1)];
    bFoundIn=bFoundIn+1;
    oval=info(gen,2);
else
    fprintf(1,'%d ',gen);
end

% yeni bir populasyon oluşturalım...
% turnuva yöntemi...

new_pop = zeros(pop_size,crom_length); %yeni populasyon için yer ayrılıyor...
turnuva=floor(rand(turnuva_boyu,pop_size)*pop_size)+1; %turnuva takvimi...
%veeeeeeeeeee kazananlar...
[c b]=min(reshape(pop(turnuva,crom_length),turnuva_boyu,pop_size));
new_pop=pop(diag(turnuva(b,:),:)); %işte yeni populasyon...

pc=find(rand(pop_size,1)<crossover_opt);

if rem(size(pc,1),2),
    pc=pc(1:(size(pc,1)-1));
end
pc=reshape(pc,size(pc,1)/2,2);
bitler=sum(bits(:));
for j=1:size(pc,1)
    baba=pc(j,1);
    anne=pc(j,2);
    p1=new_pop(baba,:);
    p2=new_pop(anne,:);
% crossover işlemi ile iki yeni üye bulunuyor...
    cut_point=round(rand*(bitler-2))+1;
% ve çocuklar...
    c1 = [p1(1:cut_point) p2(cut_point+1:bitler+1)];
    c2 = [p2(1:cut_point) p1(cut_point+1:bitler+1)];
% nesil sonrası...
    new_pop(baba,:)=c1;
    new_pop(anne,:)=c2;
end

% mutasyon işlemi...
for i=1:pop_size,
    rn=rand(1,bitler) < mut_opt;
    new_pop(i,1:bitler)=[abs(new_pop(i,1:bitler)-rn)];
end

for i=1:pop_size,
    xy(i,:)=b2f(new_pop(i,1:crom_length-1),bounds,bits);

```

```

end

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
%    predictive_modelbetaversion
Ta_FFN=(T_apre-273)/(393-273);
Ya_FFN=X_mgbpre/6e-3;
X_FFN=X_ort(1,1)/1.563;
Q_FFN=Q/100;
P1f=[];
P2f=[];
for k=1:Ny/60,
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
[Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
X_FFN=X_FFN/1.563;
Q_FFN=Q_FFN/100;
end
[J]=maliyet_fonk_hesapxxx(Jmal1,Jmal2,[T_apre;T(1,1)],[X_mgbpre;0],[X_v,Q_v);
Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end
new_pop(:,crom_length)=Jgec;

pop=new_pop;
[A,B] = max(pop(:,crom_length));
pop(B,:)=best;
btls=btls+1;
end
Jdata=[J];
TaXmgb=b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits);
Ta(i:i+Ny,1)=TaXmgb(1);
X_mgb(i:i+Ny,1)=TaXmgb(2);

Ta_FFN=(TaXmgb(1)-273)/(393-273);
Ya_FFN=TaXmgb(2)/6e-3;
X_FFN=X_ort(1,1)/1.563;
Q_FFN=Q(1,1)/100;
P1f=[]; P2f=[];

for k=1:Ny/60,
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
[Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
X_FFN=X_FFN/1.563;

```

```

Q_FFN=Q_FFN/100;
end
Pf1=P1f; Pf2=P2f;

fprintf(1,'\n\n%d %d ',b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits),X_ort(1))

i=2;j=su;
t_d=1;

while X_ort(i-1,1) >= X_eq*30

    kg_eff=kg_eff+t_d/7e8;

    for f=fi:(-1):0,
        r=r_ara*f+R1;

        if f==0, % B.C...

            X(i,j)=X(i,j+1);

        elseif f==fi, % B.C...

            [X(i,j)]=explicit02(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
                r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j),X(i-1,j-1),js_mi(i-1,1));
            else

                [X(i,j)]=explicit03(D(j),D(j-1),q_sp(i-1,j),q_sp(i-1,j-1),r,...
                    r_ara,dilara,q_s_tur(i-1,1),X(i-1,j+1),X(i-1,j),X(i-1,j-1));
                end
                j=j-1;
            end % for R_d...

%-----
hh=dilara;
[T(i,1)]=temperature(q_ort(i-1,1),c_y(i-1,1),Rd,alfa_eff(i-1,1),Ta(i-1,1),...
    T(i-1,1),js_mi(i-1,1),deltaHv(i-1,1),hh);
%-----

%trapez yöntemi ile boyutsuz nem konst. ortalamasının hesabi...
X_gecici=X(i,:).*(R1:r_ara:Rd);
X_ort(i,1)=(X_gecici(1)+2*sum(X_gecici(2:su-1))+X_gecici(su))*r_ara/(Rd^2); % silindir için...

[Rd,r_ara]=buz_r(R0,d_m,e,d_s,X0,X_ort(i,1),R1,fi);
RR(i,1)=Rd;
[q_s(i,1),q_sp(i,:),q_m(i,1),q_mp(i,:),q_ort(i,1),Y(i,1),c_y(i,1),Ed]...
    =hesap(d_s,d_m,e,X_ort(i,1),X(i,:));

q_s_tur(i,1)=(q_s(i,1)-q_s(i-1,1))/dilara;
clear D;

for k=1:fi+1,
    [D(k)]=difuzyon(D0,Ed,R,T(i,1),T_ref,X(i,k),X_eq,X0,a);
end

ugur(i,:)=D;

[d_a(i,1),d_wv(i,1),lamda_air(i,1),D_a(i,1),q_mg_sat(i,1),deltaHv(i,1)]...
    =hesap01(T(i,1));

```

```

% GAB'den aw hesabi...
[X_i(i,1),aw(i,1)]=aw_hesap(X(i,su),Es,R,T(i,1),C,K,W);
%-----
[q_mgb(i,1),q_mgi(i,1),js_mi(i,1),w_mgi(i,1),w_mgb(i,1),kg(i,1),alfa(i,1),...
par1(i,1),alfa_eff(i,1)]...
=hesap02_instant(d_wv(i,1),X_mgb(i,1),q_mg_sat(i,1),aw(i,1),kg_eff,d_a(i,1),c_a,...
lamda_air(i,1),D_a(i,1),c_wv);

%.....inactivation equations.....
[Q(i,1)]=inactive(a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4,R,T(i,1),X_ort(i,1),p,q,Q(i-1,1));
%-----
%optimizasyon için maliyet fonksiyonunun bulunması

if mod(t_d,Ny)==0,
    fprintf(1,'\n%d ',t_d);
    clear xy Jgec new pop bpop info I JJ best JE JQ JX J btls hata X_v Q_v
    save gecici001.mat
    %başlangıçtaki popülasyonu bulalım...
%    pop=round(rand(pop_size,crom_length));

for no=1:pop_size,
xy(no,:)=b2f(pop(no,1:crom_length-1),bounds,bits);
end
    for ii=1:pop_size,
        Qpre=Q;
        Xpre=X;
        Tpre=T;
        X_ortpre=X_ort;
        T_apre=xy(ii,1);
        X_mgbpre=xy(ii,2);
%    predictive_modelbetaversion
Ta_FFN=(T_apre-273)/(393-273);
Ya_FFN=X_mgbpre/6e-3;
X_FFN=X_ort(i,1)/1.563;
Q_FFN=Q(i,1)/100;
P1f=Pf1; P2f=Pf2;
for k=1:Ny/60,
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
[Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
X_FFN=X_FFN/1.563;
Q_FFN=Q_FFN/100;
end
[J]=maliyet_fonk_hesapxxx(Jmal1,Jmal2,[T_apre;Ta(length(Ta))],[X_mgbpre;X_mgb(length(X_mgb
))],X_v,Q_v);
% [JX JQ JE
J]=maliyet_fonk_hesap(j1,j2,j3,X_FFN,X_eq,Q_FFN,T_apre,u_air,X_mgbpre,c_a,c_wv);
    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end
pop(:,crom_length)=Jgec;

oval=J;
bFoundIn=1;

```

```

hata=1;
btls=1;
% for gen=1:gen_adm,
while hata >= eps,
gen=btls;

[I(gen,1),JJ]=min(pop(:,crom_length)); % populasyon içindeki en iyi kromozom

info(gen,1)=gen;
info(gen,2)=I(gen,1); %minumum kromozom...
info(gen,3)=mean(pop(:,crom_length)); %ortalamlar...
info(gen,4)=std(pop(:,crom_length));
best=pop(JJ,1:crom_length);
if gen==1,
    hata=1;
else
    hata=abs(I(gen,1)-I(gen-1,1));
end

if ((abs(info(gen,2)-oval)>eps) | (gen==1))
    fprintf(1,'\n%d %f\n',gen,info(gen,2));
    bpop(bFoundIn,:)=I(gen b2f(pop(JJ,1:crom_length-1),bounds,bits),I(gen,1));
    bFoundIn=bFoundIn+1;
    oval=info(gen,2);
else
    fprintf(1,'%d ',gen);
end

% yeni bir populasyon oluşturalım...
% turnuva yöntemi...

new_pop = zeros(pop_size,crom_length); %yeni populasyon için yer ayrılıyor...
turnuva=floor(rand(turnuva_boyu,pop_size)*pop_size)+1; %turnuva takvimi...
%veeeeeeeeeee kazananlar...
[c b]=min(reshape(pop(turnuva,crom_length),turnuva_boyu,pop_size));
new_pop=pop(diag(turnuva(b,:),:)); %işte yeni populasyon...

pc=find(rand(pop_size,1)<crossover_opt);

if rem(size(pc,1),2),
    pc=pc(1:(size(pc,1)-1));
end
pc=reshape(pc,size(pc,1)/2,2);
bitler=sum(bits(:));
for jno=1:size(pc,1)
    baba=pc(jno,1);
    anne=pc(jno,2);
    p1=new_pop(baba,:);
    p2=new_pop(anne,:);
% crossover işlemi ile iki yeni üye bulunuyor...
    cut_point=round(rand *(bitler-2))+1;
% ve çocuklar...
    c1 = [p1(1:cut_point) p2(cut_point+1:bitler+1)];
    c2 = [p2(1:cut_point) p1(cut_point+1:bitler+1)];
% nesil sonrası...
    new_pop(baba,:)=c1;
    new_pop(anne,:)=c2;
end

```

```

% mutasyon işlemi...
for no=1:pop_size,
    rn=rand(1,bitler) < mut_opt;
    new_pop(no,1:bitler)=[abs(new_pop(no,1:bitler)-rn)];
end

for no=1:pop_size,
    xy(no,:)=b2f(new_pop(no,1:crom_length-1),bounds,bits);
end

for ii=1:pop_size,
    Qpre=Q;
    Xpre=X;
    Tpre=T;
    X_ortpre=X_ort;
    T_apre=xy(ii,1);
    X_mgbpre=xy(ii,2);
%    predictive_modelbetaversion
Ta_FFN=(T_apre-273)/(393-273);
Ya_FFN=X_mgbpre/6e-3;
X_FFN=X_ort(i,1)/1.563;
Q_FFN=Q(i,1)/100;
P1f=Pf1; P2f=Pf2;
for k=1:Ny/60,
    P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
    [X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
    [Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
    X_FFN=X_FFN*1.563;
    Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
    X_FFN=X_FFN/1.563;
    Q_FFN=Q_FFN/100;
end
[J]=maliyet_fonk_hesapxxx(Jmal1,Jmal2,[T_apre;Ta(length(Ta))],...
    [X_mgbpre;X_mgb(length(X_mgb))],X_v,Q_v);

    Jgec(ii,1)=J;
    clear Qpre Xpre Tpre X_ortpre T_apre;
    load gecici001.mat
end
new_pop(:,crom_length)=Jgec;

pop=new_pop;
[A,B] = max(pop(:,crom_length));
pop(B,:)=best;
btls=btls+1;
end
Jdata=[Jdata; J];
TaXmgb=b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits);

Thava=TaXmgb(1);
hava_fark=Thava-Ta(i-1,1);
if hava_fark < 0,
    Ta(i:i+Ny-1,1)=Ta(i-1,1)+(exp(-ay*t)-1)*abs(hava_fark);
else
    Ta(i:i+Ny-1,1)=Ta(i-1,1)+(1-exp(-ay*t))*hava_fark;
end
% Ta(i:i+Ny,1)=TaXmgb(1);
X_mgb(i:i+Ny,1)=TaXmgb(2);

```



```

Ta_FFN=(TaXmgb(1)-273)/(393-273);
Ya_FFN=TaXmgb(2)/6e-3;
X_FFN=X_ort(1,1)/1.563;
Q_FFN=Q(1,1)/100;
P1f=Pf1; P2f=Pf2;

for k=1:Ny/60,
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,P1f]=sim(net1,P(1:3,1),P1f);
[Q_FFN,P2f]=sim(net2,P,P2f);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
    X_v(k,1)=X_FFN;
    Q_v(k,1)=Q_FFN;
X_FFN=X_FFN/1.563;
Q_FFN=Q_FFN/100;
end
Pf1=P1f; Pf2=P2f;

Ta_FFN=(TaXmgb(1)-273)/(393-273);
Ya_FFN=TaXmgb(2)/6e-3;
X_FFN=X_ort(i,1)/1.563;
Q_FFN=Q(i,1)/100;
P=[Ta_FFN;Ya_FFN;X_FFN;Q_FFN];
[X_FFN,Pf1]=sim(net1,P(1:3,1),Pf1);
[Q_FFN,Pf2]=sim(net2,P,Pf2);
X_FFN=X_FFN*1.563;
Q_FFN=Q_FFN*100;
fprintf(1,'\n\n%d %d ',b2f(best(1,1:crom_length-1),bounds,bits),X_ort(i))
end
i=i+1;
j=su;
t_d=t_d+1;
end % for t_d...

```

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

1. Yüzgeç U., Türker M., Becerikli Y., 2004. Modelling of Batch Fluidized Bed Drying of Baker's Yeast for Cylindrical Pellets. IEEE Conference on Mechatronics ICM'04, s. 7-12, 3-5 June 2004, İstanbul, TURKEY.



ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1991 yılında girdiği Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 1995 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu. 1995-1999 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 1998 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta olup, evli ve iki çocuk babasıdır.